

**INTÉGRATION DES DONNÉES SPATIALES ET TEMPORELLES POUR UNE GESTION OPTIMALE DES
BERGES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX**

Équipe de recherche

Claudine Boyer
André G. Roy
André St-Hilaire
Jeffrey Cardille
Chunping Ou
Sébastien Roy
Laurence Chaput-Desrochers
Dominic Roussel
Marie-France Sottile

Équipe de rédaction

Claudine Boyer
André G. Roy

Décembre 2013

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Fondsvert Québec

Table des matières

1	Introduction	10
2	Contexte / objectifs	11
3	Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	12
3.1	Ajustements de la rivière et vulnérabilité des rives	12
3.1.1	Ajustements de la rivière et fluctuations temporelles des débits et de la charge en transport.....	13
3.1.2	Vulnérabilité des rives et continuum sédimentaire : Variables physiques impliquées.....	14
3.2	Outil d'analyse	15
4	Méthodologie / données.....	15
4.1	Sites d'étude et périodes d'analyse.....	16
4.1.1	Sites d'étude	16
4.1.2	Périodes d'analyse.....	18
4.2	Évaluation des ajustements passés de la rivière et de ses rives	18
4.2.1	Géoréférencement et vectorisation	18
4.2.2	Évaluation des changements morphologiques	19
4.3	Variables clé agissant sur les ajustements locaux de la rivière	20
4.3.1	Caractérisation hydrologique des rivières	20
4.3.1.1	Rivière Nicolet.....	21
4.3.1.2	Rivière De La Fourche	27
4.3.2	Contexte physiographique et sédimentaire des sections de rivière étudiées	29
4.3.2.1	Rivière Nicolet.....	29
4.3.2.2	Rivière De La Fourche	30
4.4	Mise en place de l'outil d'analyse.....	32
5	Résultats.....	34
5.1	Processus d'ajustement morphologiques des rives et de la rivière.....	34

5.1.1	Couplage accumulation sédimentaire et érosion des rives.....	36
5.1.2	Incision du chenal principal et remplissage des chenaux secondaires	37
5.1.3	Coupures de méandre	38
5.2	Ajustements morphologiques passés de la rivière et de ses rives : variabilité temporelle et rôle des débits	39
5.2.1	Superficies des bancs d'accumulation $\Rightarrow$ rôle des débits	39
5.2.2	Zones actives « déplacement des rives » et le rôle des débits.....	40
5.2.3	Zones actives « changement dans la largeur du chenal » et le rôle des débits ..	42
5.3	Ajustements morphologiques passés de la rivière et de ses rives : variabilité spatiale et rôle des contraintes et des apports sédimentaires	43
5.3.1	Rivière De La Fourche	43
5.3.1.1	Variabilité longitudinale de la largeur de la rivière et de la vallée	43
5.3.1.2	Variabilité longitudinale de l'aire des bancs d'accumulation de la rivière	45
5.3.1.3	Distribution spatiale des zones actives « déplacement des rives » et « changement dans la largeur du chenal »	47
5.3.1.4	Localisation des zones actives persistantes par rapport aux variables du milieu	49
5.3.2	Rivière Nicolet.....	52
5.3.2.1	Variabilité longitudinale de la largeur de la rivière et de la vallée	52
5.3.2.2	Variabilité longitudinale de l'aire des bancs d'accumulation	53
5.3.2.3	Distribution des zones actives « déplacement des rives » et « changement dans la largeur du chenal »	55
5.3.2.4	Localisation des zones actives persistantes par rapport aux variables du milieu	58
6	Synthèse et discussion	60
6.1	Variables clés agissant sur les ajustements locaux de la rivière.....	62
6.1.1	Indicateurs de localisation des zones actives importantes	62
6.1.2	Indicateurs : modulant l'amplitude zones actives	63

6.2	Vulnérabilité des berges aux modifications des variables de contrôle des processus d'érosion	64
6.2.1	Démarche d'évaluation	64
6.2.2	Outil d'analyse	65
6.2.3	Scénarios hydrosédimentaires	65
7	Conclusion et recommandations	68
8	Références	69
9	Annexes.....	71

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	a) Localisation du bassin de la rivière Nicolet; b) Zones d'étude (en grisées) sur les rivières Nicolet et Nicolet Sud-Ouest et modèle numérique de terrain (1:20,000).	17
Figure 2.2	a) Localisation du bassin de la rivière De La Fourche; b) Zone d'étude (en grisée) et modèle numérique de terrain (1:20,000).	17
Figure 2.3	Exemples de a) zones actives « déplacement de rive » et b) zones actives « changement dans la largeur » de la rivière. Le trait bleu indique la position de rives en 1985 et les photos-aériennes de 2010 sont utilisées en arrière plan.	20
Figure 2.4	Comparaison des courbes de cumul des différences de débit maximum annuel pour les rivières Nicolet, Nicolet Sud-Ouest et Bulstrode (moyenne mobile 5ans).	22
Figure 2.5	Magnitude des débits maximum annuels (DH1). a) rivière Nicolet Sud-ouest; b) rivière Nicolet.	23
Figure 2.6	Cumul des différences de débit journalier maximum et moyen annuel (moyenne mobile 5 ans). a) Nicolet Sud-Ouest; b) Nicolet. La courbe de la Nicolet Sud-Ouest est utilisée pour représenté la Nicolet en amont de la rivière Bulstrode.	25
Figure 2.7	Comparaison de l'indicateur DH1 (débit maximum annuel journalier) calculées pour les données observées (obs) et simulées (sim) pour la période de référence. Les données obtenues à l'aide de la grille CEHQ et de la méthode de mise à l'échelle « scaling translation » (st) sont représentées.	26
Figure 2.8	a) Diagramme des percentiles des débits maximum annuels par période de 7 ans; b) Date d'occurrence des crues supérieures à la crue 2 ans par période. Rivière Du Sud (utilisée pour la rivière De La Fourche).	28
Figure 2.9	Cumul des différences de débit maximum annuel et des différences de débit moyen annuel (moyenne mobile 5 ans). Rivière Du Sud (utilisée pour la rivière De La Fourche).	29
Figure 2.10	Dépôts de surface (source : Commission géologique du Canada), région de la rivière Nicolet. Les courbes de niveau au 10 m sont représentées.	30
Figure 2.11	Dépôts de surface dans la section d'étude, Rivière De La Fourche. Les flèches rouges identifient quelques unes des sources majeures de sédiments dans les terrasses de la vallée. Les courbes de niveau au 10 m sont aussi représentées.	31
Figure 2.12	Polygones d'analyse a) exemple Nicolet b) exemple rivière De La Fourche.	33
Figure 2.13	Localisation des sites d'occurrence des différents processus majeurs d'ajustement observés sur la rivière Nicolet. Les principaux tributaires et les îles centrales végétalisées sont aussi indiqués.	35

- Figure 2.14 a) Localisation des sites d'occurrence des différents processus majeurs d'ajustement observés sur la rivière De La Fourche. La position des sites sur l'axe vertical réfère à la période à laquelle le processus s'est produit. Plus le trait est haut sur l'axe, plus il s'est produit tardivement. Les contraintes à la migration et les tributaires sont aussi localisés. b) Changement dans la longueur de la rivière pour les trois périodes d'observation.....35
- Figure 2.15 a) Migration latérale et longitudinale des méandres dans la zone la plus active de la rivière Nicolet (1966 et 2010); b) couplage bancs d'accumulation et érosion des rives dans les zones à méandres; c) couplage bancs d'accumulation et érosion des rives observée dans une zone rectiligne surdimensionnée.....36
- Figure 2.16 a) Secteur avec îles centrales en 1964 et b) même secteur en 201037
- Figure 2.17 Cas de coupures de méandre sur la rivière De La Fourche a) secteur km 6 à km 8, période 1936-1964; b) secteur km 6 à km 8, période 1964-1980; c) secteur km 10 à km 11, période 1994-2010.....38
- Figure 2.18 Superficie pondérée des bancs pour chaque série de photos aériennes en relation avec la période hydrologique représenté par le cumul des différences de débit maximum. a) pour la Nicolet (section couverte par toutes les photos uniquement); b) pour la rivière De La Fourche (courbe CDDmax : rivière du Sud); c) Nombre de jours où le débit est supérieur au débit de récurrence 2 ans à la station de la rivière du Sud.....40
- Figure 2.19 Aire totale pondérée des zones d'accumulation et des zones d'érosion et ratio des aires accumulées/ aires érodées en relation avec le courbe CDDmax. a) et b) Nicolet; c) et d) rivière De La Fourche; e) et f) rivière De La Fourche sans les aires « gains » liées aux coupures de méandre (périodes 1964-1980 et 1994-2010).41
- Figure 2.20 Relation entre le cumul des différences de débit maximum (CDDMax) et le ratio du nombre de polygones avec élargissement/rétrécissement du chenal pour la Nicolet.....43
- Figure 2.21 Relation entre le cumul des différences de débit maximum (CDDMax) et le ratio du nombre de polygones avec élargissement/rétrécissement du chenal pour la rivière De La Fourche43
- Figure 2.22 Variations longitudinales de la largeur de la rivière De La Fourche en 2010. La position des différentes caractéristiques physiques du milieu est indiquée. Le trait bleu indique la tendance moyenne de la largeur par sous sections.....44
- Figure 2.23 a) Zone de surdimensionnement (en fuchsia) dans la section comprise entre le km 4 et le km 8, rivière De La Fourche; b) Vue de la hauteur des bancs d'accumulation.....45

Figure 2.24	Distribution des bancs d'accumulation persistants en relation avec les caractéristiques du milieu, rivière De La Fourche. a) relation entre la position des bancs d'accumulation et des zones surdimensionnées; b) relation entre la position des bancs d'accumulation, l'élévation et des sources sédimentaires.	46
Figure 2.25	Distribution des zones actives cumulées pour les trois périodes analysées. a) 1964-1980; b) 1980-1994; c) 1994-2010 et d) cumul des différences de largeur pour chaque période, rivière De La Fourche. Les images de droite illustrent les changements observés dans la zone la plus active de la rivière.	48
Figure 2.26	Modification temporelle de la largeur de la rivière De La Fourche. Le ratio de largeur entre le début et la fin de la période est représenté. Le trait vert localise les zones surdimensionnées (écart positif de largeur) au début de chaque période.....	50
Figure 2.27	a) Localisation des zones actives persistantes ($Aire > 100 \text{ m}^2$), rivière De La Fourche; b) localisation des zones actives persistantes et des bancs persistants. Le seuil minimal de 0.3 utilisé pour la représentation du rapport entre les aires des bancs et l'aire du chenal a été choisi pour faire ressortir le lien étroit entre ce ratio et la localisation des zones actives persistantes.....	51
Figure 2.28	Variations longitudinales de la largeur de la Nicolet dans la section à l'étude en 2010. La position des différentes caractéristiques physiques du milieu est indiquée. Le trait bleu correspond à la tendance moyenne de la largeur par sous sections.	52
Figure 2.29	Largeur relative (par polygones d'analyse) de la rivière Nicolet (km 25 à km 26).	53
Figure 2.30	Distribution des bancs d'accumulation persistants (sans les îles végétalisées) en relation avec la position des différents éléments du milieu (Nicolet).....	53
Figure 2.31	a) Distribution des bancs d'accumulation persistants en fonction de la largeur de la rivière. Les îles stabilisées sont représentées; b) Distribution des bancs d'accumulation en fonction des zones sous- et surdimensionnées (écart largeur: cas 1985), dans la section amont de la zone d'étude de la Nicolet.....	54
Figure 2.32	Distribution des zones actives cumulées le long de la rivière Nicolet a) 1966-1985; b) 1985-2010.....	56
Figure 2.33	Évolution du delta de la rivière Des Rosiers. Le trait rouge indique la position approximative du delta dans la rivière Nicolet aux différentes années.....	57
Figure 2.34	Modification de la largeur du chenal d'une période à l'autre, Nicolet.	57
Figure 2.35	a) Localisation des zones actives persistantes, rivière Nicolet; b) localisation des zones actives persistantes et des bancs d'accumulation persistants (les îles stables ne sont pas représentées).	59

Figure 2.36 Nombre total de jours où le débit est supérieur au débit de récurrence 2 ans par période de 30 ans (saut par tranche de 5 ans). a) Rivière Nicolet Sud-Ouest; b) rivière Du Sud. Les données observées et la projection d'une augmentation de 10% pour la période future par rapport à la période de référence (en vert) sont représentées. Les pourcentages indiquent les différences par rapport à la période de référence.....67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Fréquence des crues (supérieure au 75 ^e percentile). a) rivière Nicolet Sud-Ouest; b) rivière Nicolet.	24
Tableau 2.2 Détails des simulations climatiques du MRCC	26
Tableau 2.3 Indicateurs morphologiques de la rivière	32
Tableau 2.4 Localisation les changements de largeur de la rivière De La Fourche en lien avec le surdimensionnement et le sous-dimensionnement local dans la largeur du chenal.....	51
Tableau 2.5 Localisation des changements dans la largeur en lien avec le surdimensionnement et le sous-dimensionnement local de la Nicolet.	58

1 INTRODUCTION

Les systèmes fluviaux s'ajustent à une gamme de processus complexes et interdépendants agissant à différentes échelles. Ces processus sont fonction des variables hydrologiques, sédimentologiques et du contexte biophysique qui contrôlent et modulent la réponse des cours d'eau. Le climat joue un rôle fondamental sur la stabilité du lit et des berges des rivières en agissant directement sur le régime hydrologique qui façonnent le tracé et les dimensions du chenal. Dans un contexte de changements climatiques où l'on anticipe une augmentation de la fréquence des débits de forte ampleur, un accroissement du nombre de crues hivernales et une accentuation des étiages, la dynamique des apports sédimentaires et des ajustements morphologiques des cours d'eau et de l'érosion des berges sera modifiée (Ouranos, 2010; Boyer *et al.*, 2010). Les connaissances actuelles sur la dynamique de ces ajustements sont toutefois limitées. Il en est de même pour l'existence d'outils permettant d'évaluer les interactions entre les variables et de caractériser la sensibilité du milieu aux changements anticipés.

Les berges de cours d'eau sont des zones particulièrement sensibles, d'une part parce qu'elles sont une interface d'échanges vitaux entre les écosystèmes fluviaux et terrestres supportant ainsi la diversité biologique et d'autre part, parce qu'un grand nombre d'infrastructures sont installées en bordure des cours d'eau (Neiman and Décamps, 1997; Opperman *et al.*, 2010). Dans plusieurs cas, l'instabilité des berges est fortement liée à la l'évolution des zones de stockage sédimentaire dans la rivière et à la rétroaction de celles-ci sur l'écoulement. Il importe d'évaluer les impacts des changements hydro-climatiques anticipés sur la prévalence, l'amplitude et l'étendue des ajustements des processus fluviaux et d'érosion des berges, sur la dynamique du continuum sédimentaire dans la rivière et sur l'intégrité des zones riveraines. Conséquemment, une meilleure compréhension des interactions entre les processus de transport et d'accumulation des sédiments dans la rivière et l'érosion des berges de même que l'intégration des données pertinentes sont essentielles à cette évaluation et à l'élaboration des mesures adéquates pour accroître la résilience des berges et gérer le milieu riverain dans un contexte hydro-climatique changeant. Ces mesures doivent tenir compte de la réponse passée des systèmes fluviaux aux aléas hydro-climatiques et des contraintes biophysiques locales favorisant une amplification des ajustements. On doit aussi privilégier une intégration des solutions et ultimement encourager la participation des riverains et citoyens dans l'élaboration de ces solutions et des stratégies efficaces de gestion (IPCC, 2008; Ouranos, 2010; Pahl-Wostl *et al.*, 2007).

Ce projet propose une approche analytique originale qui permet d'identifier, localement et à l'échelle de tronçon, la vulnérabilité des berges et de la rivière aux modifications des variables de contrôle. Cette approche s'appuie sur les variables clés identifiées par une analyse empirique de l'évolution passée de la rivière et sur son état actuel. Ce rapport présente les résultats obtenus pour les rivières Nicolet et De La Fourche dans le sud du Québec. Ces deux cas présentent des différences quant au milieu physiographique et hydroclimatique mais aussi des similarités quant à l'importance de l'érosion des berges

2 CONTEXTE / OBJECTIFS

La gestion des rivières et des berges dans un contexte d'un climat en transformation doit s'appuyer sur des outils qui intègrent, actualisent et mettent en relation les diverses données biophysiques et hydro-climatiques qui affectent la rivière. Même si le développement de tels outils est fondamental, il en existe peu à l'échelle internationale. On doit donc développer une approche qui soit généralisable tout en étant adaptée au contexte. Actuellement au Québec, les informations disponibles pour comprendre les interactions entre les modifications du continuum sédimentaire et l'évolution complexe des berges et pour soutenir la prise de décision quant à la gestion des berges sont parcellaires et rarement intégrées spatialement. Leur mise à jour est aussi souvent déficiente. Par conséquent, la vulnérabilité des berges, les risques d'érosion et les impacts associés à des interventions sont peu connus et ne sont généralement pas évalués dans leur globalité. Cette lacune s'ajoute à la complexité naturelle des processus d'ajustement morphologique des rivières et des berges. La nécessité d'intégrer spatialement ces informations et de mettre à jour les bases de données a été largement documentée pour la gestion efficiente de l'eau à l'échelle des bassins versants (Conseil de la science et de la technologie, 2010). Le même constat s'applique aussi pour la gestion des berges puisque ces zones sont directement affectées par un ensemble de variables: le régime hydrologique, la dynamique d'ajustement de la rivière, le volume des apports sédimentaires, les processus de stockage et de mouvement des sédiments dans la rivière, l'effet de rétroaction des formes d'accumulation sur la réorganisation locale de l'écoulement, la végétation et les interventions humaines de toutes sortes en milieu riverain incluant l'utilisation du sol.

Le développement d'une approche adaptée aux risques d'érosion de berges et intégrant le continuum sédimentaire représente donc un enjeu majeur pour plusieurs comités de bassins versants du Québec (ex.: comité de la rivière Nicolet et le comité de la Côte du Sud) où la connaissance de l'état et de la sensibilité des berges aux différents processus d'érosion est fragmentaire à l'échelle du bassin.

L'occurrence plus grande des événements hydrologiques de forte ampleur augmenterait les risques d'érosion des berges par effet direct et par effet de rétroaction liée à la modification des processus d'accumulation sédimentaires et au réalignement de l'écoulement dans la rivière et entraînerait en conséquence des impacts écologiques, économiques et sociaux majeurs. Des cas récents ont fait les manchettes tant en Gaspésie qu'en Estrie quant aux effets des crues d'une très grande amplitude sur l'érosion des berges et la redistribution de sédiments, la création de dépôts importants et le couplage de ces processus. Cet enjeu se retrouve aussi à l'échelle gouvernementale. Par exemple, le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) agit à titre d'expert dans le cas d'érosion des berges menaçant la sécurité des personnes ou des biens pour le compte du Ministère de la Sécurité Public (MSP). Ces enjeux bénéficieraient d'une nouvelle méthode d'analyse et d'une clé d'interprétation permettant la mise en contexte des données dans une approche intégrée spatialement et temporellement et prenant en compte explicitement le continuum naturel du déplacement des sédiments dans la rivière. Pour le MDDEP, les décisions prises dans le cadre d'autorisation des projets en berges assujettis à l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement (Gouvernement du Québec) et à la mise en œuvre de la Politique de la protection des rives, du littoral et des plaines inondables profiteraient aussi de la disponibilité d'un outil qui permettrait d'évaluer les projets dans un contexte global. Tout en favorisant une prise de

décision éclairée dans une perspective de changements climatiques, l'élaboration d'une nouvelle méthode d'analyse du milieu riverain fournirait de plus les bases pour bonifier certains aspects des politiques de protection des rives et du cadre écologique utilisé pour ces milieux.

L'objectif global de ce projet est d'élaborer et de tester une approche de diagnostic permettant 1) d'analyser, identifier et de cartographier les zones morphologiquement actives de la rivière, 2) d'estimer la vulnérabilité et l'instabilité potentielle des berges en tenant compte du couplage érosion de berges - accumulation sédimentaire et 3) d'intégrer les contraintes à la migration du chenal et la modification spatiale des patrons d'accumulation en réponse aux changements environnementaux induits par la modification du climat ou par des actions anthropiques. Cette méthode d'analyse de la stabilité des rivières fournira une clé d'interprétation de la vulnérabilité des berges à l'érosion assortie à un outil d'intégration et d'analyse des données pertinentes. Cet outil permettra de faire un suivi de l'évolution de la rivière. Cette étude propose des recommandations et stratégies de gestion du milieu riverain adaptées au contexte dynamique des changements climatiques.

Afin de réaliser cet objectif global, le projet aura à : 1) évaluer la stabilité passée de la rivière et des berges; 2) identifier les variables de contrôle des processus d'érosion-accumulation et modéliser les relations entre les variables de contrôle (hydro-climatiques), le continuum sédimentaire et la stabilité de la rivière et des berges; 3) analyser la dynamique actuelle des berges en fonction de leurs caractéristiques biophysiques; 4) évaluer la vulnérabilité actuelle du lit et des berges de la rivière en utilisant explicitement le concept de continuum sédimentaire et une clé diagnostique des risques d'érosion; 5) appliquer cette évaluation dans un contexte de changements climatiques; 6) définir des stratégies d'intervention dans les zones actives et dégager des lignes directrices visant une gestion optimale des cours d'eau et de leur bassin.

3 CADRE THÉORIQUE / COMPTE-RENDU DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE

3.1 AJUSTEMENTS DE LA RIVIÈRE ET VULNÉRABILITÉ DES RIVES

La morphologie des rivières est ajustée au régime hydrologique actuel, aux apports sédimentaires du bassin, aux matériaux de la rivière et de la vallée et à la topographie de la vallée (Hey and Thorne, 1986). La modification de ces éléments et en particulier du régime hydrologique en lien avec des changements du climat, entraîne des réajustements morphologiques de la rivière. L'érosion et l'accumulation sédimentaire dans le chenal des rivières sont des processus naturels par lesquels les rivières peuvent s'ajuster aux modifications temporelles dans l'amplitude des débits et aux variations spatiales de la capacité de transport de sédiments, des apports solides et de la résistance au transport. Ces mécanismes induisent une instabilité locale mais aussi des changements en amont et en aval par rétroaction.

Dans les cas où l'instabilité est soutenue dans le temps et maintenue sur de longue distance, elle est toutefois hautement indésirable en raison des risques posés pour les infrastructures ou la destruction des habitats précieux (Thorne *et al.* 1996). L'amplitude des processus d'érosion et d'accumulation représente un enjeu majeur dans la gestion de plusieurs rivières

notamment pour les rivières situées dans la zone de transition entre la montagne et la plaine. Ces rivières sont très actives et dominées par une importante charge de fond et par une fréquente redistribution de ces sédiments. Les ajustements de ces rivières sont typiquement variables dans le temps et dans l'espace en réponse aux variables de contrôle et à la discontinuité spatiale des éléments qui agissent et modulent l'amplitude et le type d'ajustements (Toone *et al.*, 2013).

3.1.1 Ajustements de la rivière et fluctuations temporelles des débits et de la charge en transport

Pour un système donné, les fluctuations temporelles du débit liquide et de la charge sédimentaire entraînent une oscillation entre les conditions propices au transport des sédiments et à leur accumulation et un ajustement des dimensions de rivière. Le rôle direct des débits dans les processus locaux d'érosion des berges et de modification du chenal n'est pas clairement établi. De manière générale, les hauts niveaux d'eau favorisent l'érosion des berges, l'élargissement du chenal et l'accroissement des apports sédimentaires dans le chenal. L'élargissement de la rivière est associé à l'occurrence de débit extrême ou aux changements significatifs dans la fréquence des débits morphogénétiques. Cette relation a été observée dans de nombreux contextes et en particulier dans les rivières de piémont. Si la rivière s'élargit systématiquement lors des événements de crue, l'amplitude de l'élargissement n'est toutefois pas directement corrélé avec la magnitude de la crue (Piégay *et al.*, 2009; Toone *et al.*, 2013; Moretto *et al.*, 2013).

La contribution des débits modérés à l'érosion des berges peut aussi être élevée compte tenu du fait que ces débits favorisent l'accrétion des sédiments sur les bancs d'accumulation en chenal et de l'influence relative que peuvent avoir les bancs d'accumulation sur les directions d'écoulement (Gaeuman *et al.*, 2005; Hooke and Yorke, 2011). Ainsi, l'impact des bancs sur la déviation de l'écoulement est plus grand pour les débits modérés que pour les hauts niveaux d'eau où ceux-ci pourront être complètement submergés. La contribution de ces débits à l'érosion des berges varie donc en fonction du stade de développement du banc et de son effet de rétroaction sur l'écoulement local (Church and Rice, 2009). L'effet des fluctuations des débits revêt une importance capitale dans un contexte de changements climatiques puisque le climat joue un rôle fondamental dans le régime hydrologique des rivières.

La réduction dans le volume de apports sédimentaires est invoqués dans le contexte des rivières de la France pour expliquer la réduction observée dans la largeur des rivières et leur incision (Liébault et Piégay, 2002; Toone *et al.*, 2013). Dans ces contextes, la réduction de la charge est attribuée à différents éléments dont les transformations dans l'utilisation du sol (afforestation), aux contrôles des charges sédimentaires sur les tributaires, aux barrages et à la fin de la période d'amortissement des impacts liés à l'occurrence d'une crue catastrophique. En contrepartie, l'augmentation de la charge peut être associée aux modifications anthropiques des cours d'eau. Ham (2005) a mesuré une importante augmentation de la charge en transport dans la rivière Fraser en lien avec le redressement de la rivière. Cette augmentation de la charge sédimentaire a contribué à l'élargissement local de la rivière.

La largeur du chenal et les bancs d'accumulation sont des indicateurs importants des processus d'érosion des berges et du continuum sédimentaire et donc des ajustements fluviaux et de la mobilité des rivières en réponse aux changements environnementaux et en particulier, climatiques. La compréhension des interactions entre ces processus physiques clés est cruciale pour définir des stratégies de gestion adaptées favorisant le maintien ou l'amélioration des conditions géomorphologiques et écologiques locales (Piégay *et al.*, 2005; Habersack and Piégay, 2008).

3.1.2 Vulnérabilité des rives et continuum sédimentaire : Variables physiques impliquées

Les caractéristiques du milieu agissent sur le continuum sédimentaire en modifiant localement les variables hydrauliques et la capacité locale de transport des sédiments. Au Québec, les zones de modification du continuum sédimentaire correspondent souvent aux zones où des problèmes d'embâcle sont aussi observés. Ce faisant, à certains endroits le long de la rivière, les ajustements observés divergeront de la tendance globale des ajustements en réponse aux fluctuations des forts débits.

La concomitance entre l'érosion des berges et la présence de bancs médiaux et latéraux a été relevée dans plusieurs études. Les bancs médiaux sont fréquemment associés aux segments de rivière les plus actifs en termes de changements morphologiques et contribuent à la redistribution des sédiments surtout dans les rivières à méandres (Hooke, 1986). La modification de ces formes sédimentaires par accrétion verticale ou latérale à la suite de fluctuations des apports sédimentaires et des débits entraîne une réorganisation locale de l'écoulement menant à la modification spatiale des patrons d'érosion et d'accumulation. La concentration de l'écoulement le long des berges à proximité des bancs favorise l'instabilité des rives. L'érosion des berges agit alors comme une source d'apports sédimentaires pour les zones aval et contribue à la translation vers l'aval des processus d'ajustement morphologique. Il a toutefois été observé que la translation vers l'aval des impacts était limitée et que les zones actives étaient circonscrites dans l'espace puisque les bancs se retrouvent dans des milieux spécifiques. Ces études ont ainsi identifié des conditions favorables à l'accumulation sédimentaire sous formes de bancs médiaux ou latéraux. On a distingué plusieurs facteurs intrinsèques au milieu physique, à l'organisation en plan de la rivière, aux fluctuations des débits et des apports sédimentaires et à l'effet rétroactif des bancs sur l'organisation de l'écoulement. Différents éléments anthropiques du paysage peuvent modifier aussi localement le continuum sédimentaire et conséquemment la distribution spatiale des zones d'érosion des berges le long de la rivière.

Certaines conditions biophysiques le long de la rivière favorisent la formation et la persistance des bancs d'accumulation. De façon générale, le potentiel d'accumulation sédimentaire est plus fort dans les zones de rapide variation de la capacité de transport. L'occurrence spatiale de ces formes a été liée aux fluctuations longitudinales de la largeur, de la pente dans les segments quasi-rectilignes ayant une énergie suffisante pour éroder le lit et les berges de la rivière, à la présence de tributaires et aux portions aval des méandres en développement (Lewin, 1976; Gaeuman *et al.*, 2005; Ham, 2005; Hooke, 2007; Church and Rice, 2009; Hooke and Yorke, 2010; Luchi *et al.*, 2010; Hooke and Yorke, 2011). Ces zones sont par conséquent plus sensibles à la modification des apports sédimentaires provenant des tributaires ou de l'érosion excessive des berges et/ou du lit du chenal des zones situées en amont.

La discontinuité dans les processus de transfert longitudinal des sédiments a été relevée dans différentes études (Toone, 2009; Formann *et al.*, 2007; Fryirs *et al.*, 2007). Fryirs *et al.* (2007) ainsi que Toone *et al.* (2013) ont souligné le rôle des points de contrainte associés à la présence de seuils rocheux ou de contraction de la vallée par incision du chenal sur cette discontinuité longitudinale des sédiments et par conséquent dans l'amplitude et le type d'ajustements morphologiques de la rivière. Les seuils rocheux peuvent réduire localement la pente en établissant un niveau de base local en amont duquel les sédiments sont confinés et peuvent entraîner la progression amont des conditions favorables à l'accumulation (Fryirs *et al.*, 2007). Les mêmes processus peuvent être associés à la présence de contraction de la vallée ou du chenal de la rivière.

3.2 OUTIL D'ANALYSE

L'intégration spatiale des différentes variables agissant sur l'écoulement et le continuum sédimentaire en rivière est essentiellement pour comprendre la distribution des zones de discontinuité par rapport à un état moyen de l'ensemble de la rivière. Différentes approches ont récemment été développées afin d'analyser de façon détaillée la morphologie et la granulométrie des rivières à partir des photos aériennes à haute résolution et d'interrelier différentes variables intrinsèques à la rivière afin de caractériser les habitats aquatiques à l'échelle fine (Carbonneau *et al.*, 2012). Alber et Piégay (2011) ont développé et appliqué un cadre méthodologique d'analyse permettant d'étudier l'hétérogénéité spatiale des rivières à l'intérieur des réseaux de drainage. Cette méthode identifie les zones de contraintes et les zones où la rivière a un potentiel plus grand de migrer librement, à partir des fluctuations longitudinales de la largeur de la vallée. L'équipe de Piégay a aussi développé des outils analytiques conçus pour détecter les variations de largeur à l'échelle de tronçons afin de mettre ces variations en lien avec les interventions sur les cours d'eau (e.g. utilisation des terres, barrages, rectification) dans le temps. Ces informations spatiotemporelles sont ensuite incluses dans un système d'information géographique afin de mettre en relation les différentes informations et de permettre une analyse détaillée des relations qui expliquent les changements morphologiques. Ces méthodes sont toutes basées sur des documents cartographiques et photographiques mais elles reposent aussi sur une validation sur le terrain. Le choix de l'échelle d'analyse de l'outil doit répondre à celle des processus que l'on souhaite documenter.

4 MÉTHODOLOGIE / DONNÉES

L'évaluation de la vulnérabilité des berges repose sur trois grands types de résultats d'analyse : 1) l'évaluation des ajustements morphologiques passés de la rivière et de ses rives; 2) l'identification des variables clés pouvant expliquer les ajustements locaux de la rivière et 3) la caractérisation morpho-sédimentaire actuelle de la rivière et des rives.

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une méthode d'analyse à fine échelle afin de pouvoir obtenir les trois grands types de résultats énoncés précédemment. L'approche proposée pour développer l'outil s'inspire des travaux de Piégay tout en y intégrant des éléments originaux liés entre autres à l'échelle d'analyse utilisée ici par rapport à celle utilisée par Piégay. Le point de départ est la disponibilité des couvertures de photos aériennes et des documents cartographiques précis permettant une analyse spatiale et temporelle des

changements morphologiques et des autres variables du paysage. Les deux rives du chenal sont tracées et le cours d'eau est discrétisé en court segment (La mise en place de l'outil est détaillée à la section 4.4). Ensuite, on associe à chaque segment les variables locales du paysage de chaque côté du cours d'eau. Ceci permet de caractériser les variations longitudinales du cours d'eau et de dégager les tendances temporelles quand on compare un même segment pour différentes couvertures aériennes. Cette analyse spatiotemporelle des variations morphologiques, de la position des berges et des variables du paysage s'accompagne d'une étude des régimes hydrologiques. Ici, nous proposons une approche qui vise à associer les fluctuations dans les variables classiques liées aux débits aux variations morphologiques. Cette approche ayant ses limites, nous avons eu recours à une analyse de fluctuations cumulatives des débits qui révèlent mieux les tendances temporelles. À notre connaissance, cette approche n'a pas été utilisée dans un tel contexte malgré son grand potentiel d'application dans l'étude des liens avec un climat changeant. Une fois l'analyse historique complétée, les résultats sont mis en perspective en fonction des scénarios climatiques pour les régions à l'étude.

4.1 SITES D'ÉTUDE ET PÉRIODES D'ANALYSE

4.1.1 Sites d'étude

L'étude a porté sur deux rivières contrastées du sud du Québec soit les rivières Nicolet et De La Fourche. Le bassin de la Nicolet est prioritaire pour le MDDEP et est d'intérêt pour Hydro-Québec (Auger et Baudrand, 2004). Les organismes de bassin versant, Copernic et Côte du sud ont aussi identifié l'érosion des berges comme un problème majeur sur leur territoire. Copernic a inclus cette priorité d'action dans son plan directeur (Dauphin, 2009). Les zones d'étude de ces rivières se trouvent dans la zone de transition entre les Basses Appalaches et les Basses Terres du Saint-Laurent (figure 2.1 et figure 2.2). Cette sélection permet d'avoir une gradation dans l'importance relative du continuum sédimentaire en partie liée au dénivelé plus important dans la rivière De La Fourche qui est dominée par une charge de fond abondante.

La section de rivière étudiée sur la Nicolet s'étend du sud de Victoriaville jusqu'à la municipalité de St-Léonard D'Aston (figure 2.1). La longueur totale de la section est de 45 km et le dénivelé est de 70 m. Dans cette section, la sinuosité de la rivière est faible. Le lit de la rivière est composé principalement de graviers et cailloux mais aussi de sable. Les berges sont composées principalement de sable fin et de limon et à certains endroits, l'argile est aussi présente.

La rivière De la Fourche est un cours d'eau à méandre et à lit graveleux situé à la limite ouest des Appalaches dans la région Chaudière-Appalaches. Elle prend sa source dans le Parc du Massif du sud et se jette dans la rivière Du Sud à Armagh. Le contexte de la rivière De la Fourche diffère de celui de la Nicolet de par la granulométrie plus hétérogène de ses berges et de son lit. La section à l'étude s'étend du pied du contrefort du Massif du Sud jusqu'au pont ferroviaire à Armagh Station, situé à environ 800 m en amont de sa confluence avec la rivière Du Sud (figure 2.2). La longueur de la rivière dans la section à l'étude est de 17 km et le dénivelé de la vallée est de 80 m.

Une section d'étude a aussi été analysée sur la rivière Nicolet Sud-Ouest. Les résultats de ces analyses ne seront pas présentés de façon détaillée dans ce rapport car la vectorisation

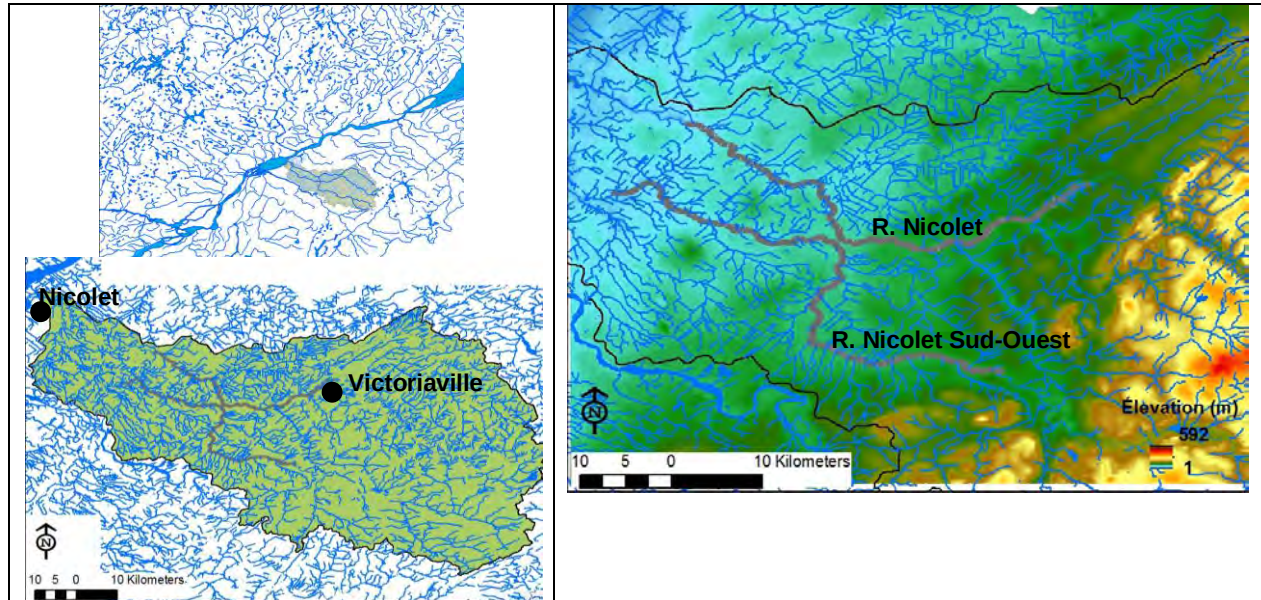


Figure 2.1 a) Localisation du bassin de la rivière Nicolet; b) Zones d'étude (en grisées) sur les rivières Nicolet et Nicolet Sud-Ouest et modèle numérique de terrain (1:20,000).

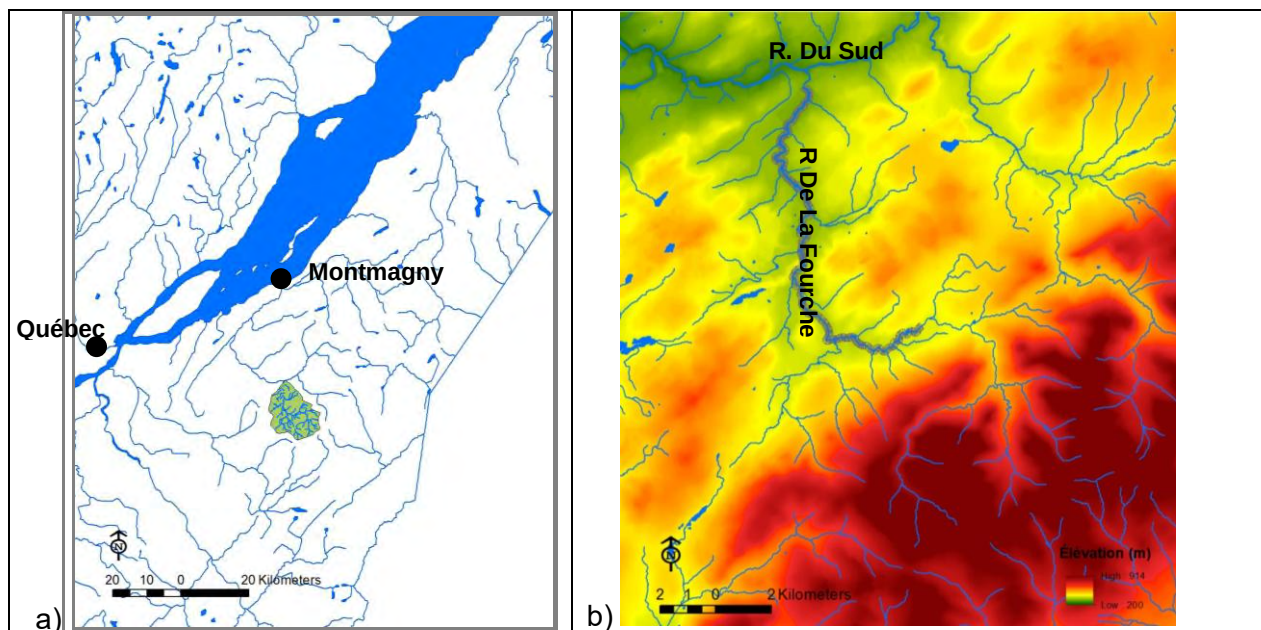


Figure 2.2 a) Localisation du bassin de la rivière De La Fourche; b) Zone d'étude (en grisée) et modèle numérique de terrain (1:20,000).

des rives de la rivière a été faite uniquement pour le pied de la berge et que cette limite ne permet pas de documenter pleinement les ajustements de la largeur de la rivière (voir section suivante). Le niveau d'activité des berges et les déplacements de la rivière obtenus avec cette limite est par conséquent moins fiable. Les résultats pour cette rivière ont été présentés dans un rapport préliminaire avec toutes les réserves nécessaires à propos des incertitudes liées à l'utilisation de cette limite (Boyer *et al.*, 2012).

4.1.2 Périodes d'analyse

Pour les rivières Nicolet et Nicolet Sud-Ouest, cinq couvertures de photos aériennes ont été analysées : 1966, 1979, 1985, 1997 et 2010. Pour la rivière De La Fourche, quatre séries de photos aériennes : 1964, 1980, 1994 et 2010 ont été analysées. Les photos de 1936 (1 : 20,000), 2000 (1 : 40,000) et de 2004 (images dans GoogleEarth) ont été sommairement examinées et ont permis de préciser la période d'occurrence de certaines modifications importantes du chenal. Compte tenu de l'échelle plus petite de ces séries de photos par rapport à celle des autres années, nous n'avons pas effectué d'analyses fines sur ces dernières.

Des relevés de terrain ont aussi été effectués en 2011 et 2012 sur chacune des rivières afin de caractériser les sédiments des rives et de la rivière, d'identifier la forme et la hauteur des berges, la dimension des bancs, la végétation sur les berges, la stabilité actuelle des rives et le type de processus d'érosion actif le long des rives.

4.2 ÉVALUATION DES AJUSTEMENTS PASSÉS DE LA RIVIÈRE ET DE SES RIVES

4.2.1 Géoréférencement et vectorisation

L'identification de la stabilité passée de la rivière et des berges repose sur la mesure des ajustements dans la largeur du chenal et des déplacements des rives. Ces mesures sont obtenues à partir des photos aériennes. Les photos ont été géoréférencées dans ArcGIS10. Un minimum de 12 points de contrôle par photos a été utilisé. Les erreurs induites par un mauvais référencement des images peuvent biaiser l'estimation des déplacements de rives d'une série de photos à une autre. Nous avons donc utilisé une méthode pour quantifier et codifier les incertitudes liées aux étapes de géoréférencement des photos aériennes et de vectorisation des limites du chenal.

La vectorisation des rives et des bancs d'accumulation des rivières à l'étude a été effectuée sur les photos aériennes géoréférencées. Nous avons tracé les limites plein bord du haut de berge et la limite du pied de berge de la rivière. La limite de la végétation arborescente ou arbustive identifiée sur les photos a servi de principal indicateur pour localiser le haut de berge et la limite plein bord de la rivière. Les données d'élévation et la reconnaissance de terrain ont aussi été mises à profit pour compléter ce tracé. Les limites plein bord représentent le chenal actif de la rivière. Bien que le tracé de la limite du pied de berge, identifiée par l'interface berge-eau, soit plus aisément identifiable et automatisable et moins sensible à l'interprétation de l'utilisateur que la limite du haut de berge à plein bord, cette limite tend à sous-estimer les changements dans la largeur de la rivière et le recul total des berges. Les interprétations faites à partir de cette limite peuvent aussi comporter un biais lors de la catégorisation de la direction de déplacement de la rive, c'est-à-dire lors de la distinction entre

l'érosion et l'accumulation le long des rives. Pour ces raisons, seuls les résultats obtenus à partir du tracé de la limite du haut de berge à plein bord seront présentés ici. Les données obtenues à l'aide de la limite du pied de berge seront utilisées uniquement pour fournir des informations complémentaires. Dans le cas de la Nicolet, les limites plein bord de la rivière ont été tracées pour trois des cinq séries de photos : 1966, 1985 et 2010.

Les vecteurs des lignes de rives ont été utilisés pour positionner la ligne centrale de la rivière à chacune des années et pour estimer les largeurs à une résolution en distance longitudinale de $\pm 1\text{m}$. Un programme Matlab a été créé pour réaliser cette étape. Ce programme est disponible en version compilée autonome. Les moyennes sur 20 m ont par la suite été intégrées dans ArcGis10 pour créer les polygones d'analyse.

À ce jour, les procédures de délimitation des rives à partir des photos-aériennes ne sont pas automatisées. Ce choix a été fait après avoir analysé la qualité des images anciennes disponibles, le nombre de séquences annuelles de photos à analyser et la durée du projet. Nous avons estimé que la procédure de correction des erreurs de mauvais classement aurait été plus longue à appliquer que la vectorisation manuelle.

4.2.2 Évaluation des changements morphologiques

Deux types de zones actives correspondant aux changements morphologiques mesurés entre deux couvertures de photos sont analysés dans ce rapport. Les zones actives liées au déplacement de rives pour lesquelles les aires d'érosion et d'accumulation sont calculées. Et les zones actives liées au changement dans la largeur de la rivière pour lesquelles des ratios de rétrécissement ou d'élargissement entre deux couvertures de photos sont calculés. La figure 2.3 montrent un exemple des deux types de zones actives. La figure 2.3a montre les aires des zones actives en érosion (en rouge) et accumulation (en orangée) associées au déplacement des rives entre 1985 et 2010. La figure 2.3b illustre aussi le déplacement des rives entre 1985 et 2010 et un rétrécissement local du chenal dans une partie aval de la rivière représentée ($w_{2010} < w_{1985}$). Pour l'estimation des zones actives « déplacement de rive », un seuil de déplacement est considéré afin de déterminer si un changement est significatif. Ce seuil est fonction de l'erreur maximale due au géoréférencement et à la vectorisation des rives. Comme deux lignes de rive sont comparées, un déplacement de rive est jugé significatif s'il est supérieur à deux fois l'erreur maximale soit ici 6 m. Un seuil différent est utilisé pour le calcul des zones actives « changement dans la largeur » puisque la largeur est mesurée indépendamment pour chacune des séries de photos. Pour ces calculs, une différence de largeur supérieure à 3 m est considérée comme significative.

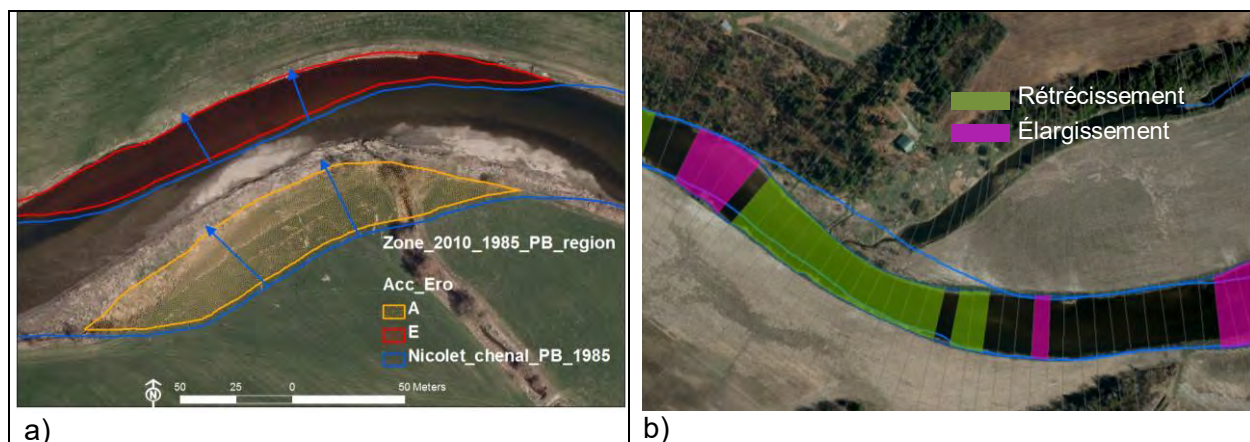


Figure 2.3 Exemples de a) zones actives « déplacement de rive » et b) zones actives « changement dans la largeur » de la rivière. Le trait bleu indique la position de rives en 1985 et les photos-aériennes de 2010 sont utilisées en arrière plan.

4.3 VARIABLES CLÉ AGISSANT SUR LES AJUSTEMENTS LOCAUX DE LA RIVIÈRE

Les variables agissant sur les ajustements fluviaux incluent les variables hydrologiques et variables reliées au contexte physiographique et sédimentologique, à la végétation riveraine et aux contraintes locales à la migration du chenal et au transfert sédimentaire.

4.3.1 Caractérisation hydrologique des rivières

La caractérisation hydrologique réalisée sur les données historiques de débit avait pour objectif l'identification d'indices hydrologiques permettant d'expliquer la variance des débits qui soient sensibles aux modifications climatiques. Les analyses détaillées des séries hydrologiques ont été réalisées sur la rivière Nicolet et sur ces sous-bassins. Les analyses hydrologiques de ces rivières incluent aussi celles des résultats de simulations pour la période de référence (1961-1990) et future (2041-2070). Pour la rivière De La Fourche, seul les indices hydrologiques identifiés comme importants ont été estimés à partir des séries historiques de débits.

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble des variables issues des séries historiques des débits de la Nicolet. Ceci a permis d'identifier les indices hydrologiques importants dans l'explication de la variance des débits. Cinq des 44 indices hydrologiques analysés ont été sélectionnés pour une étude détaillée des séries historiques et simulées à l'aide du modèle Hydrotel. Ces indices incluent des variables représentant la magnitude, la fréquence et la synchronisation des débits. Trois indicateurs hydrologiques de base ont été utilisés pour les besoins de la présente étude : la magnitude des débits maximum annuels, la fréquence des crues et la période d'occurrence des crues.

Un indicateur de la tendance temporelle des débits maximum a aussi été utilisé. Pour ce faire, nous avons utilisé le cumul dans le temps des différences de débit entre le maximum annuel des débits journaliers et la moyenne de l'ensemble de la série hydrologique. Les mêmes calculs ont été faits pour le débit moyen annuel. Le cumul permet d'identifier et de caractériser

les périodes hydrologiques en fonction de la persistance de leur tendance (décroissante, croissante ou stable) par rapport à l'ensemble de la période. Cette méthode basée sur le cumul des fluctuations dans une série temporelle a été préconisée par Kraus (1956) mais elle est peu utilisée de nos jours malgré son efficacité à révéler des tendances. Une séquence décroissante indique que les débits (maximums ou moyens) tendent à être en-dessous de la moyenne de l'ensemble de la période. Alors qu'une séquence croissante indique que les débits tendent à être au-dessus de la moyenne de la période. Cet indicateur permet aussi de bien visualiser la succession de cycles dans le régime hydrologique d'une rivière en lien entre autres avec les cycles climatiques. Il permet aussi de caractériser le régime hydrologique au cours d'une séquence de photos.

4.3.1.1 Rivière Nicolet

Données historiques observées

Nous avons analysé les données hydrologiques observées aux stations de jaugeage localisées sur la Nicolet, la Nicolet Sud-Ouest et la rivière Bulstrode, un tributaire important de la rivière Nicolet. Les données hydrologiques disponibles couvrent la période de 1967 à 2011 pour la rivière Nicolet, de 1923 à 2011 pour la Nicolet Sud-Ouest et de 1975 à 2011 pour la rivière Bulstrode. Il est à noter que l'unique station de jaugeage de la Nicolet est située en aval de la rivière Bulstrode. Le bassin de la Bulstrode représente 22% de l'aire du bassin de la Nicolet à cet endroit. Les débits mesurés à cette station sont par conséquent fortement affectés par l'hydrologie de ce sous-bassin. Par ailleurs, les débits de la Bulstrode sont influencés par la présence de barrages. Le barrage lié au réservoir Beaudet est le plus en aval sur cette rivière et a été mis en opération en 1979. Comme plus de 64% de la longueur de notre section d'étude se situe en amont de ce tributaire, il importe d'évaluer comment la réponse de cette station est affectée par la Bulstrode.

La comparaison des courbes de cumul des résidus pour les débits indique une divergence dans les tendances entre les cours d'eau pour la période 1985 à 1990 (figure 2.4). Les courbes de la Bulstrode et de la Nicolet sont relativement similaires malgré le fait que le maximum de la tendance croissante de la Bulstrode se produit une dizaine d'années avant celui de la Nicolet. Par contre, la courbe de la Nicolet Sud-Ouest montre une tendance ascendante très tôt dans la série suivie d'un plateau où les fluctuations sont mineures pendant une période de vingt cinq ans. À partir de 2000, les tendances décroissantes de la Nicolet et Nicolet Sud-Ouest sont en phase. Les différences entre les régimes de la Nicolet ou Nicolet Sud-Ouest sont surprenantes compte tenu de la similarité du contexte physiographique et des autres variables qui contrôlent les débits. Il est possible que le régime de la Nicolet soit en partie marqué par celui de la Bulstrode dont la contribution a pu être modifiée en lien avec la mise en opération du barrage Beaudet douze ans après le début des relevés hydrologiques de la station de jaugeage de la Nicolet.

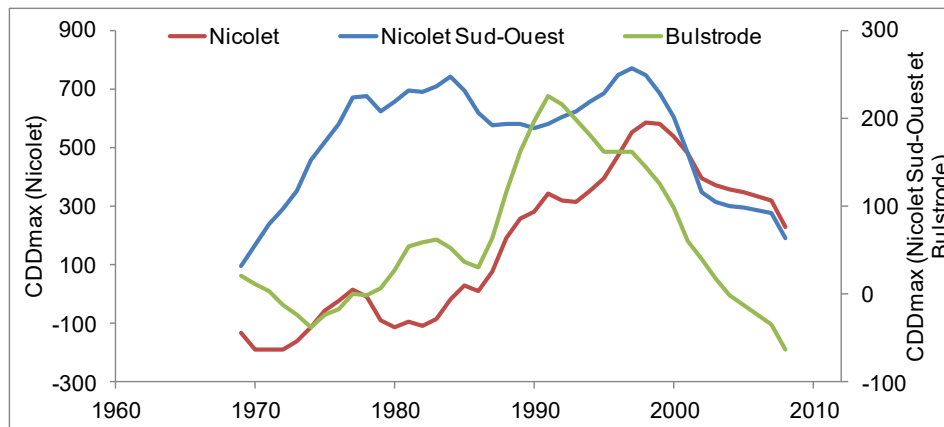


Figure 2.4 Comparaison des courbes de cumul des différences de débit maximum annuel pour les rivières Nicolet, Nicolet Sud-Ouest et Bulstrode (moyenne mobile 5ans).

Magnitude des débits maximum annuels et fréquence des crues

Compte tenu des problèmes de représentativité identifiés dans la série de débit de la station de la rivière Nicolet, les données de la rivière Nicolet Sud-Ouest sont utilisées ici pour caractériser l'hydrologie du secteur de rivière situé en amont de la rivière Bulstrode. Par ailleurs, les données de la station de la rivière Nicolet seront utilisées pour le secteur situé en aval de la rivière Bulstrode. À notre avis ceci permet d'établir un meilleur diagnostic des tendances hydrologiques passées. La série hydrologique de la station de la Nicolet Sud-Ouest offre aussi la possibilité de documenter les périodes antérieures à la période d'analyse.

Nous avons caractérisé la série hydrologique historique en tenant compte des dates des photos aériennes et en respectant un pas de temps constant pour les périodes afin de permettre l'application d'analyses statistiques appropriées. Dans le cas de la Nicolet et Nicolet Sud-Ouest, ce pas de temps est de 7 ans. Pour la Nicolet Sud-Ouest, la magnitude des débits maximum annuels (DH1) est significativement supérieure pour les périodes 1967-1973 et 1991-1997 par rapport à la période 1997-2003 (figure 2.5a). La période 1967-1973 est celle où la valeur de DH1 est la plus élevée et 1997-2003, la plus faible. Il n'y a pas de différence

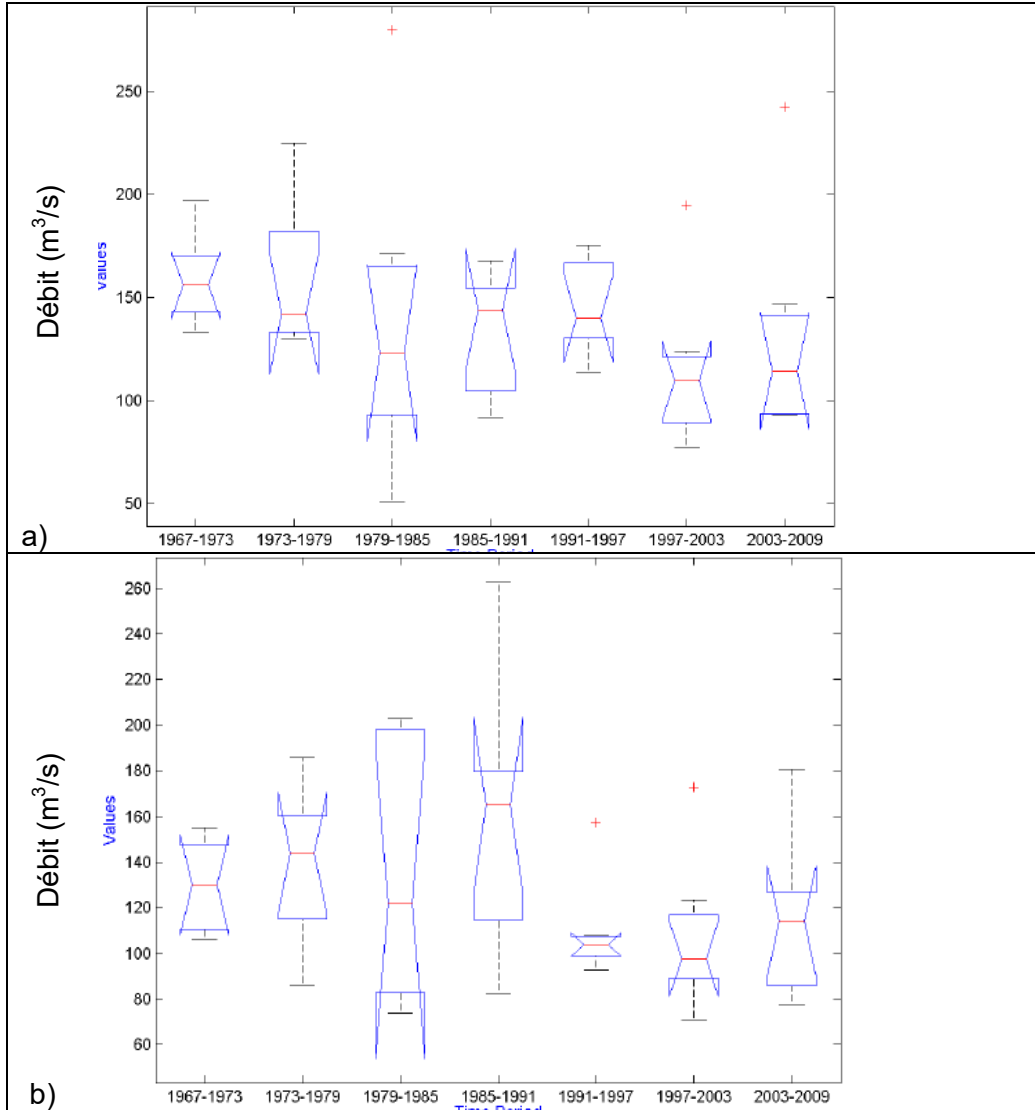


Figure 2.5 Magnitude des débits maximum annuels (DH1). a) rivière Nicolet Sud-ouest; b) rivière Nicolet.

significative dans la fréquence des crues entre les différentes périodes (tableau 2.1a). Par contre, la variabilité des débits est la plus grande pour les trois périodes comprises entre 1973 et 1991.

Pour la Nicolet, il n'y a pas de différence significative dans la magnitude des débits maximum annuels (DH1) entre les 7 périodes (figure 2.5b). Bien que les différences ne soient pas significatives, on perçoit des fluctuations cycliques. La période 1979-1985 est inférieure à la période précédente (1973-1979) alors que la période 1985-1991 est supérieure à la période qui la précède et à celle qui la suit. La variabilité des débits maximum au cours de cette période est très importante. La fréquence des crues est inférieure pour les périodes entre

1985 et 2003 (tableau 2.1b). Les deux périodes entre 1979 et 1991 présentent une très grande variabilité des débits par rapport à toutes les autres périodes.

Time Period	AVG	MAX	MIN	STD	VAR
1967-1973	16.3	22.0	8.0	5.5	30.6
1973-1979	14.3	21.0	7.0	5.1	26.2
1979-1985	13.7	20.0	11.0	3.1	9.9
1985-1991	13.6	23.0	6.0	5.7	32.6
1991-1997	16.4	20.0	13.0	2.6	6.6
1997-2003	15.0	23.0	6.0	5.7	32.3
2003-2009	17.9	24.0	13.0	3.9	15.1

a)

Time Period	AVG	MAX	MIN	STD	VAR
1967-1973	17.0	27.0	10.0	6.5	41.7
1973-1979	17.0	27.0	11.0	5.5	30.3
1979-1985	17.7	26.0	14.0	4.5	20.6
1985-1991	14.7	21.0	6.0	5.2	26.6
1991-1997	16.0	18.0	13.0	1.8	3.3
1997-2003	14.4	24.0	9.0	5.0	24.6
2003-2009	18.6	24.0	12.0	3.6	13.3

b)

Tableau 2.1 Fréquence des crues (supérieure au 75^e percentile). a) rivière Nicolet Sud-Ouest; b) rivière Nicolet.

Tendance historique : cumul des différences des débits maximum

Le CDDmax de la rivière Nicolet Sud-Ouest indique qu'au cours de la période de 1970 à 1985, les débits maximum tendent à être supérieurs à la moyenne historique (Figure 2.6a). De 1985 à 1990, les débits maximum sont près de la moyenne. Une courte période de fort débit maximum ($Q_{max} > \text{moyenne}$) est enregistrée entre 1990 et 1997. Finalement la période la plus récente entre 1997 à 2010 indique que les débits tendent à être inférieurs à la moyenne.

La courbe CDDmax de la Nicolet montre que pour le secteur aval de la rivière Bulstrode, la période de 1970 à 1979 est dominée par des débits supérieurs à la moyenne (figure 2.6b). De 1979 à 1985, les débits maximum sont inférieurs ou équivalents à la moyenne. La période de 1985 à 1997 est dominée par des débits maximum supérieurs à la moyenne. Enfin, la période récente est marquée par de faibles débits maximum. Il y a une divergence entre la tendance pour les débits moyens et celle pour les débits maximum. Cette divergence n'est pas identifiable dans la série de la Nicolet Sud-Ouest (figure 2.6). La courbe CDDmoy de la Nicolet est similaire à celle de la Nicolet Sud-Ouest. Cette analyse fait ressortir des cycles clairs dans le régime hydrologique.

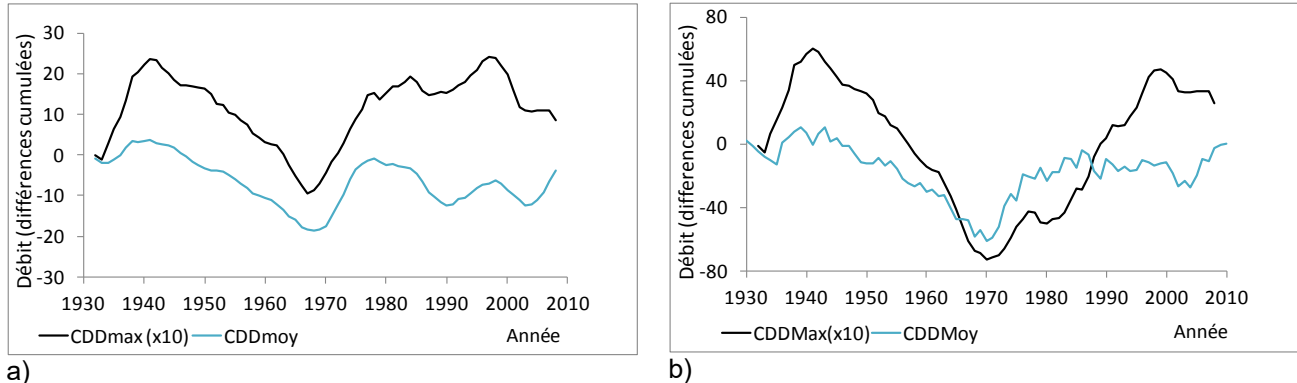


Figure 2.6 Cumul des différences de débit journalier maximum et moyen annuel (moyenne mobile 5 ans). a) Nicolet Sud-Ouest; b) Nicolet. La courbe de la Nicolet Sud-Ouest est utilisée pour représenté la Nicolet en amont de la rivière Bulstrode.

Simulations hydrologiques

Les simulations hydrologiques ont été réalisées au Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Le logiciel Hydrotel a été utilisé pour modéliser les débits de la période de référence (1961-1990) et ceux de la période future (2041-2070). Hydrotel est un modèle spatialement distribué qui permet d'inclure le type de sol, l'élévation et l'occupation du sol. Le calage du modèle a été fait sur la période de 1990-1999 et validé sur les périodes de 1971 à 1989 et de 2000 à 2009.

Les séries climatiques quotidiennes pour la période de référence et la période future ont servi à alimenter le modèle hydrologique Hydrotel et à produire les séries hydrologiques pour le bassin de la rivière Nicolet. Le MRCC (Modèle Climatique Régionale Canadien) et quatre simulations : acu, adl agw et agx ont été utilisées pour produire les scénarios climatiques (précipitations et températures) pour la période de 2041-2070 (tableau 2.2). La mise à l'échelle des données climatiques a été faite à l'aide de trois techniques : « daily scaling », « daily translation » et « scaling translation ». Les données climatiques observées et simulées ont été interpolées spatialement sur la grille du CEHQ et sur celle du NLWIS (The National Land and Water Information Service). Ouranos a fourni les données climatiques utilisées.

La comparaison des données hydrologiques observées à la station de la rivière Nicolet à celles simulées à partir des données climatiques pour le même emplacement et la période de référence de 1961-1990, indique que les débits maximum observés sont supérieurs aux débits maximum simulés sur la grille CEHQ (figure 2.7). La différence moyenne est de 46%. Ce biais amène une sous-estimation de cet indice pour la période future et contamine les résultats des indices liés à la fréquence des crues supérieures au niveau plein bord défini à partir des données historiques. Un biais entre les données simulées et observées est aussi présent pour d'autres indicateurs hydrologiques. (Ou *et al.*, 2012).

Simulations	Version du MRCC	Domaine	Pilote	Membre	Scénario GES
acu	4.1.1	Quebec	CGCM3	4	A2
adl	4.2.0	North America	CGCM3	5	A2
agw	4.2.3	North America	CRMN-CM3.3	1	A1B
agx	4.2.3	North America	ECHAM5	1	A2

Tableau 2.2 Détails des simulations climatiques du MRCC

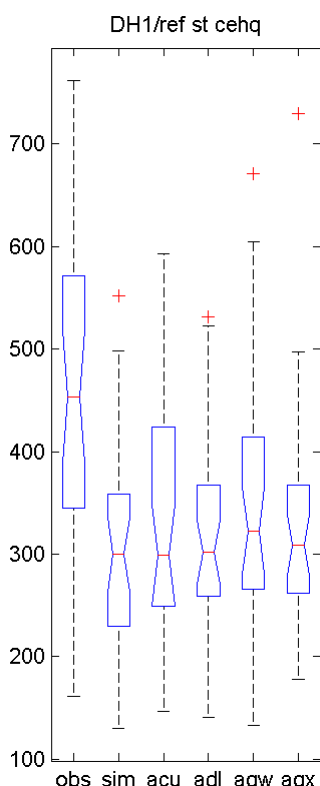


Figure 2.7 Comparaison de l'indicateur DH1 (débit maximum annuel journalier) calculées pour les données observées (obs) et simulées (sim) pour la période de référence. Les données obtenues à l'aide de la grille CEHQ et de la méthode de mise à l'échelle « scaling translation » (st) sont représentées.

Les scénarios hydrologiques disponibles pour la période 2041 à 2070 ne permettent pas de représenter le contexte temporel des crues puisque nous ne disposons pas de séries temporelles des débits. Ceci ne nous permet donc pas de créer des courbes de tendance du type CDDmax. Ces deux éléments limitent donc l'utilisation des simulations hydrologiques dans un contexte de projection des ajustements de rivière pour la période 2041-2070.

4.3.1.2 Rivière De La Fourche

Il n'y a aucune station de jaugeage sur la rivière De La Fourche. Par conséquent l'analyse historique des débits porte sur les données hydrologiques de la station la plus près soit celle de la rivière Du Sud (à St-Raphaël). La station de la rivière Du Sud est située à environ 24 km en aval de la confluence de la rivière De La Fourche. Cette station est influencée quotidiennement par un barrage situé immédiatement en amont de la station. Le barrage a été construit en 1958. Il est entendu qu'il existe des différences dans le comportement hydrologique des deux bassins versants compte tenu entre autres de la présence du barrage sur la rivière Du Sud et de la plus petite taille du bassin De La Fourche (aire du bassin de la rivière De La Fourche: 170 km² vs 821 km²). L'analyse présentée ici vise en premier lieu à caractériser de façon globale les périodes hydrologiques qui devraient être relativement similaires sur les deux bassins. La série hydrologique analysée couvre la période de 1923 à 2012 soit 90 ans.

Magnitude des débits maximum annuels, fréquence et synchronisme des crues

La moyenne des débits maximum annuels de la rivière Du Sud est de 251 m³/s sur la période de 1923 à 2012. Il y a toutefois une forte variabilité autour de cette valeur. La figure 2.8 montre l'amplitude et la variabilité des débits maximum pour des classes de 7 ans. Cette figure montre que la médiane des débits des périodes 1933-1937 et 1973-1977 est nettement plus élevée que la moyenne. Ces périodes représentent donc celles où le potentiel d'érosion est maximal. Dans les deux cas, ces périodes suivent une période où les débits maximum étaient près ou inférieurs à la moyenne. Le débit maximum au cours des trois périodes d'analyse des photos aériennes est de 405 m³/s pour la période de 1964-1980, de 458 m³/s pour la période de 1980-1994 et de 313 m³/s pour la période de 1994 à 2010.

L'analyse des données hydrologiques montre que le nombre et la période d'occurrence des fortes crues ont varié depuis 1923 (figure 2.8). Au cours des périodes 1923-1940 et 1994-2010, les débits journaliers sont fréquemment supérieurs à la crue de 2 ans en dehors de la période de crue printanière. 32% des fortes crues sont des événements qui se sont produits entre juin et décembre. Au cours des autres périodes, les forts débits sont observés très majoritairement lors de la crue printanière avec seulement quelques événements au cours de l'été ou l'automne.

Tendance historique : cumul des différences de débits maximum

Au cours de l'ensemble de la période d'observation des changements morphologiques de la rivière, 1964 et 2010, l'intervalle 1970-1986 correspond à une phase où les débits maximum et moyen sont supérieurs à la moyenne historique (figure 2.9). Cette phase est suivie d'une période (1986 à 1996) où les débits sont maintenus à des valeurs équivalentes à la moyenne. De 1996 à 2001, les débits sont sous la moyenne. Après 2001, les débits maximum et moyens redeviennent supérieurs à la moyenne. La courbe cumulée des différences de débits moyens (CDDmoy) suit celle des débits maximum mais avec des oscillations de moindre ampleur.

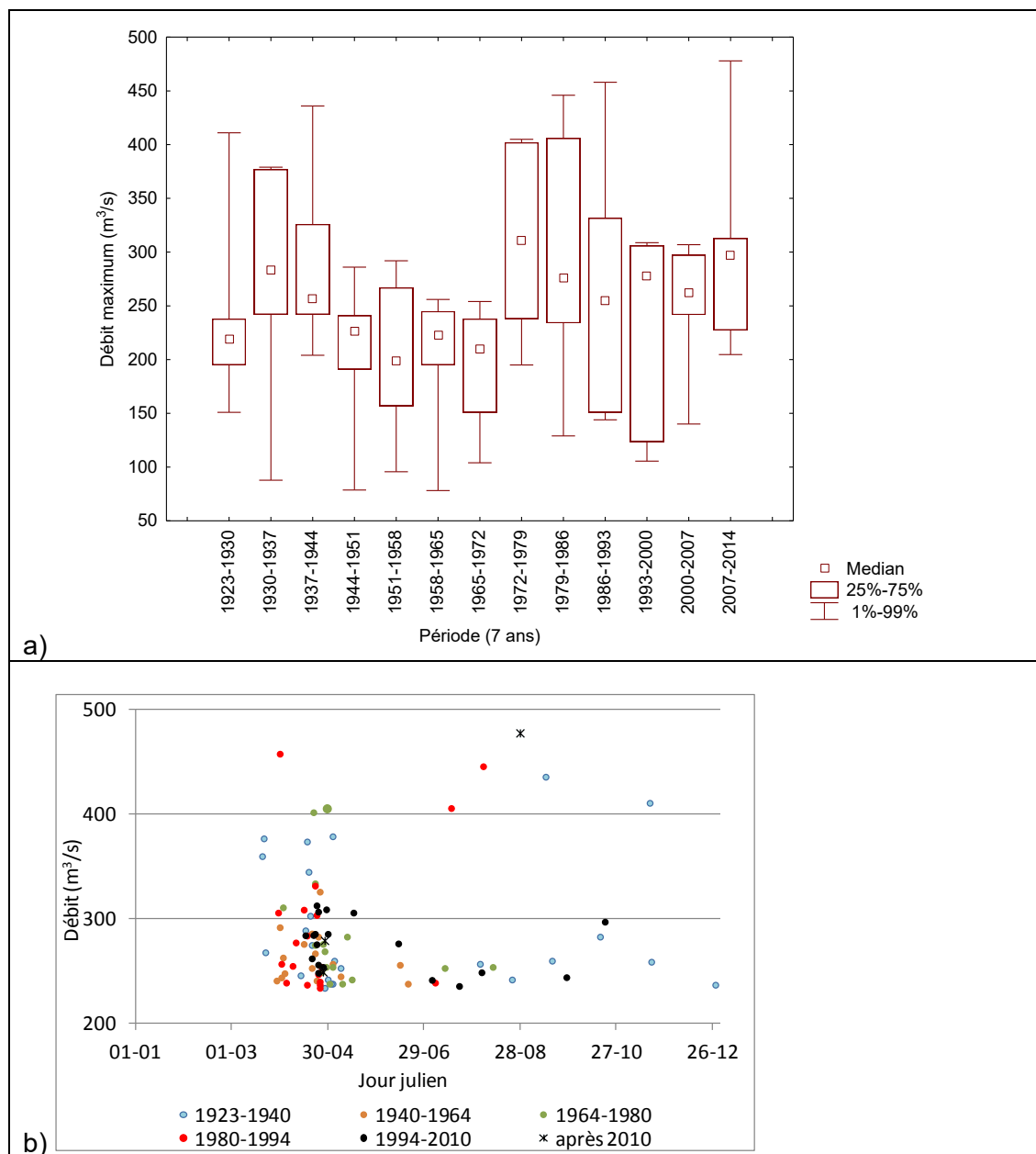


Figure 2.8 a) Diagramme des percentiles des débits maximum annuels par période de 7 ans; b) Date d'occurrence des crues supérieures à la crue 2 ans par période. Rivière Du Sud (utilisée pour la rivière De La Fourche).

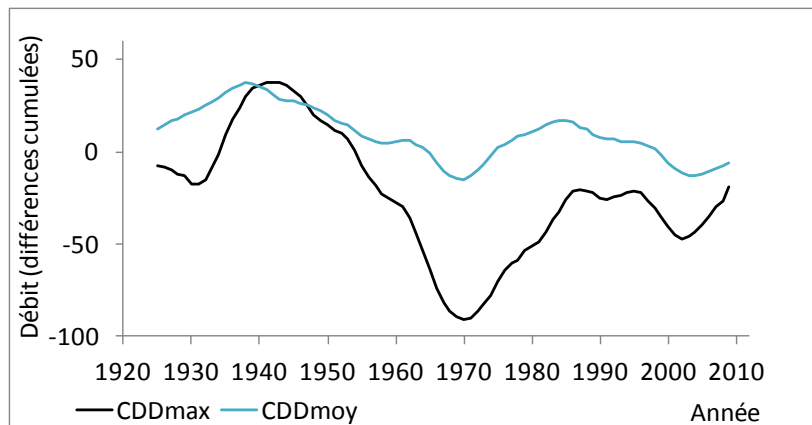


Figure 2.9 Cumul des différences de débit maximum annuel et des différences de débit moyen annuel (moyenne mobile 5 ans). Rivière Du Sud (utilisée pour la rivière De La Fourche).

4.3.2 Contexte physiographique et sédimentaire des sections de rivière étudiées

4.3.2.1 Rivière Nicolet

Sédimentologie

Le fond de la vallée est constitué principalement de dépôts fluviaux. Les sédiments des berges sont majoritairement des sables fins et des limons. Dans la portion amont de la rivière, les versants de la vallée sont composés d'alluvions anciens, de dépôts fluvio-glaciaires (contact de glace) ou de sable. Dans la portion aval de la section d'étude (secteur de la rivière Bulstrode) la rivière est incisée et la vallée est généralement plus étroite qu'en amont. Les versants de la vallée se composent de till, de sables, d'alluvions anciens et d'argile (figure 2.10).

Zones de contrainte

La roche en place affleure à différents endroits le long de la section d'étude. Ces zones représentent des niveaux de base locaux qui contraignent l'ajustement vertical de la rivière et influencent l'accumulation sédimentaire et l'amplitude des ajustements possibles en amont. Les ponts et les enrochements sont des zones de contrainte latérale de la rivière.

Sources sédimentaires

Trois tributaires importants rejoignent la rivière la rivière Nicolet : les rivières Des Pins, Des Rosiers et Bulstrode. Il est à noter qu'une partie de la charge sédimentaire de la Bulstrode est possiblement stockée dans le réservoir Beaudet en amont du barrage du même nom à Victoriaville. La charge sédimentaire de la rivière Des Rosiers a été particulièrement importante dans les années 1950 à 1964 à la suite de la linéarisation de son chenal. Les rives de la rivière et la vallée constituent une importante source de sédiments fins (sables et limons). Les zones de contacts entre la rivière et les hauts talus sont des points d'entrée importants de sédiments dans le système.

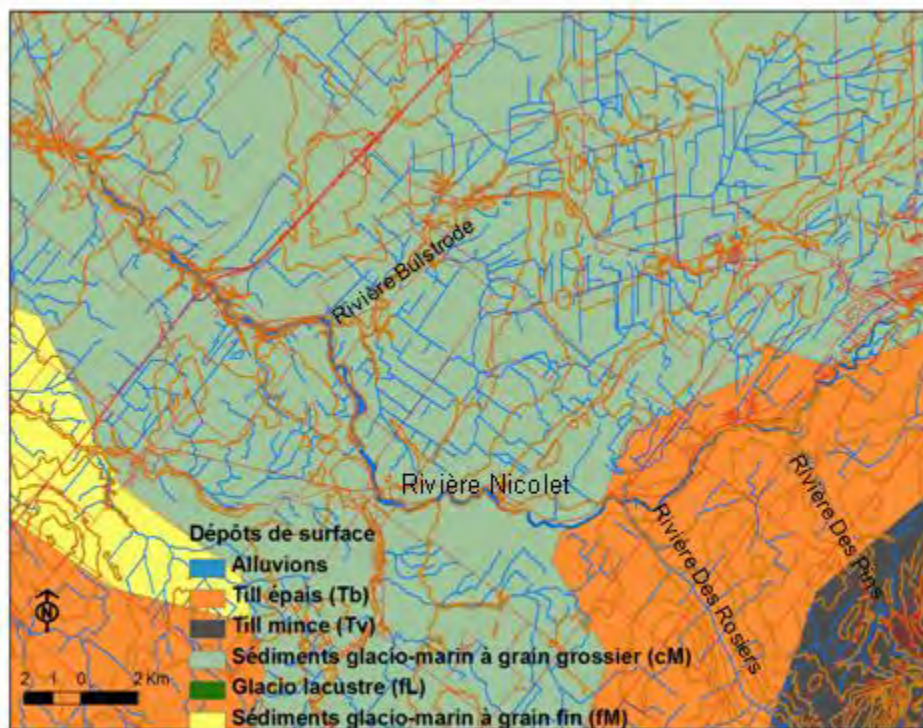


Figure 2.10 Dépôts de surface (source : Commission géologique du Canada), région de la rivière Nicolet. Les courbes de niveau au 10 m sont représentées.

4.3.2.2 Rivière De La Fourche

Le tracé de la vallée est influencé par la position d'un front morainique et par la présence de kames. Les bifurcations marquées dans la direction d'écoulement de la rivière sont imposés par ces formes glaciaires et fluvio-glaciaires. Ces points de contrainte jouent un rôle marqué dans la portion amont de la section d'étude (figure 2.11).

Sédimentologie

Le fond de la vallée est constitué principalement de dépôts fluviaux (figure 2.11). Des dépôts fluvio-glaciaires, principalement des sédiments d'épandage, composent les versants de la vallée. La rivière est en contact avec ces dépôts à quelques endroits. Ces zones de contact sont d'importantes sources de sédiments hétérogènes pour la rivière.

Zones de contrainte

La roche en place, l'asymétrie de la hauteur des rives et les interventions anthropiques (stabilisation de berge, ponts) exercent un contrôle sur la dynamique des ajustements de la rivière De La Fourche. Pour cette rivière, ces éléments agissent sur le parcours de la rivière, le continuum sédimentaire et la continuité des patrons fluviaux qu'on retrouve dans la vallée. Ces éléments de contrainte imposent soit une forte bifurcation de la rivière ou soit une modification rapide de la dynamique hydraulique de la rivière ce qui entraîne souvent une rupture dans le continuum sédimentaire. Ils représentent des points de stabilité dans la rivière en amont ou en aval desquels des ajustements morphologiques pourront être amplifiés.

Sources sédimentaires

Les sources sédimentaires proviennent de l'érosion des rives, des bancs d'accumulation intra- et extra-chenal et des nombreux tributaires. Dix-sept tributaires (d'ordre 1 ou 2) rejoignent la rivière le long de son parcours dans la zone d'étude (figure 2.11). Ces tributaires contribuent localement à la charge sédimentaire de la rivière. Les flèches rouges sur la figure 2.11 montrent l'emplacement des sources majeures de sédiments stockés dans les hauts talus aux limites de la zone de migration de la rivière. Les bancs d'accumulation extra-chenal et les terrasses sont des dépôts qui sont mobilisables lorsque la rivière modifie son parcours.

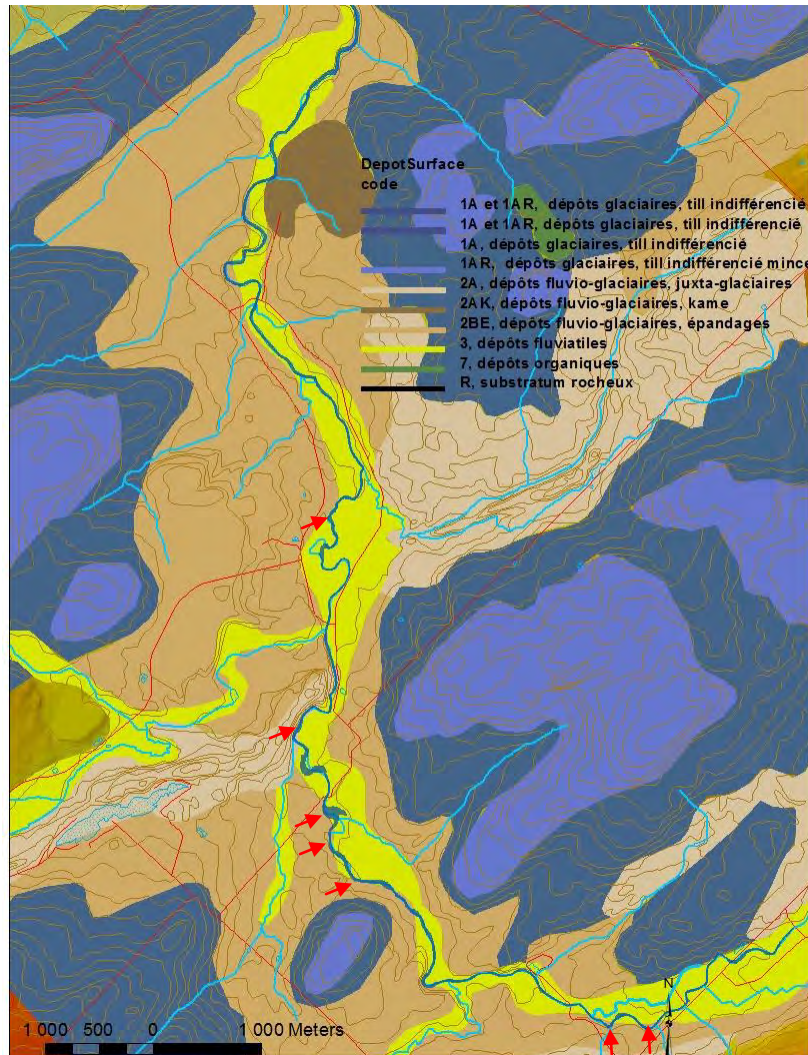


Figure 2.11 Dépôts de surface dans la section d'étude, Rivière De La Fourche. Les flèches rouges identifient quelques unes des sources majeures de sédiments dans les terrasses de la vallée. Les courbes de niveau au 10 m sont aussi représentées.

4.4 MISE EN PLACE DE L'OUTIL D'ANALYSE

Nous avons créé un outil d'analyse permettant de suivre les changements morphologiques de la rivière dans l'espace et dans le temps. Les unités de base de l'outil d'analyse sont les polygones d'analyse (figure 2.12). Le fractionnement de la section d'étude en polygones permet de représenter et d'intégrer spatialement l'information et de suivre par la suite les changements morphologiques de la rivière dans l'espace et dans le temps. Ce fractionnement est effectué à partir du tracé récent (2010) de la ligne centrale de la rivière. Pour cette étude, la longueur moyenne des polygones est de 20 m. Dans le cas de la rivière De La Fourche, la largeur des polygones est de 130 m de part et d'autre de la ligne centrale de la rivière pour une largeur totale de 260 m (figure 2.12). Cette largeur a été déterminée en fonction du déplacement maximal de la rivière au cours de la période d'observation (1964-2010). Dans le cas de la Nicolet, la dimension latérale de la grille autour de la ligne centrale de la rivière correspond à 2 fois la largeur maximale de la rivière soit une largeur totale à 500 m (figure 2.12).

Les polygones d'analyse sont utilisés pour extraire les informations provenant de l'analyse des photos aériennes et des cartes de diverses sources. Ainsi, pour chacun des polygones, les informations primaires tel que la largeur de la rivière, l'aire du chenal, la présence et l'aire des bancs d'accumulation, la présence de végétation, le type de sédiments, etc. sont compilées.

L'approche des polygones permet la représentation de l'ensemble des données sous forme graphique comme une série spatiale. Elle permet aussi d'estimer des données de deuxième niveau tel que les changements locaux dans l'aire des bancs d'accumulation, les zones de rétrécissement et élargissement du chenal d'une couverture de photos-aériennes à une autre et les zones de surdimensionnement et de sous-dimensionnement de la rivière.

Du fait que plusieurs variables caractérisent chacun des polygones, cette représentation rend possible la mise en relation des variables et l'identification de celles contribuant à expliquer le patron spatio-temporel des changements dans la rivière. Le tableau 2.3 énumère les indicateurs morphologiques utilisés dans les analyses.

Indicateurs morphologiques	
Largeur du chenal et Écart de la largeur du chenal (= différence entre la largeur locale et la largeur attendue selon la tendance de la sous-section)	⇒ Surdimensionnement et sous-dimensionnement local du chenal
Zones actives : Changement de largeur	⇒ Rétrécissement et élargissement du chenal d'une période à l'autre
Zones actives : déplacement de rive	⇒ Aire des zones actives (érosion et accumulation)
Bancs d'accumulation	⇒ Aire des bancs ⇒ Ratio de l'aire des bancs / aire du chenal
Persistance : zones actives et présence de bancs	⇒ Aire moyenne zones actives ou bancs

Tableau 2.3 Indicateurs morphologiques de la rivière

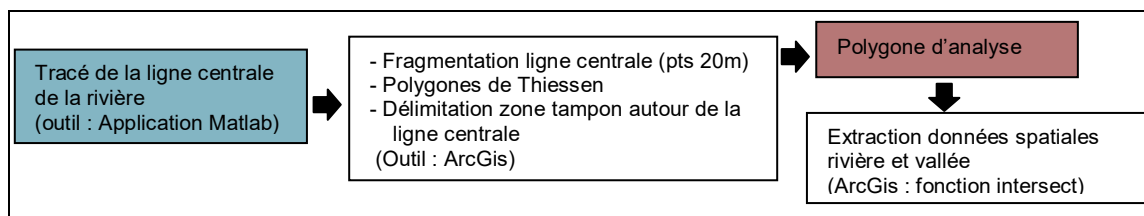
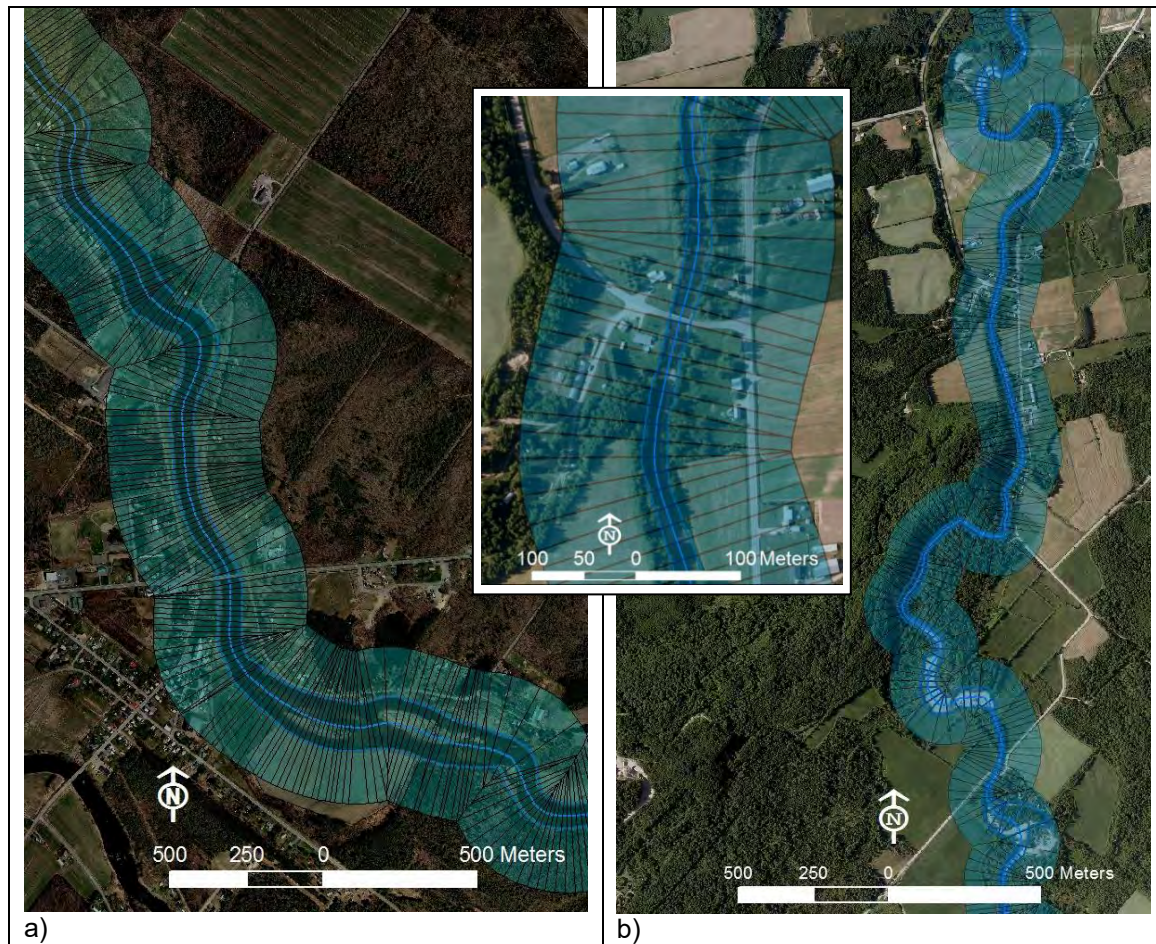


Figure 2.12 Polygones d'analyse a) exemple Nicolet b) exemple rivière De La Fourche

5 RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous présenterons les ajustements spatio-temporels de la morphologie en plan du chenal et les déplacements des berges observés sur les deux rivières (Nicolet et De La Fourche) pour les périodes couvertes par les photos aériennes. Nous identifierons d'une part le rôle des fluctuations des débits et de la charge sédimentaire sur les ajustements morphologiques. Nous tenterons d'autre part d'expliquer la variabilité spatiale des patrons d'ajustement observés en analysant les effets de différents éléments du paysage qui agissent sur le continuum sédimentaire et qui pourraient favoriser localement une amplification des ajustements.

Il importe de préciser que la composante verticale n'est pas directement analysée dans le cadre de cette étude puisque ces données sont inexistantes pour les deux rivières. Certains indicateurs tels que la disparition des îles peuvent toutefois permettre de présumer qu'il y a eu incision du chenal en lien avec la réduction de la largeur locale de la rivière. Aussi, en l'absence de mesures topographiques directes, la charge sédimentaire disponible dans la rivière est représentée par la superficie des bancs d'accumulation au début de la période couverte par une paire de couvertures aériennes. Ainsi, les changements temporels dans la charge sédimentaire sont donnés par la comparaison dans les superficies des bancs entre le début et la fin d'une période.

5.1 PROCESSUS D'AJUSTEMENT MORPHOLOGIQUES DES RIVES ET DE LA RIVIÈRE

Les processus fluviaux d'ajustements morphologiques observés dans les rivières étudiées sont très variés. Le processus dominant dans les zones actives est l'érosion fluviale des rives associée au couplage érosion-accumulation résultant ou non en un déplacement des méandres et en une modification de la largeur du chenal. Des processus d'incision du chenal principal et de remplissage des chenaux secondaires qui accompagnent la disparition d'îles végétalisées sont aussi observés. Ces processus entraînent une réduction locale de la largeur de la rivière. Des coupures de méandres et des processus de glissement de berges sont aussi répertoriés sur la rivière De La Fourche et la Nicolet respectivement. L'identification des processus responsables des ajustements de rivière est importante pour estimer la probabilité d'occurrence de ces processus en fonction des aléas hydro-climatiques, de la durée possible des périodes d'ajustement et des risques pour les rives. L'ampleur des ajustements est variable selon les processus, les périodes hydrologiques et sédimentaires et selon les contraintes locales aux ajustements.

Les figure 2.13 et figure 2.14 localisent les secteurs où les processus spécifiques d'ajustement ont été observés sur les rivières Nicolet et De La Fourche. Dans la section amont de la Nicolet, les processus fluviaux d'ajustements dominant alors qu'en aval, ces processus sont souvent accompagnés de glissement des sédiments de berges. Les glissements anciens des berges sont responsables de la formation initiale de certaines îles centrales que l'on retrouve en aval de la rivière Bulstrode dans les zones fortement surdimensionnées. Des processus d'accumulation et d'érosion autour de ces îles contribuent à l'évolution des rives dans ces zones.

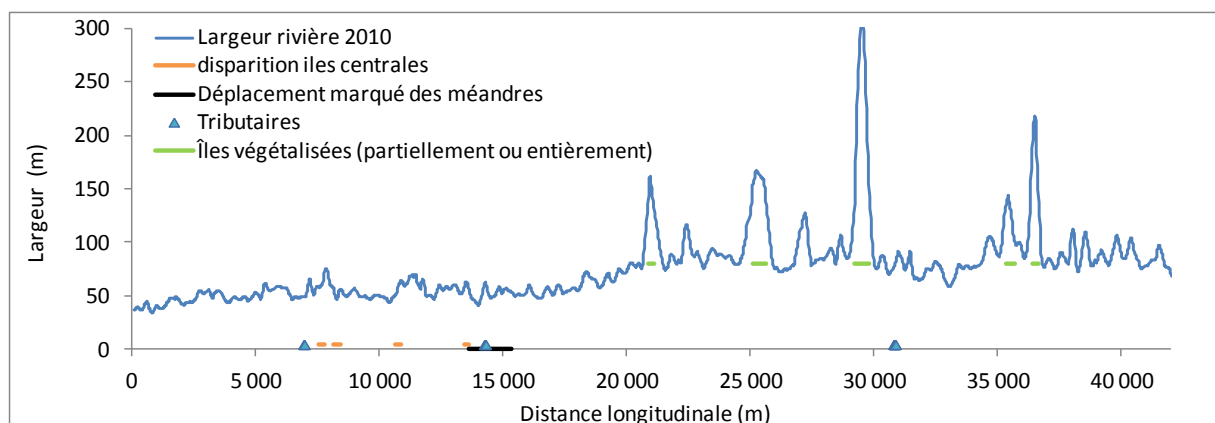


Figure 2.13 Localisation des sites d'occurrence des différents processus majeurs d'ajustement observés sur la rivière Nicolet. Les principaux tributaires et les îles centrales végétalisées sont aussi indiqués.

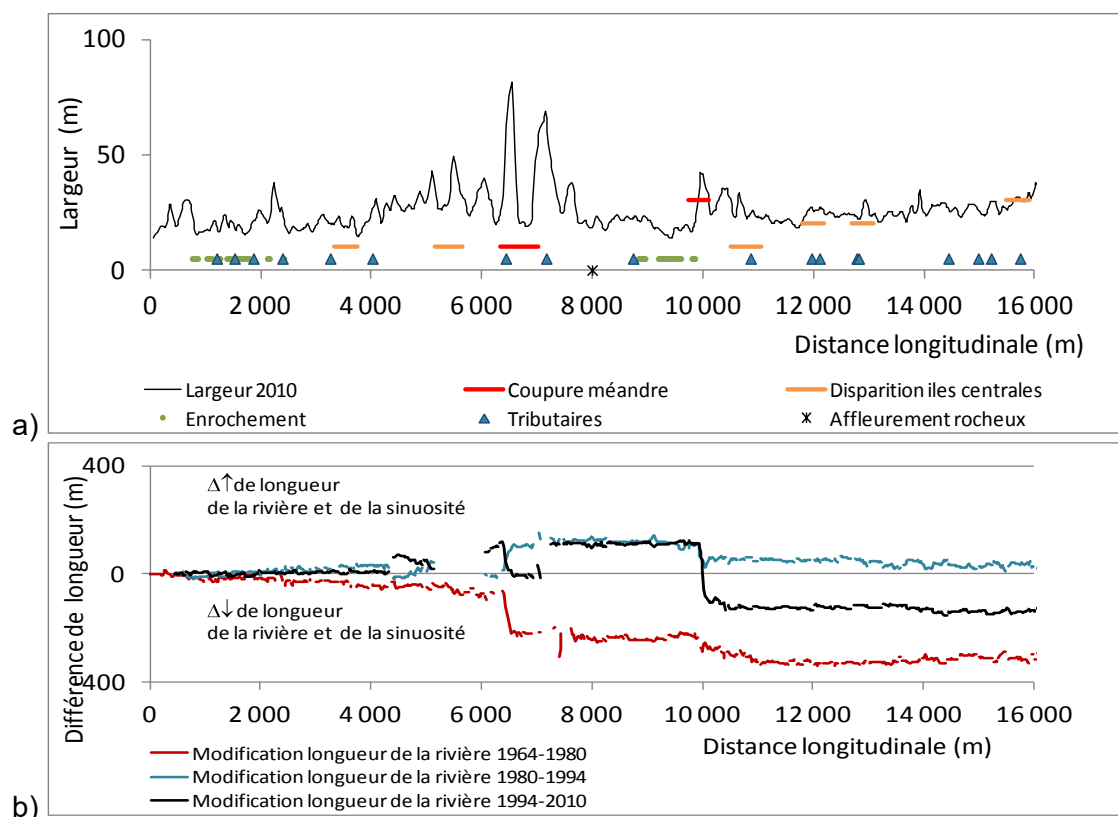


Figure 2.14 a) Localisation des sites d'occurrence des différents processus majeurs d'ajustement observés sur la rivière De La Fourche. La position des sites sur l'axe vertical réfère à la période à laquelle le processus s'est produit. Plus le trait est haut sur l'axe, plus il s'est produit tardivement. Les contraintes à la migration et les tributaires sont aussi localisés. b) Changement dans la longueur de la rivière pour les trois périodes d'observation.

Pour la rivière De La Fourche, les six zones avec îles centrales ont disparu au cours de la période d'analyse (figure 2.14). Ces îles étaient localisées tout au long de la rivière et étaient étroitement liées à la présence de tributaires. Les zones de coupure de méandre se retrouvent dans deux contextes distincts. Par conséquent, ces mécanismes d'ajustement peuvent être favorisés par une combinaison différente des variables clés.

Les sections qui suivent présentent les différents processus.

5.1.1 *Couplage accumulation sédimentaire et érosion des rives*

L'association entre l'accumulation sédimentaire le long d'une rive et l'érosion en rive opposée est un processus observé dans les différents secteurs où il y a progression vers l'aval des boucles de méandre. Les figures 2.15a et b montrent un exemple de ce couplage où l'on voit que les bancs d'accumulation le long d'une rive favorisent l'avancement progressif de la berge

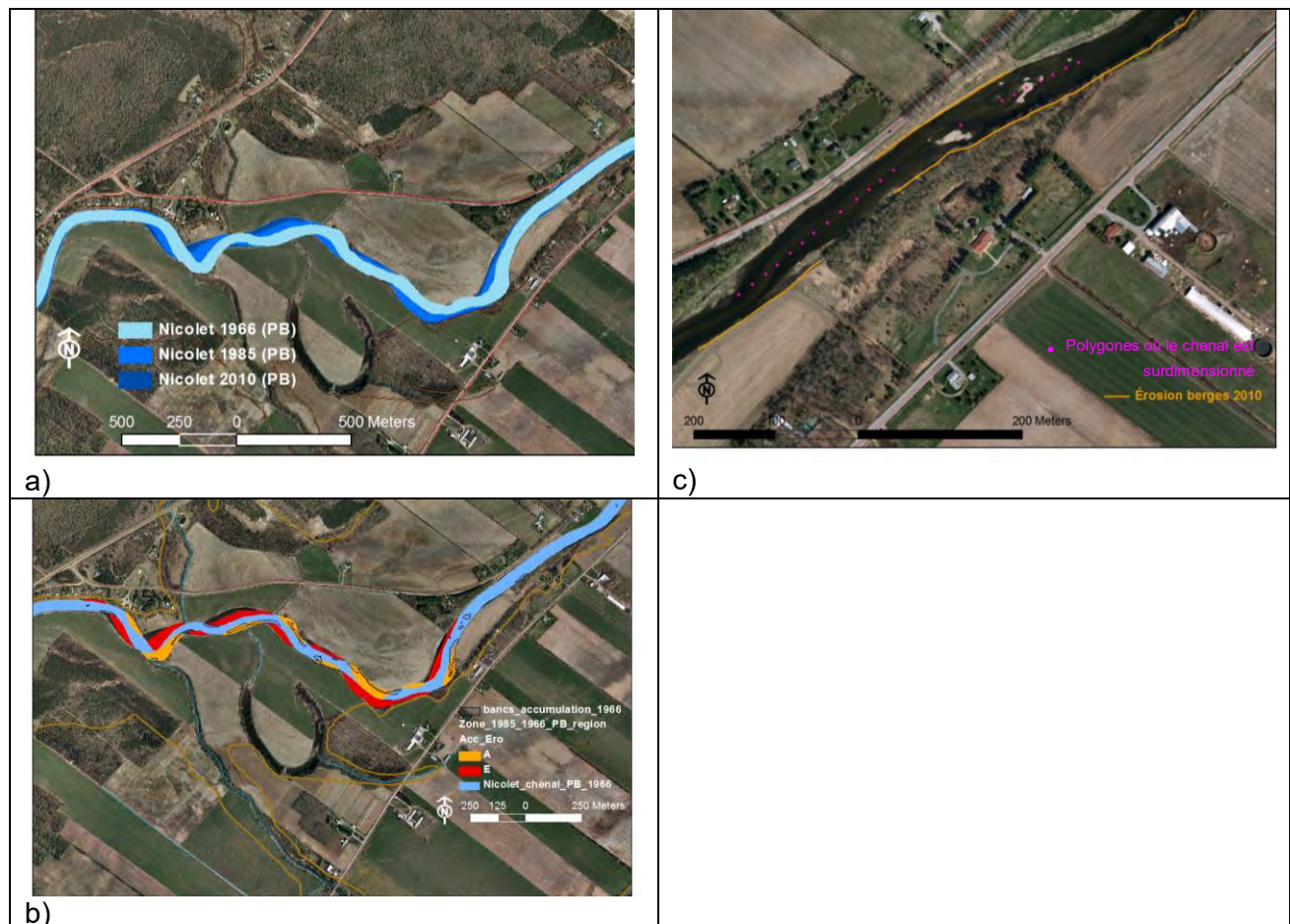


Figure 2.15 a) Migration latérale et longitudinale des méandres dans la zone la plus active de la rivière Nicolet (1966 et 2010); b) couplage bancs d'accumulation et érosion des rives dans les zones à méandres; c) couplage bancs d'accumulation et érosion des rives observée dans une zone rectiligne surdimensionnée.

et l'érosion graduelle en rive opposée. Ces processus en association avec les méandres sont observés principalement en amont de la zone étudiée de la Nicolet et à différents endroits le long de la rivière De La Fourche. Ce couplage est aussi observé dans les sections surdimensionnées des rivières souvent en lien avec la présence de dépôts à la confluence des tributaires ou d'autres sources sédimentaires (figure 2.15c). Ces relations seront précisées plus loin dans ce chapitre. Le taux moyen de déplacement longitudinal des méandres est d'environ 4 m/an dans les secteurs les plus actifs. Le taux de déplacement latéral des rives se situe autour de 2 m/an dans ces mêmes secteurs.

5.1.2 Incision du chenal principal et remplissage des chenaux secondaires

La figure 2.16 illustre la transformation des secteurs avec îles centrales et chenaux multiples vers un chenal unique. Pour la rivière De La Fourche, la disparition des secteurs avec îles végétalisées s'est faite en trois phases de l'amont vers l'aval. Au cours de la première phase, entre 1964-1980, les trois secteurs en amont du km 12 sont disparus (figure 2.14). Ce sont par la suite les îles des secteurs entre le km 12 et 14 qui sont disparues. Finalement, les îles du secteur le plus en aval ont été intégrées à la rive au cours de la période 1994-2010. La réduction locale de la largeur de la rivière est en moyenne de 65 % en amont et 30% en aval. La progression aval des ajustements souligne que la période de forts débits maximum entre 1964 et 1980 a joué un rôle important pour initier une série de changements. Les ajustements subséquents ont pu découler de ces premières modifications. Dans certains secteurs, notamment ceux situés à proximité des routes, il est probable que les aménagements aient contribué à l'incision du chenal. La disparition de ces îles signifie que la largeur plein bord du chenal est réduite localement.

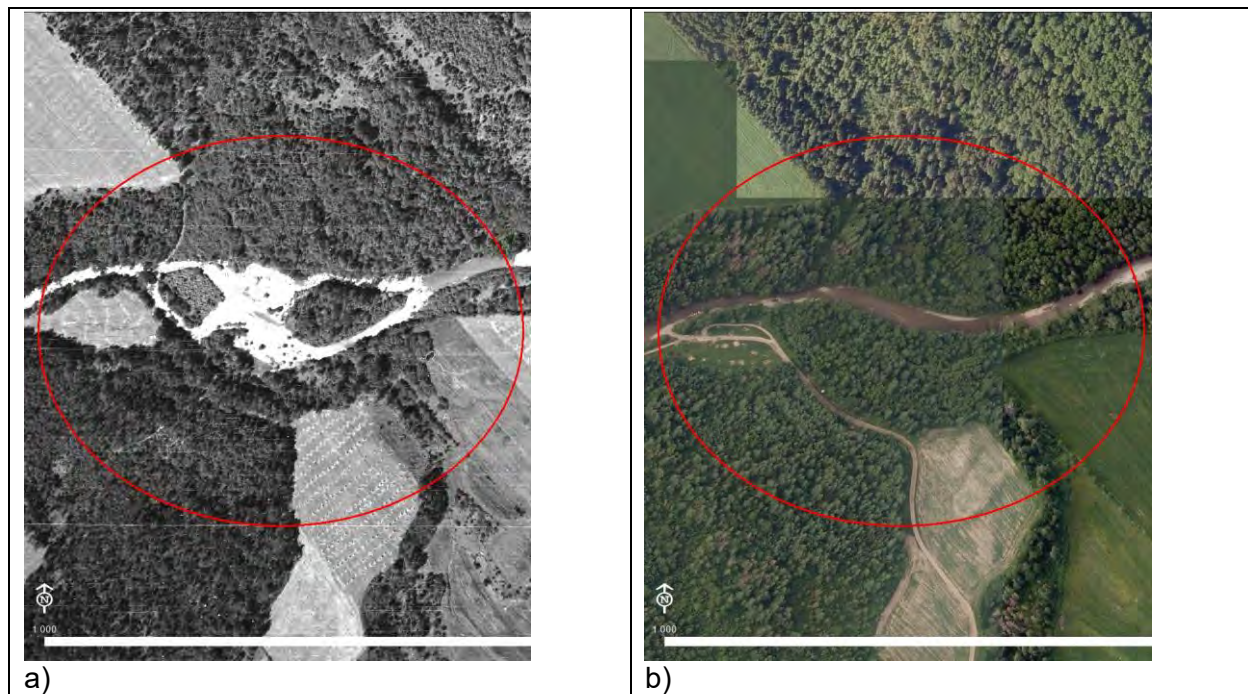


Figure 2.16 a) Secteur avec îles centrales en 1964 et b) même secteur en 2010

5.1.3 Coupures de méandre

Deux secteurs de coupures de méandre sont répertoriés sur la rivière De La Fourche à trois périodes différentes (figure 2.14 et figure 2.17). Les deux premières périodes de coupure de méandre ont eu lieu dans le secteur central de la rivière (km 6 à km 8) entre 1936 et 1964 et 1964 et 1980 (figure 2.17a et b). Le déplacement latéral de la rivière dans ce secteur est favorisé par la forte disponibilité des sédiments intra- et extra-chenal, les rives peu élevées et par les contraintes physiques liées à la présence de pont et de seuil rocheux. Le rôle de ces contraintes sera discuté dans les chapitres qui suivent. Dans ce secteur, des déplacements latéraux du chenal de 50 m à 95 m ont pu être mesurés dans les zones les plus actives. Le ratio d'occupation des bancs dans le chenal et l'orientation de ceux-ci au début de la période fournissent des indications sur les processus qui peuvent affecter les cours d'eau en fonction des conditions hydrologiques à venir.

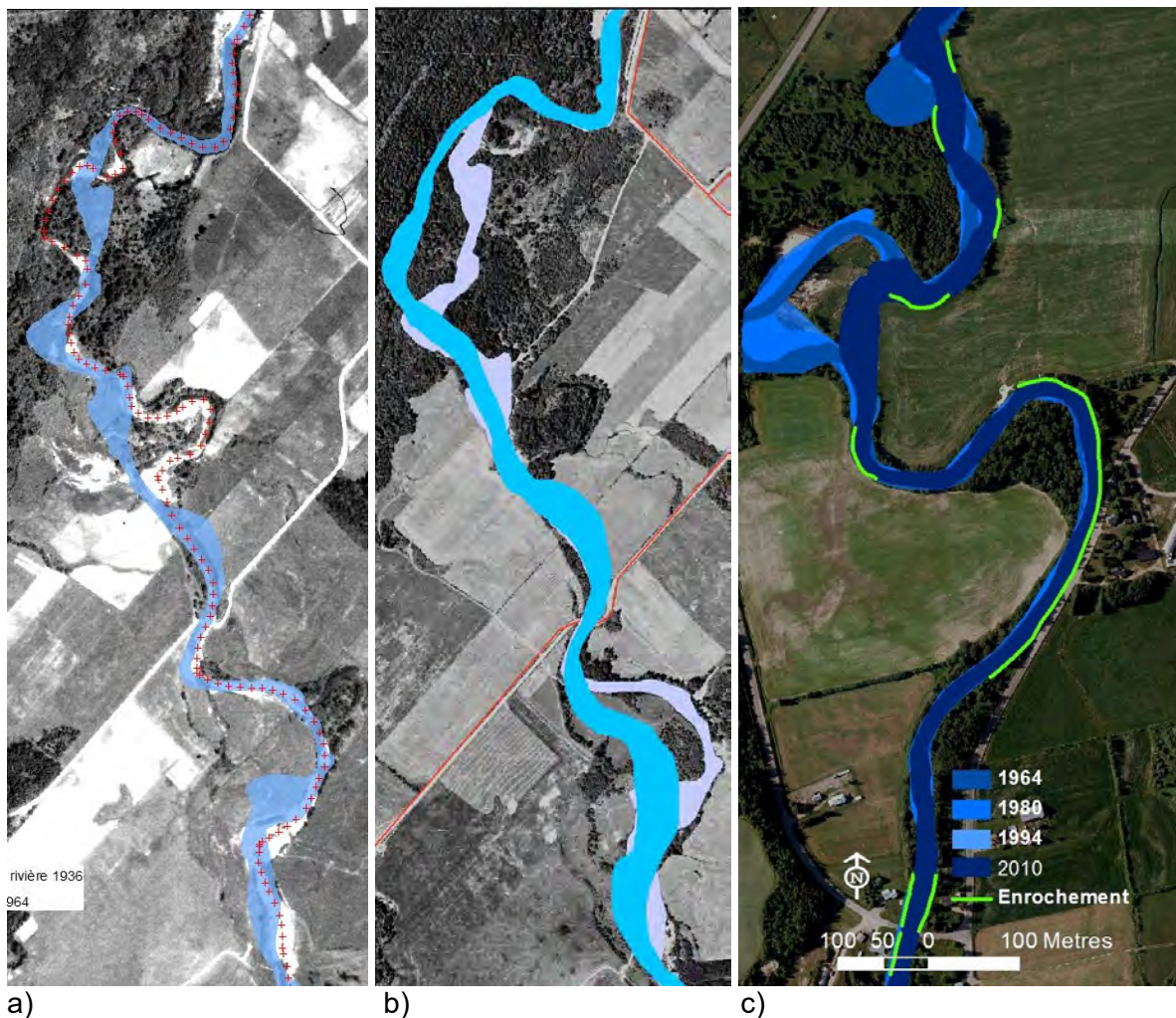


Figure 2.17 Cas de coupures de méandre sur la rivière De La Fourche a) secteur km 6 à km 8, période 1936-1964; b) secteur km 6 à km 8, période 1964-1980; c) secteur km 10 à km 11, période 1994-2010.

Le second secteur de coupure est localisé au km 10 à l'aval une longue zone stabilisée et en amont de trois secteurs marquées par la disparition d'île centrale et par l'incision probable de la rivière dans les années précédentes (figure 2.17c). Ces éléments ont probablement favorisé la coupure du méandre. Dans ce secteur, le suivi temporel du déplacement de l'axe de la boucle du méandre indiquait par ailleurs une tendance du cours d'eau à migrer et à changer son cours. La longueur maximale des segments coupés est respectivement de 150 m et 200 m pour le premier et le second secteur.

5.2 AJUSTEMENTS MORPHOLOGIQUES PASSÉS DE LA RIVIÈRE ET DE SES RIVES : VARIABILITÉ TEMPORELLE ET RÔLE DES DÉBITS

Afin d'évaluer l'ampleur des changements morphologiques, nous examinons les variations dans les superficies occupées par les bancs d'accumulation dans le chenal et dans l'amplitude et la direction des ajustements dans les zones actives marquées par le déplacement des berges et par des changements de la largeur de la rivière. Ces indicateurs d'intérêt figurent au premier plan des analyses en lien avec les variations du régime hydrologique. Les courbes de cumul des différences des débits maximum (CDDmax) seront utilisées pour caractériser les tendances hydrologiques de la période où les ajustements morphologiques sont mesurés. La courbe CDDmax permet de bien cerner l'ensemble des conditions hydrologiques morphogènes qui ont prévalu au cours de la période constituée de deux couvertures de photos aériennes.

5.2.1 Superficies des bancs d'accumulation $\Rightarrow$ rôle des débits

L'aire totale des bancs d'accumulation fournit un aperçu de la relation entre la capacité de transport et les apports sédimentaires. Cette variable représente une estimation de la quantité de sédiments disponibles dans la rivière à un temps donné. Le suivi dans le temps de cette variable permet de caractériser la disponibilité sédimentaire en fonction des caractéristiques hydrologiques.

Les superficies pondérées des bancs (aire totale des bancs pondérée par la longueur de la section en km) sont similaires pour les deux rivières à l'étude (figure 2.18). Dans le cas de la rivière De La Fourche, il y a une forte présence de bancs en 1964 (figure 2.18b). Cette forte présence de sédiments dans la rivière peut s'expliquer par le fait qu'aucune crue mobilisante n'a été enregistrée au cours des 3 années qui ont précédé la prise de photos et que pour les 10 années précédentes la fréquence d'occurrence de ces crues a aussi été faible (figure 2.18c). Contrairement aux autres périodes, la valeur observée en 1964 semble ainsi une condition relique d'une période plus énergique. Si on exclue cette donnée, les fluctuations dans l'aire totale des bancs d'accumulation dans les chenaux des deux rivières indiquent qu'il y a augmentation des sédiments présents dans la rivière sous forme de bancs dans les périodes où CDDmax est plus grand que la moyenne. Les plus faibles superficies sont observées au cours de la période où les débits maximum tendent à être inférieurs à la moyenne. Dans les périodes où les débits maximum sont près de la moyenne (cas de la rivière de La Fourche entre 1980 et 1994), il y a un maintien de la superficie des bancs.

Si la superficie pondérée des bancs est similaire pour les deux rivières, leur hauteur moyenne est très différente. Des relevés de terrain ont montré que dans le cas de la rivière De La Fourche, les bancs ont souvent une hauteur équivalente à celle de la rive. Par conséquent,

leur rôle sur l'écoulement est perceptible à tous les débits et il est très marqué. Les bancs contribuent fortement à dynamiser le système de méandre en accélérant le processus de déplacement latéral des rives. Cette situation diffère grandement du cas de la Nicolet où les bancs sont de plus faible hauteur et influencent l'écoulement principalement lors des débits faibles et modérés.

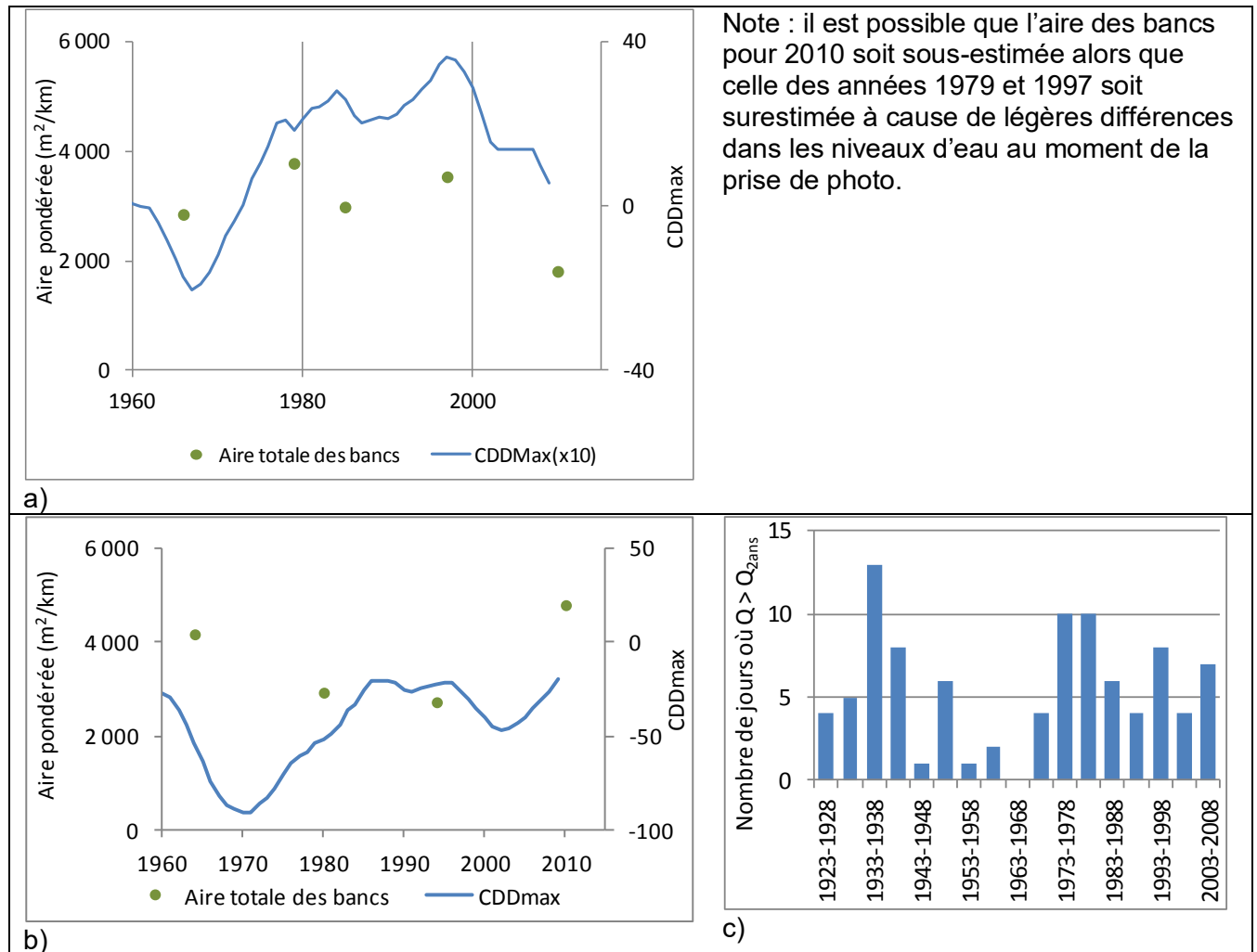


Figure 2.18 Superficie pondérée des bancs pour chaque série de photos aériennes en relation avec la période hydrologique représenté par le cumul des différences de débit maximum. a) pour la Nicolet (section couverte par toutes les photos uniquement); b) pour la rivière De La Fourche (courbe CDDmax : rivière du Sud); c) Nombre de jours où le débit est supérieur au débit de récurrence 2 ans à la station de la rivière du Sud.

5.2.2 Zones actives « déplacement des rives » et le rôle des débits

La compilation des aires des zones actives montre que dans le cas de la rivière Nicolet, il y a dominance de l'érosion au cours de la période marquée par des débits maximum supérieurs à

la moyenne et qu'il y a quasi-équilibre entre les aires en érosion et celles en accumulation pour la période où la tendance est mixte (figure 2.19a et b). La superficie totale des aires actives est aussi plus élevée pour la période la plus dynamique (1966-1985).

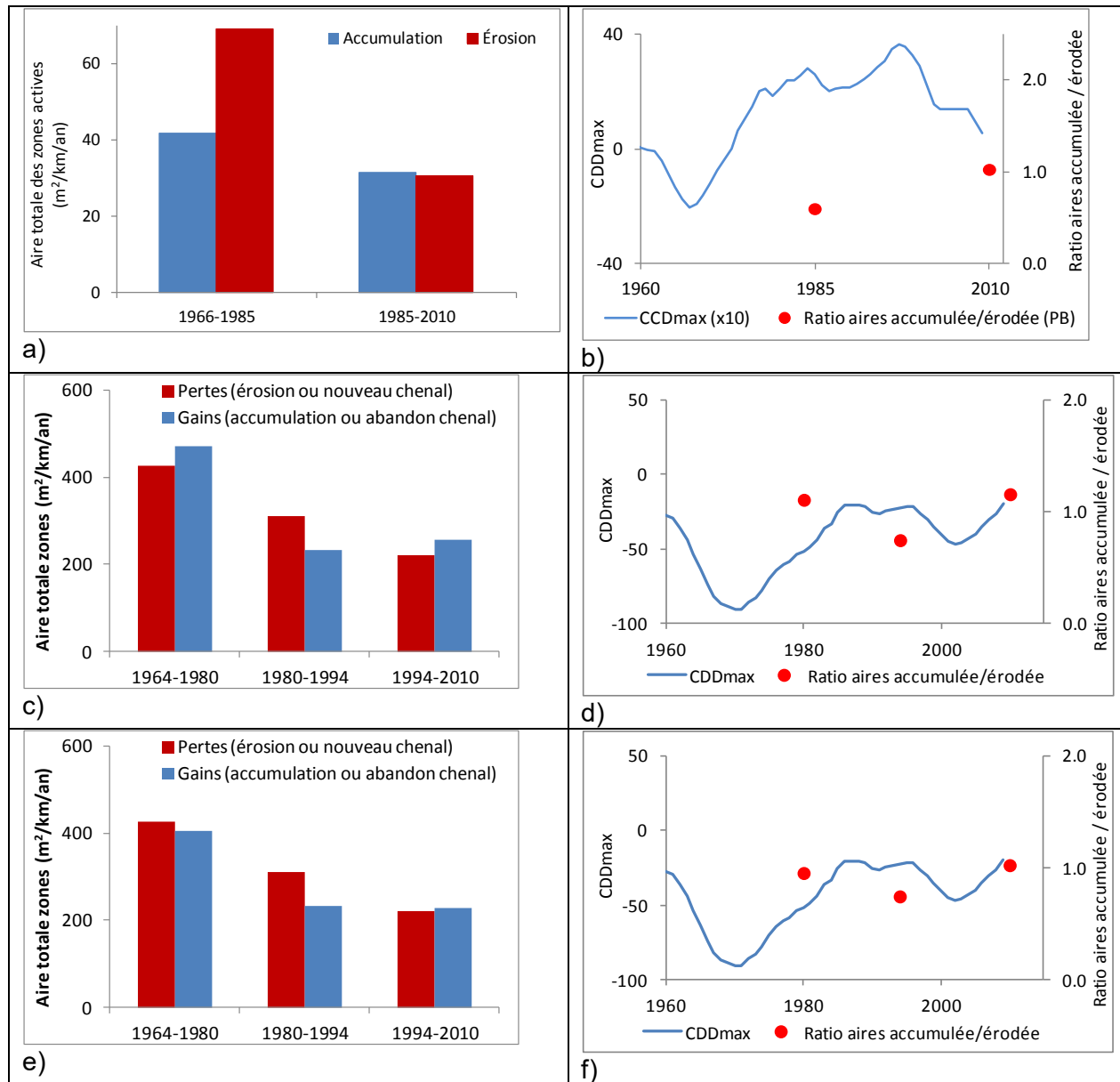


Figure 2.19 Aire totale pondérée des zones d'accumulation et des zones d'érosion et ratio des aires accumulées/ aires érodées en relation avec le courbe CDDmax. a) et b) Nicolet; c) et d) rivière De La Fourche; e) et f) rivière De La Fourche sans les aires « gains » liées aux coupures de méandre (périodes 1964-1980 et 1994-2010).

La relation entre le débit et les aires des zones actives est plus complexe pour le cas de la rivière De La Fourche (figure 2.19c et d). La création d'un nouveau chenal lors des coupures de méandre s'ajoute aux aires en érosion le long des rives, tandis que le chenal abandonné contribue aux surfaces en accumulation. Les coupures de méandre ont eu lieu au cours des périodes 1964-1980 et 1994-2010. Pour ces deux périodes, il y a dominance des « gains » sur les « pertes » puisque le nouveau chenal est généralement plus court et moins large que le chenal abandonné. Les figure 2.19e et f montrent les résultats obtenus si on exclut les zones associées à ces processus. On note alors une faible dominance des aires « pertes » sur les aires « gains » pour la période de 1964-1980 et une tendance à l'équilibre pour la période de 1994-2010.

5.2.3 Zones actives « changement dans la largeur du chenal » et le rôle des débits

Pour les deux rivières étudiées, les relations vont dans le même sens et indiquent que la période de plus fort débits se traduit par un élargissement global de la rivière et donc par une augmentation de l'érosion des rives (figure 2.20 et figure 2.21). Ainsi pour la Nicolet, le nombre de polygones où l'on observe un élargissement du chenal est 1.3 fois plus élevé que le nombre de polygones où il y a un rétrécissement au cours de la période 1966 à 1985. Ce ratio (0.7) s'inverse à la période suivante où les débits maximum sont généralement inférieurs à la moyenne.

Pour la rivière De La Fourche, il y a 2.6 fois plus de polygones avec élargissement qu'avec rétrécissement au cours de la période 1964 à 1980 où les débits maximum sont supérieurs à la moyenne (figure 2.21). Ce ratio s'établit à 1.3 entre 1980 et 1994 et se stabilise près de 1 (0.9) entre 1994 et 2010. Ces résultats montrent une relation générale entre les caractéristiques hydrologiques des périodes, les processus dominants et leur effet sur la morphologie du chenal. Cette relation est un résultat important de notre étude. Les résultats obtenus pour la période 1994 à 2010 indiquent que même si les débits maximum tendent à être supérieurs à la moyenne depuis 2003, l'ajustement de la largeur du chenal ne semble pas complété. L'impact le plus direct des ajustements à cette modification récente des débits est d'abord observé dans l'augmentation des superficies occupées par les bancs (figure 2.18). Si la tendance dans les débits se poursuit, il est possible qu'il y ait davantage de zones en élargissement notamment dans les sections de rivières où les bancs sont présents et où les berges sont érodables.

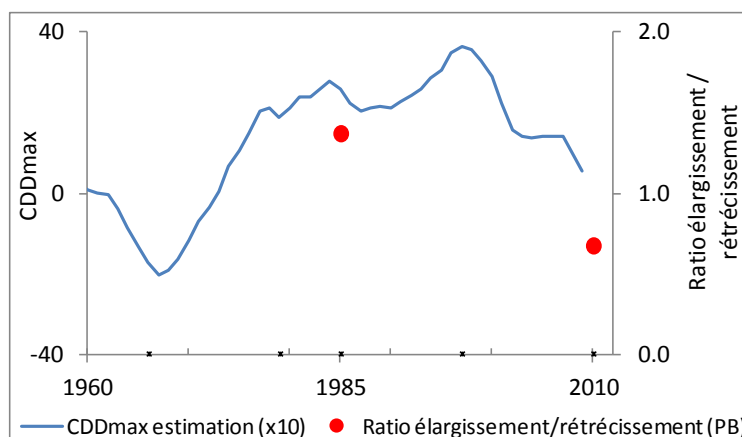


Figure 2.20 Relation entre le cumul des différences de débit maximum (CDDMax) et le ratio du nombre de polygones avec élargissement/rétrécissement du chenal pour la Nicolet.

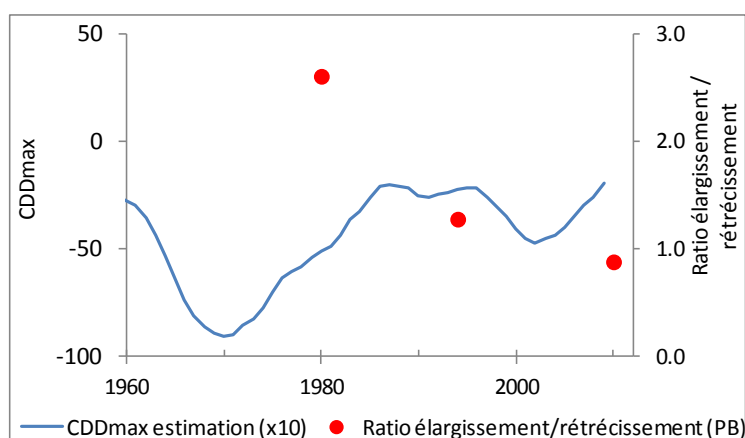


Figure 2.21 Relation entre le cumul des différences de débit maximum (CDDMax) et le ratio du nombre de polygones avec élargissement/rétrécissement du chenal pour la rivière De La Fourche

5.3 AJUSTEMENTS MORPHOLOGIQUES PASSÉS DE LA RIVIÈRE ET DE SES RIVES : VARIABILITÉ SPATIALE ET RÔLE DES CONTRAINTES ET DES APPORTS SÉDIMENTAIRES

5.3.1 Rivière De La Fourche

5.3.1.1 Variabilité longitudinale de la largeur de la rivière et de la vallée

Les variations longitudinales de la largeur de la rivière sont importantes du point de vue de l'identification des zones à risque d'érosion des rives car elles nous renseignent sur la distribution des zones sous-dimensionnées ou surdimensionnées par rapport à la tendance moyenne du tronçon. Le sous- et surdimensionnement est défini ici à partir des écarts entre la largeur locale de la rivière et la largeur moyenne attendue en fonction de la position le long de la rivière. La largeur moyenne attendue est estimée par l'équation de la droite de régression

reliant la largeur et la distance longitudinale par sous-section: de 0 au km 4, du km 4 au km 8 et du km 8 au km 17. Pour la rivière De La Fourche, les tendances dans la largeur sont calculées pour trois sous-sections. Les limites de ces sous-sections ont été identifiées à partir des séries longitudinales de la largeur. Ces limites correspondent à des changements majeurs dans le contexte sédimentaire ou topographique et/ou à l'entrée d'un tributaire important.

Les zones de sous-dimensionnement local peuvent correspondre à des contraintes à la migration latérale (en lien avec la présence d'enrochement ou de sédiments consolidés par exemple) ou à une zone de transit sédimentaire. En contrepartie, les zones surdimensionnées peuvent coïncider avec des zones d'ajustement rapide de la rivière en lien avec la confluence d'un tributaire, la présence d'un méandre ou l'augmentation locale des apports sédimentaires. Les zones où le surdimensionnement est important favorisent l'accumulation et agissent comme des zones de « respiration » de la rivière c'est-à-dire qu'elles offrent des conditions propices au largage des sédiments lorsque la charge sédimentaire provenant de l'amont est trop forte par rapport à la capacité de transport. Elles servent de réservoir à sédiments lorsque la capacité de transport est supérieure à la charge en transport.

Pour la rivière De la Fourche, les fluctuations dans la largeur du chenal sont fréquentes et localement de grande ampleur (figure 2.22). La rivière est significativement plus large dans la section comprise entre le km 4 et le km 8 qu'en amont ou en aval. Cette modification marquée dans la largeur correspond à l'entrée d'un tributaire important (augmentation de 44% de l'aire de drainage) au km 4 et à une zone d'élargissement de la vallée et de réduction de sa pente (5.5 km et 8 km). Cette zone est dominée par d'importants dépôts sédimentaires (figure 2.23) intra et extra-chenal. En contrepartie, les sections où les berges sont fortement stabilisées (secteur entre le km 1 et le km 2) sont sous-dimensionnées. Dans ce type de section, les fluctuations locales de la largeur sont aussi réduites par rapport aux zones ayant peu ou pas de stabilisation.

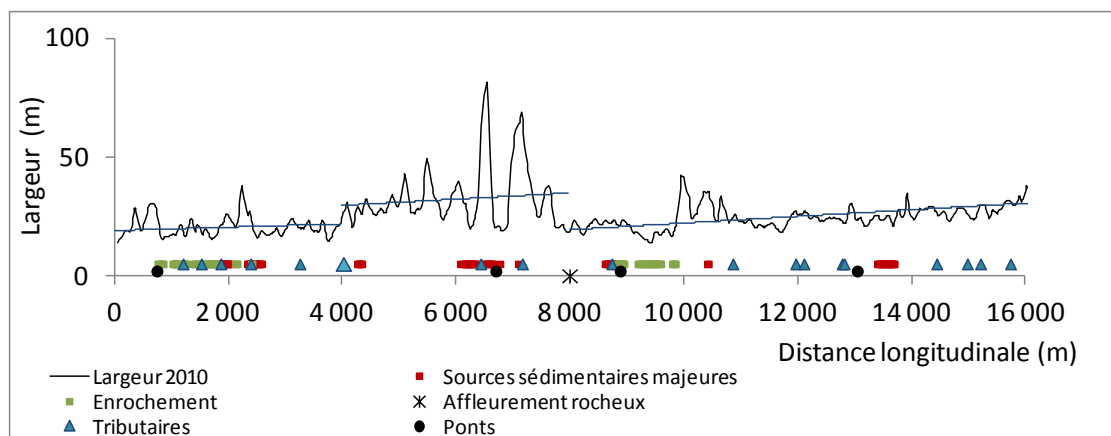


Figure 2.22 Variations longitudinales de la largeur de la rivière De La Fourche en 2010. La position des différentes caractéristiques physiques du milieu est indiquée. Le trait bleu indique la tendance moyenne de la largeur par sous sections.

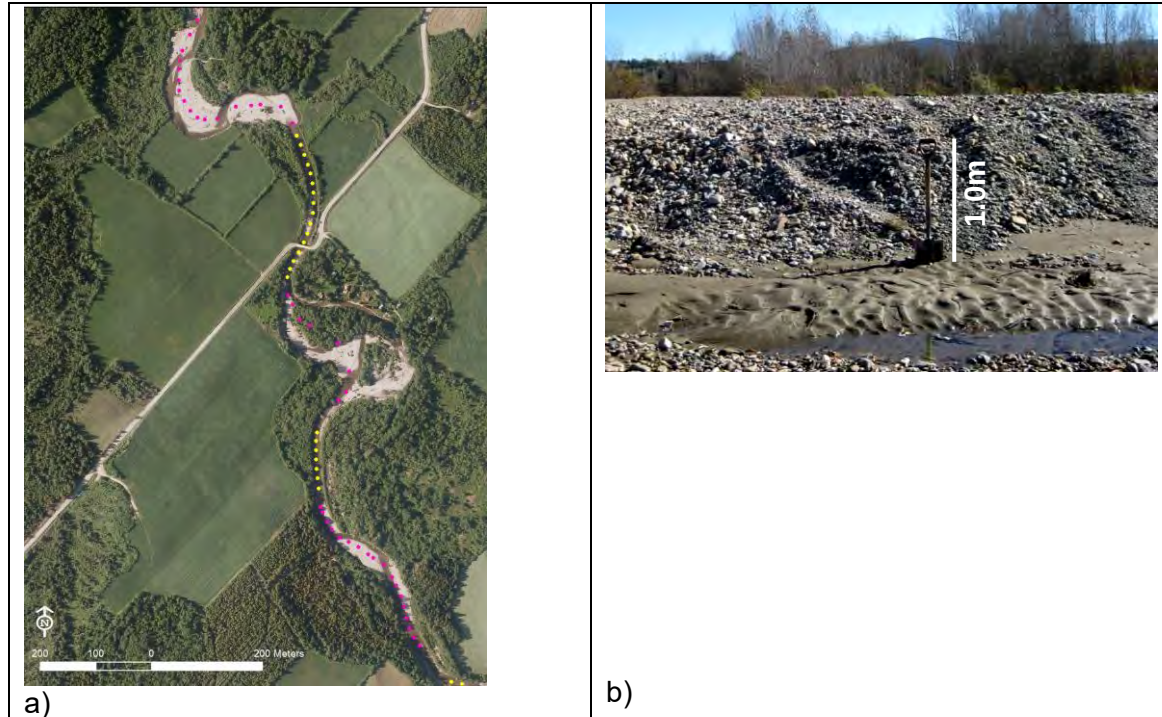


Figure 2.23 a) Zone de surdimensionnement (en fuchsia) dans la section comprise entre le km 4 et le km 8, rivière De La Fourche; b) Vue de la hauteur des bancs d'accumulation.

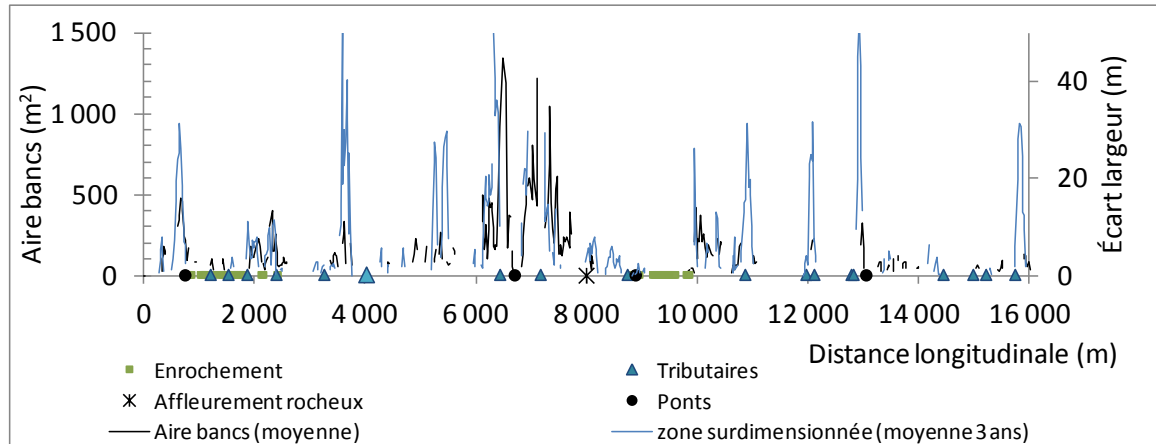
La caractérisation des zones en fonction de leur surdimensionnement et sous-dimensionnement fournit des indications sur l'alternance spatiale des conditions hydrauliques et permet d'évaluer l'effet potentiel de ces caractéristiques sur la localisation des bancs d'accumulation et des zones actives. Ces relations seront discutées dans les sections suivantes.

5.3.1.2 Variabilité longitudinale de l'aire des bancs d'accumulation de la rivière

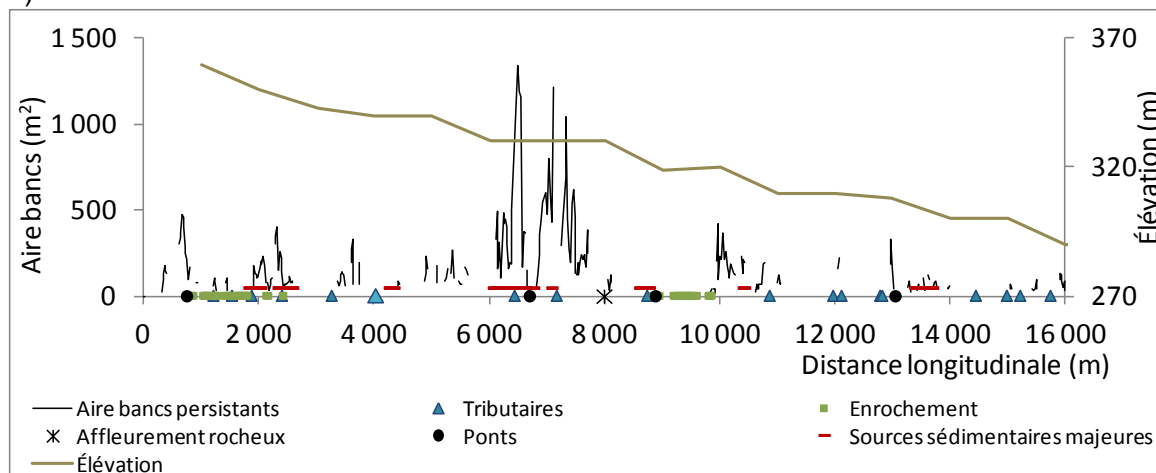
La variation longitudinale des bancs d'accumulation indique les variations dans la relation locale entre la capacité de transport et la disponibilité des sédiments. La figure 2.24 montre l'association spatiale entre les bancs d'accumulation persistants et les variables du milieu. Les bancs d'accumulation persistants sont définis à partir des endroits où des bancs sont observés pour au moins 3 des 4 couvertures de photos aériennes. Sur la rivière De La Fourche, les zones préférentielles d'accumulation coïncident fréquemment avec les zones surdimensionnées et avec la position des zones de réduction dans la pente de la vallée. Ces caractéristiques du milieu indiquent qu'il y a réduction locale de la capacité de la rivière à transporter les sédiments et que la charge en transport provenant de l'amont pourra s'accumuler.

Les zones surdimensionnées se caractérisent par une modification de l'hydrodynamique locale. C'est le cas par exemple des méandres, des zones proximales des ponts (cas: km 0.7) et des zones caractérisées par des apports sédimentaires importants en lien avec la présence

de tributaires ou de sources sédimentaires stockées dans les rives (cas: km 2). Ces zones sont marquées par une transition entre une forte et une plus faible capacité de transport. Les zones surdimensionnées favorisent une réorganisation de l'écoulement en lien avec les accumulations sédimentaires. La largeur de la vallée explique aussi la localisation des zones surdimensionnées le long de la rivière. La largeur de la vallée détermine la dimension de la zone d'accommodement à l'intérieur de laquelle la rivière peut se déplacer, reprendre en charge des sédiments et stockés temporairement des sédiments.



a)



b)

Figure 2.24 Distribution des bancs d'accumulation persistants en relation avec les caractéristiques du milieu, rivière De La Fourche. a) relation entre la position des bancs d'accumulation et des zones surdimensionnées; b) relation entre la position des bancs d'accumulation, l'élévation et des sources sédimentaires.

Ces zones préférentielles d'accumulation dans la rivière sont typiquement des lieux d'ancrage à partir desquels les bancs progressent principalement en s'allongeant vers l'aval, mais aussi vers l'amont, en fonction des apports sédimentaires et des modifications hydrauliques imposées par la présence des bancs et par les variations des conditions hydrologiques. Les variations temporelles dans le ratio entre l'aire des bancs et celle du chenal permettent de

suivre les changements dans la résistance à l'écoulement et de la disponibilité des sédiments intra-chenal. Ces résultats ont été présentés dans un rapport antérieur (Boyer *et al.*, 2013).

La zone où l'on retrouve la plus forte accumulation sédimentaire est comprise entre la fin d'une zone de pente relativement régulière (km 6) et un affleurement rocheux à 8 km (figure 2.24). Dans cette zone de très faible pente, la rivière s'alimente à d'importantes sources sédimentaires disponibles à la fois dans le chenal, dans le fond de la vallée et aux versants de celles-ci. La dispersion des sédiments se fait surtout latéralement. L'affleurement rocheux s'impose comme une discontinuité importante dans le continuum des sédiments et dans le type d'ajustement de la rivière. On retrouve peu d'accumulation sédimentaire sur les 2 km en aval de ce site quelque soit les années. Il est à noter que dans le secteur aval de la zone d'affleurement rocheux (km 9), il y a à nouveau réduction de la pente et un potentiel élevé d'accumulation sédimentaire. Toutefois dans ce secteur particulier, le dragage des sédiments est fréquent en lien avec la présence du pont et de résidences en bordure de la rivière. La crainte que les accumulations sédimentaires contribuent à accroître les risques d'inondation est souvent évoquée pour planifier ces interventions.

Le type de discontinuité observé dans le continuum sédimentaire en lien avec l'affleurement rocheux et la contraction du chenal a été rapporté à plusieurs occasions dans la littérature dont récemment par Fryirs (2007) et par Toone *et al.* (2013).

5.3.1.3 Distribution spatiale des zones actives « déplacement des rives » et « changement dans la largeur du chenal »

La figure 2.25 montre l'aire cumulée des zones actives pour chacune des périodes analysées et met en évidence les zones où de fortes augmentations dans l'activité de migration du chenal sont observées. On remarque aussi clairement sur cette figure la persistance temporelle de certaines zones à maintenir une forte activité. Ainsi, la zone de très forte augmentation dans l'aire cumulée entre le km 6 et le km 8 est présente pour les trois périodes analysées. Tel que préciser précédemment, la forte dominance des zones actives « Gains » sur les zones actives « Pertes » au cours de la période 1964-1980 est liée aux différents processus de simplification du tracé du chenal observé dans ces périodes : disparitions de certaines îles végétalisées et l'abandon de sections du chenal à la suite des coupures de méandre.

Si on compare ce patron d'activité à celui révélé par le cumul des différences de largeur du chenal, on constate que les deux facettes des ajustements morphologiques de la rivière (la modification du tracé et celle de la largeur de la rivière) sont liées (figure 2.25d). Ainsi, pour la période 1964-1980, les zones actives importantes « déplacement de rives », entre km 6 et km 7, se sont soldées par un élargissement du chenal (croissance de la courbe cumulée, figure 2.25c). En contre partie, au cours de la période 1980-1994, il y a eu peu de changement dans la largeur (la courbe devient stable) malgré le déplacement des rives. Finalement entre 1994 et 2010, le déplacement des rives dans la zone centrale résulte en un rétrécissement général du chenal (courbe cumulée descendante).

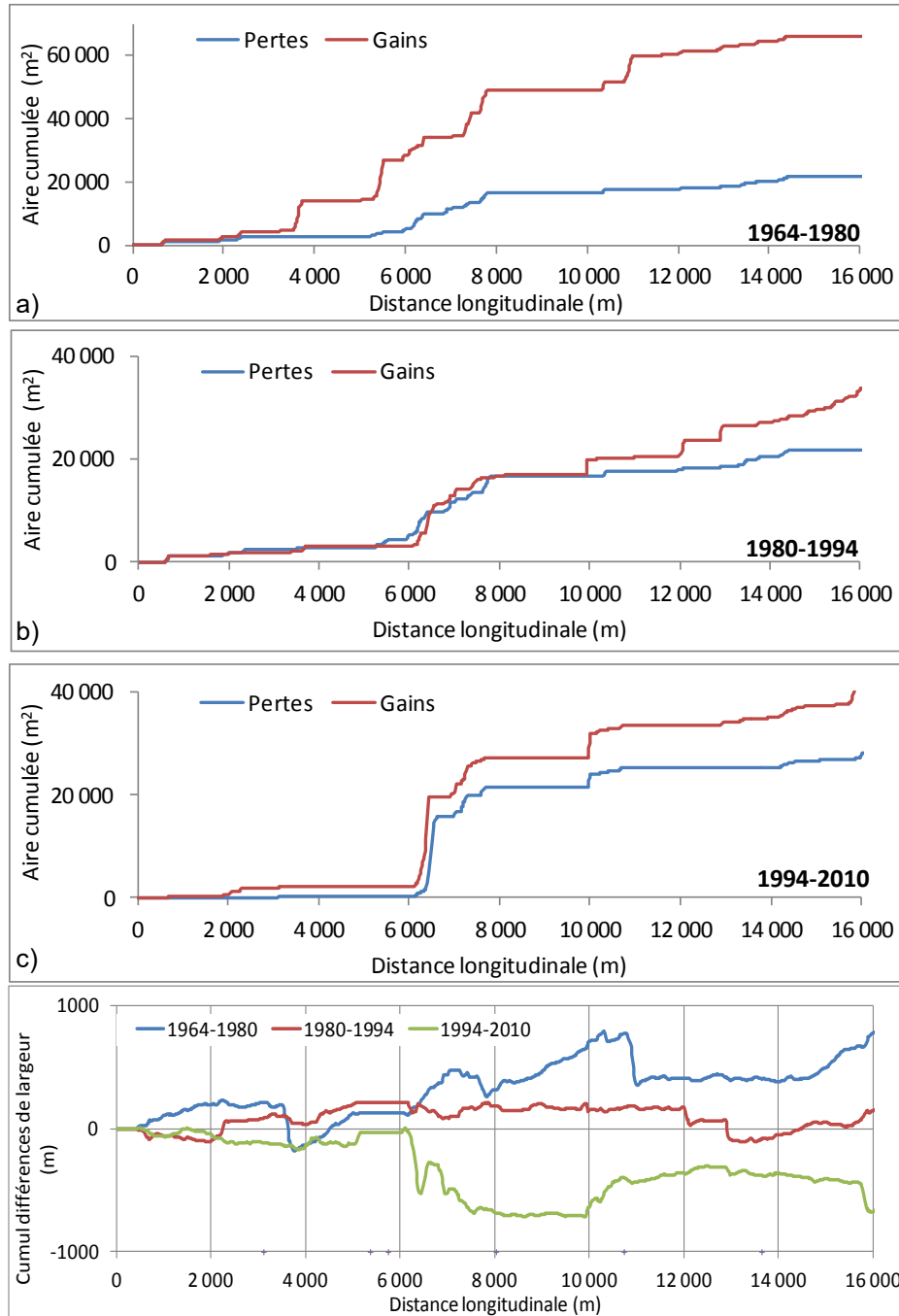


Figure 2.25 Distribution des zones actives cumulées pour les trois périodes analysées. a) 1964-1980; b) 1980-1994; c) 1994-2010 et d) cumul des différences de largeur pour chaque période, rivière De La Fourche. Les images de droite illustrent les changements observés dans la zone la plus active de la rivière.

Les plus fortes réductions dans la largeur de la rivière sont observées dans les zones surdimensionnées (figure 2.26). Pour les trois périodes, les élargissements sont observés en forte majorité (>78%) dans les zones sousdimensionnées (tableau 2.4). Les zones avec rétrécissement en 1964-1980 sont localisées en majorité dans les zones surdimensionnées (62%), en lien entre autres avec la disparition des îles centrales. Au cours des autres périodes, il y a augmentation du nombre de polygones avec rétrécissement mais il n'y a pas de localisation préférentielle de ce processus.

5.3.1.4 Localisation des zones actives persistantes par rapport aux variables du milieu

Les résultats exposés précédemment indiquent que les zones actives tendent à se retrouver dans des secteurs particuliers. La figure 2.27a synthétise l'information en identifiant les secteurs où des zones actives « déplacement chenal » ont été identifiées pour trois périodes. Pour les secteurs amont, jusqu'au km 8, ces zones sont étroitement liées à la position des bancs d'accumulation persistants et au ratio entre l'aire des bancs et l'aire du chenal (figure 2.27b). La mise en relation de ces variables indique que l'amplitude des aires des zones actives ou instables est supérieure lorsque le ratio de l'aire des bancs / aire du chenal est élevé au début de la période (>40%). Les zones actives des secteurs aval (km 10 à km 17) sont moins bien associées à ce ratio bien qu'il y ait coïncidence entre la présence de ces zones et des bancs persistants.

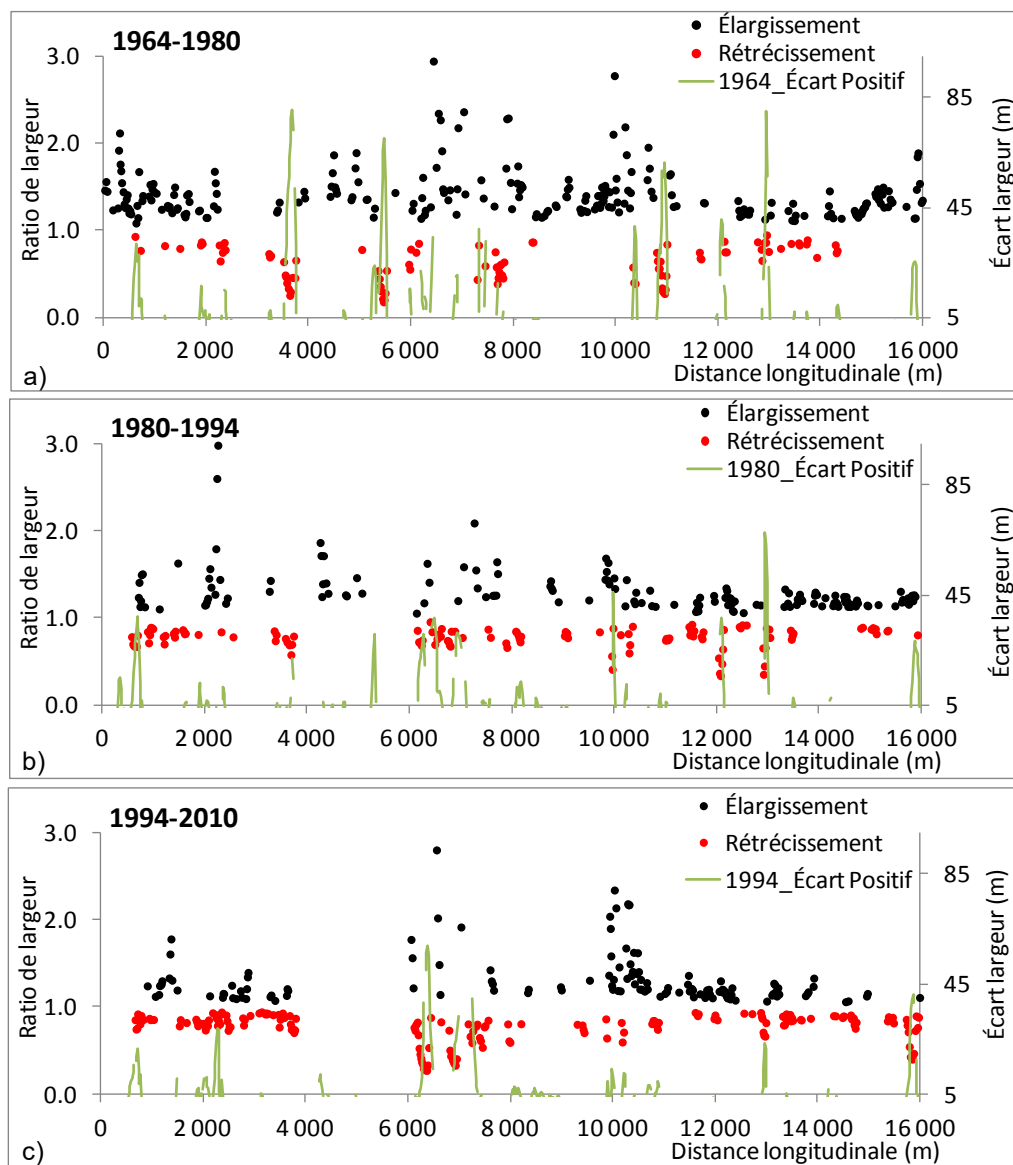
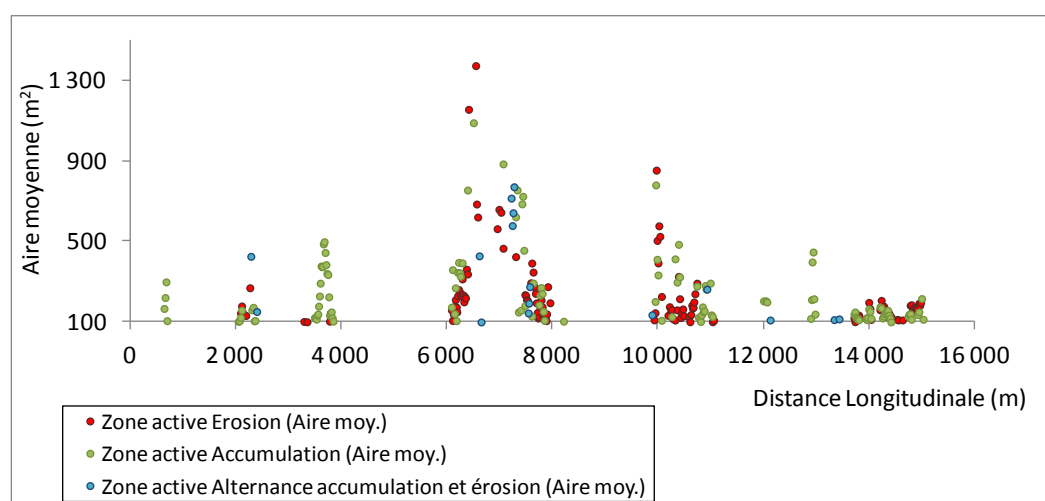


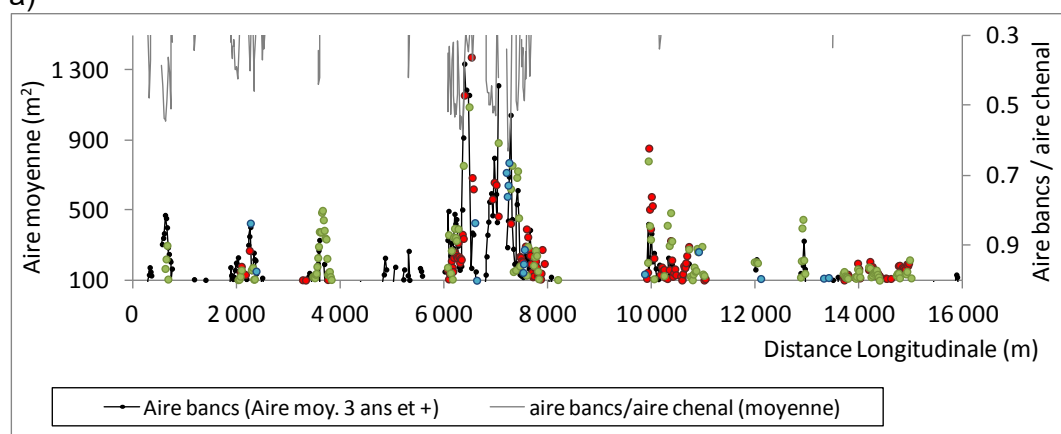
Figure 2.26 Modification temporelle de la largeur de la rivière De La Fourche. Le ratio de largeur entre le début et la fin de la période est représenté. Le trait vert localise les zones surdimensionnées (écart positif de largeur) au début de chaque période.

POLYGOLES OÙ IL Y A EU ÉLARGISSEMENT AU COURS DE LA PÉRIODE				POLYGOLES OÙ IL Y A EU RÉTRÉCISSEMENT AU COURS DE LA PÉRIODE			
	N	ZONES SURDIMENSIONNÉES	ZONES SOUS- DIMENSIONNÉES		N	ZONES SURDIMENSIONNÉES	ZONES SOUS- DIMENSIONNÉES
1964 (1964-1980)	537	18%	82%	217	62%	38%	
1980 (1980-1994)	425	22%	78%	322	47%	53%	
1994 (1994-2010)	392	16%	84%	426	53%	47%	

Tableau 2.4 Localisation les changements de largeur de la rivière De La Fourche en lien avec le surdimensionnement et le sous-dimensionnement local dans la largeur du chenal.



a)



b)

Figure 2.27 a) Localisation des zones actives persistantes (Aire > 100 m²), rivière De La Fourche; b) localisation des zones actives persistantes et des bancs persistants. Le seuil minimal de 0.3 utilisé pour la représentation du rapport entre les aires des bancs et l'aire du chenal a été choisi pour faire ressortir le lien étroit entre ce ratio et la localisation des zones actives persistantes.

5.3.2 Rivière Nicolet

5.3.2.1 Variabilité longitudinale de la largeur de la rivière et de la vallée

Sur la Nicolet, la variabilité longitudinale de la largeur indique qu'il y a une augmentation marquée de la largeur moyenne du chenal en aval du km 20 (figure 2.28). La modification dans la largeur correspond à un changement dans le type de dépôts marqué par un passage d'une zone dominée par la présence d'un till à une zone de dépôts glacio-marins composés de sable et de graviers (figure 2.28).

La catégorisation des polygones en termes de sous- et surdimensionnement a été fait en distinguant la section amont et aval du km 20. Les surdimensionnements locaux coïncident généralement avec l'emplacement des méandres et/ou avec les zones d'accumulation sédimentaires dans la rivière en lien avec la présence d'un pont (cas du km 11) ou de tributaires. Dans la section aval du km 20, les zones surdimensionnées sont souvent associées à la présence d'îles végétalisées. L'exemple représenté à la figure 2.29 permet de voir cette association. Dans ce cas, la position des structures de l'ancien pont en relation avec le surdimensionnement de la rivière suggère que celui-ci a pu jouer un rôle déterminant sur les conditions hydrauliques locales et sur la morphologie du lit en amont. Dans la majorité des cas, entre le km 30 et km 45, les îles sont le résultat de processus de glissement ayant eu lieu avant les périodes couverte dans cette étude.

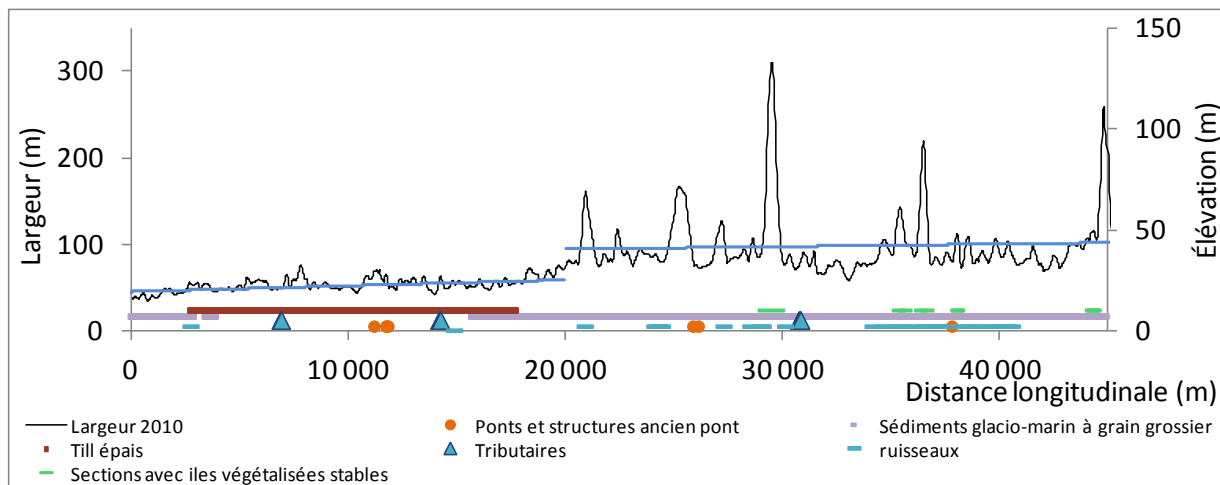


Figure 2.28 Variations longitudinales de la largeur de la Nicolet dans la section à l'étude en 2010. La position des différentes caractéristiques physiques du milieu est indiquée. Le trait bleu correspond à la tendance moyenne de la largeur par sous sections.

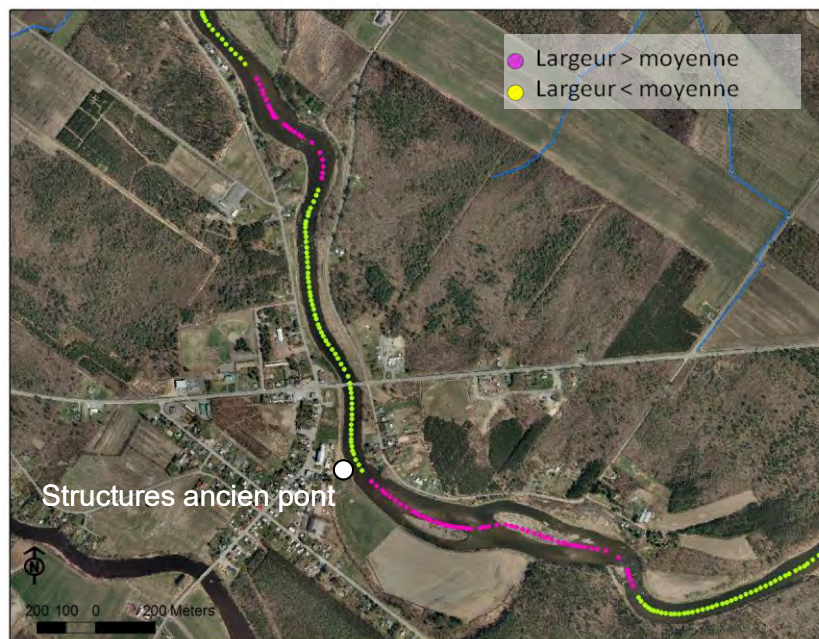


Figure 2.29 Largeur relative (par polygones d'analyse) de la rivière Nicolet (km 25 à km 26).

5.3.2.2 Variabilité longitudinale de l'aire des bancs d'accumulation

La distribution des bancs d'accumulation persistants dans le secteur amont de la section à l'étude (jusqu'au km 16) indique que ceux-ci sont étroitement associés à la présence des tributaires et des structures de pont (figure 2.30). Dans le secteur aval, les bancs d'accumulation actifs sont associés à des îles végétalisées dont la position est stable dans le temps.

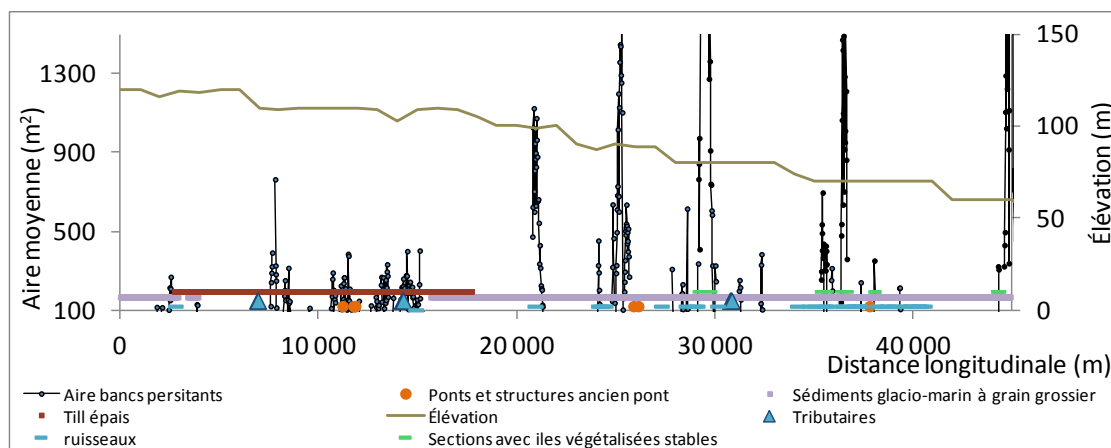
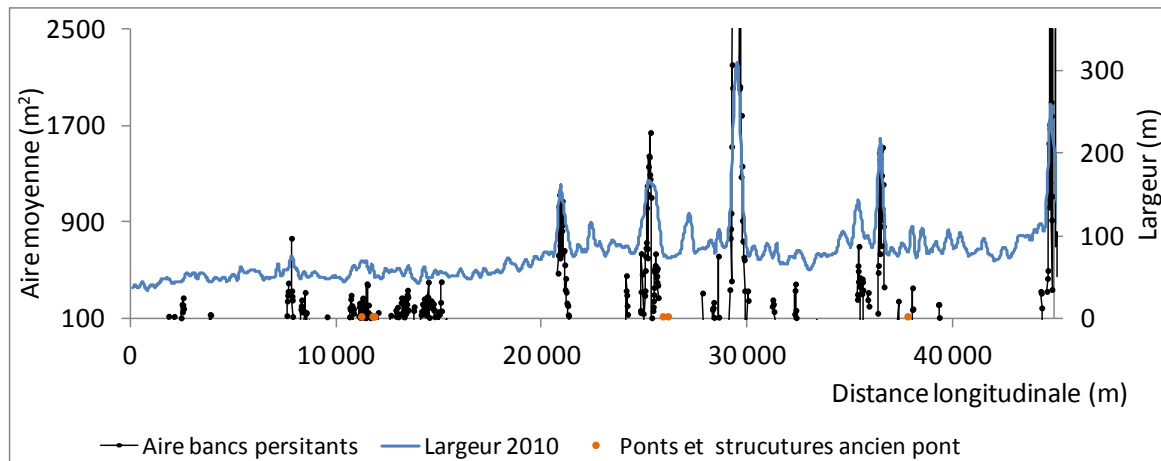
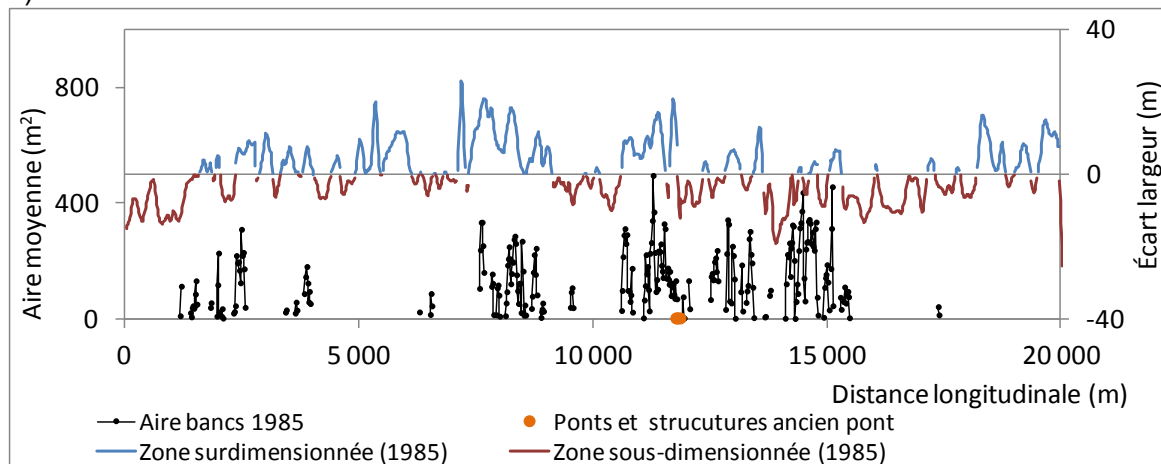


Figure 2.30 Distribution des bancs d'accumulation persistants (sans les îles végétalisées) en relation avec la position des différents éléments du milieu (Nicolet).

La position des bancs dans le chenal est favorisée par certaines caractéristiques physiques et dynamiques des lieux comme les changements dans la pente de la vallée et les zones de surdimensionnement de la rivière (figure 2.30 et figure 2.31). La zone de faible pente entre le km 8 et le km 16 délimite un secteur où la probabilité d'observer des accumulations sédimentaires est élevée. Dans ce secteur, les zones surdimensionnées sont très fortement liées à la présence de bancs d'accumulation. Ces deux éléments influent sur la capacité locale de transport des sédiments en charge de fond. La présence des deux tributaires aux extrémités de cette section semble influencer les apports sédimentaires locaux et contribuer à faire de cette zone en endroit problématique en termes de continuum sédimentaire. La zone amont du confluent de la rivière Des Rosiers (km 15) représente un secteur où par le passé les apports sédimentaires en provenant de ce tributaire ont eu un impact direct sur la Nicolet. La présence de bancs d'accumulation persistants dans ce secteur pourrait avoir été initiée par ces apports.



a)



b)

Figure 2.31 a) Distribution des bancs d'accumulation persistants en fonction de la largeur de la rivière. Les îles stabilisées sont représentées; b) Distribution des bancs d'accumulation en fonction des zones sous- et surdimensionnées (écart largeur: cas 1985), dans la section amont de la zone d'étude de la Nicolet.

Dans la section centrale de la zone à l'étude, entre le km 16 et le km 30, les bancs d'accumulation actifs sont associés aux pourtours des îles. Les superficies de ces bancs sont fluctuantes dans le temps. Dans ce secteur, la pente moyenne est plus forte que dans la section amont (0.002 vs 0.0009) où de longs segments avec bancs actifs sont répertoriés. Dans ce secteur, la rivière coule fréquemment sur la roche en place. Ces zones d'affleurement rocheux agissent, tel qu'identifier sur la rivière De La Fourche, comme des points de contrainte. Ils représentent des niveaux de base locaux et contrôlent la capacité de transport et le transport effectif des sédiments dans les secteurs amont et aval. Dans le secteur du km 25, le pont mais surtout la structure de l'ancien pont, ont contribué à modifier localement la capacité de transport de la rivière. L'accumulation sédimentaire est favorisée dans la section amont de ces structures où il y a aussi surdimensionnement du chenal (figure 2.29).

La présence et la croissance des bancs d'accumulation sont favorisées par la modification des conditions hydrosédimentaires de la rivière. Cette relation peut s'expliquer par un surplus sédimentaire relique d'une période antécédente ou par l'augmentation des apports en sédiments suite à des ajustements morphologiques et sédimentaires de la rivière ou de ses tributaires. Si le système de tributaires est intrinsèque à la rivière, leur rôle sur l'ampleur des zones actives est cependant variable dans le temps selon les modifications dans le type d'intervention réalisé sur ces tributaires, dans l'utilisation du sol sur le bassin ou dans la gestion de l'eau par exemple (voir section suivante).

5.3.2.3 Distribution des zones actives « déplacement des rives » et « changement dans la largeur du chenal »

Tel que noté pour la rivière De La Fourche, les zones actives sont concentrées dans des secteurs particuliers et localement il y a amplification dans l'aire des zones actives. Les résultats suggèrent que la présence de tributaires importants et/ou la concentration élevée de petits tributaires influencent la distribution et la superficie des zones actives. Le cumul des aires des zones actives permet de visualiser les zones de concentration et d'accroissement rapide des superficies actives et de mettre en évidence la coïncidence spatiale entre ces zones instables, c'est-à-dire là où une augmentation rapide de la superficie des zones actives est observée, et la proximité des tributaires (figure 2.32). La zone la plus active de la rivière est en lien avec la construction du delta de la rivière Des Rosiers (zone proximale du km 15) durant la période de faible débit. La rivière Des Rosiers a été fortement linéarisée durant la période 1950 à 1966 ce qui a favorisé une augmentation rapide des apports sédimentaires. La figure 2.33 montre la position du delta entre 1966 et 2010. En 1966, on remarque que le delta est très avancé à l'intérieur du chenal de la Nicolet. En 1979 et 1985, il y a à la fois prise en charge des sédiments et remodelage du chenal en lien avec les modifications locales l'écoulement. De 1966 à 2010, la position du delta est passée de l'aval d'un méandre à l'amont d'un méandre. Cette évolution suggère que les apports de ce tributaire ont contribué à enclencher les ajustements observés dans la Nicolet compte tenu de la faible capacité de transport de celle-ci durant la période précédant 1966, comme l'indiquent les faibles débits de la période et la faible pente du chenal dans ce secteur. Ces conditions favorisent aussi la persistance des ajustements dans le temps et la progression vers l'amont des impacts liés aux apports du tributaire sur le chenal de la Nicolet.

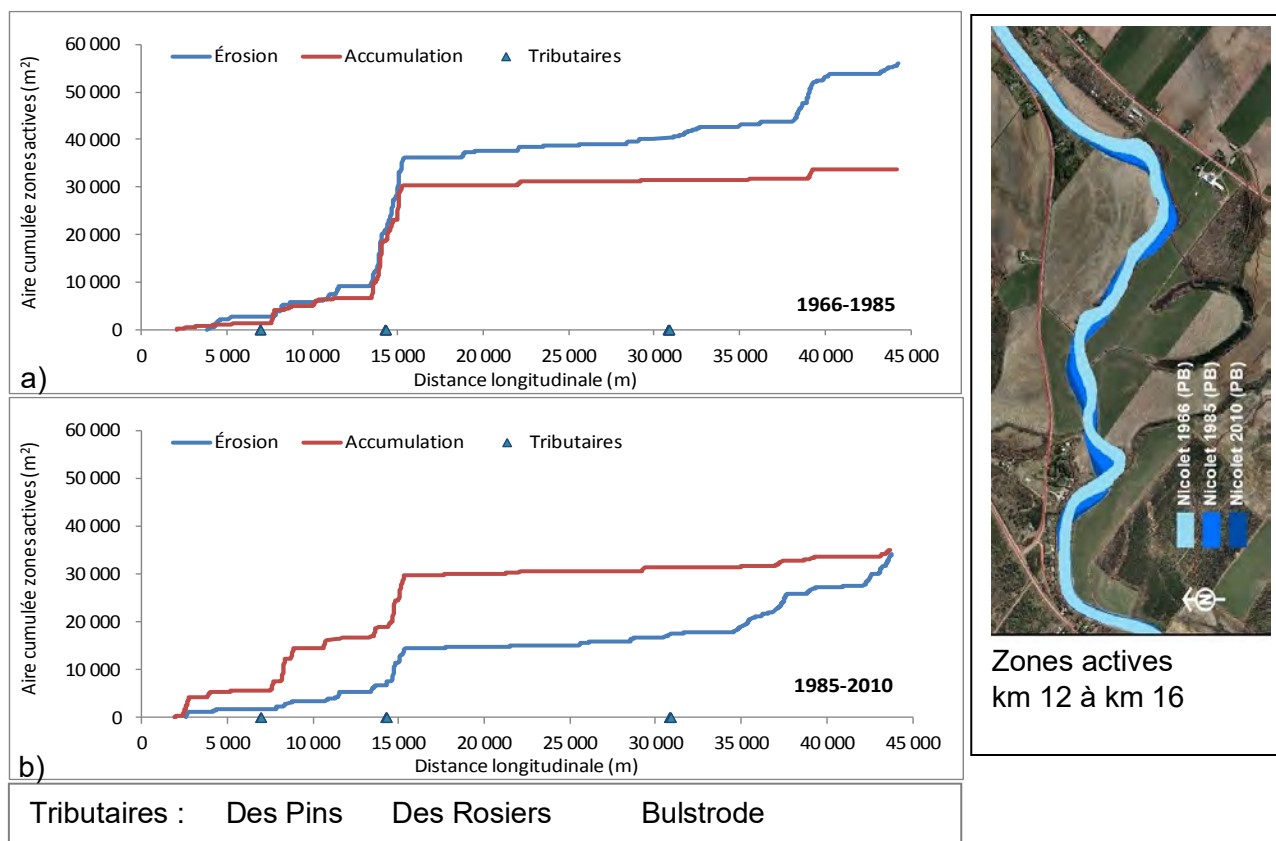


Figure 2.32 Distribution des zones actives cumulées le long de la rivière Nicolet a) 1966-1985; b) 1985-2010.

Dans les sections en amont du km 16, il y a une faible dominance de l'érosion sur l'accumulation en rive au cours de la période 1966-1985 ($A. \text{ accumulé} / A. \text{ érodée} = 0.84$), mais une forte dominance de l'accumulation sur l'érosion au cours de la période 1985-2010 ($A. \text{ accumulé} / A. \text{ érodée} = 2.17$). La proportion des aires des zones actives « érosion » dans cette section, passe de 65 % à la période 1966-1985 à 34 % à la période 1985-2010. En contrepartie, plus de 65 % de l'aire totale des zones actives « accumulation » (65 % pour de la période 1966-1985 et 70 % pour la période 1985-2010) sont observées dans cette zone.

Pour la période 1966-1985, les zones actives importantes « déplacement de rives », entre km 5 et km 16, se sont soldées principalement par un élargissement du chenal (figure 2.34). À certains endroits, la largeur du chenal a augmenté de 1.5 fois entre 1966 et 1985. En contre partie, au cours de la période 1985-2010, le déplacement des rives est lié avec un rétrécissement du chenal. Les rétrécissements locaux observés pendant cette période sont d'amplitude similaire aux élargissements observés à la période précédente. La variabilité dans l'amplitude des élargissements et des rétrécissements observés est moindre dans la portion aval que dans la portion amont de la zone d'étude.

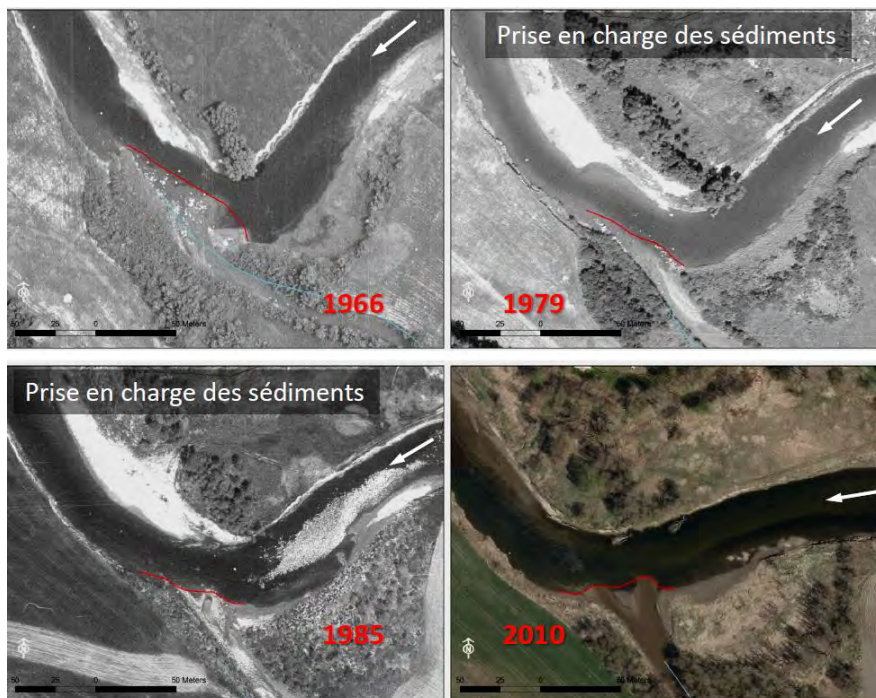


Figure 2.33 Évolution du delta de la rivière Des Rosiers. Le trait rouge indique la position approximative du delta dans la rivière Nicolet aux différentes années.

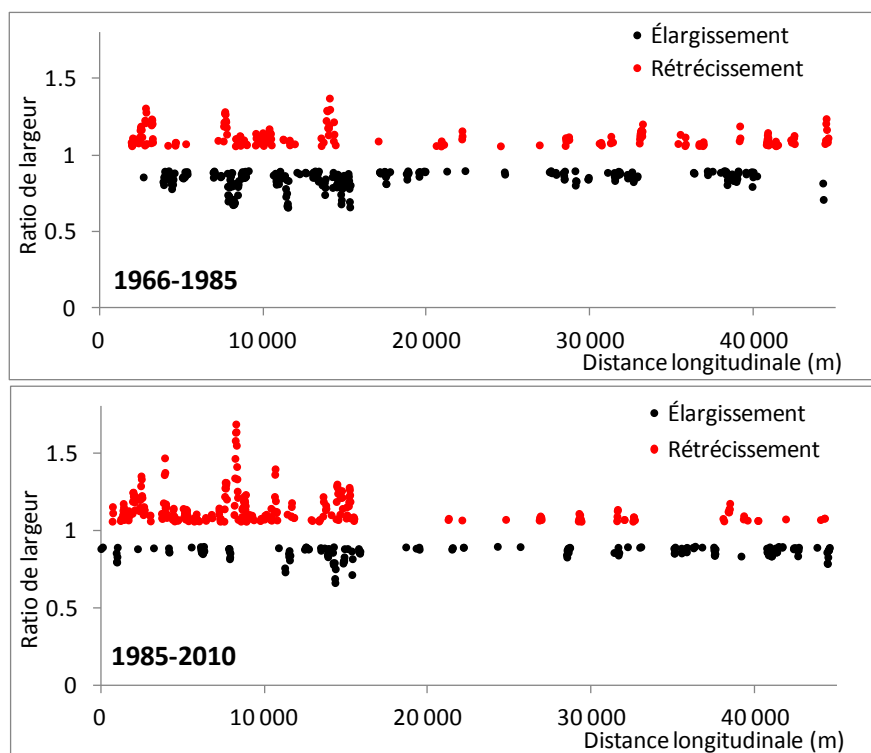


Figure 2.34 Modification de la largeur du chenal d'une période à l'autre, Nicolet.

5.3.2.4 Localisation des zones actives persistantes par rapport aux variables du milieu

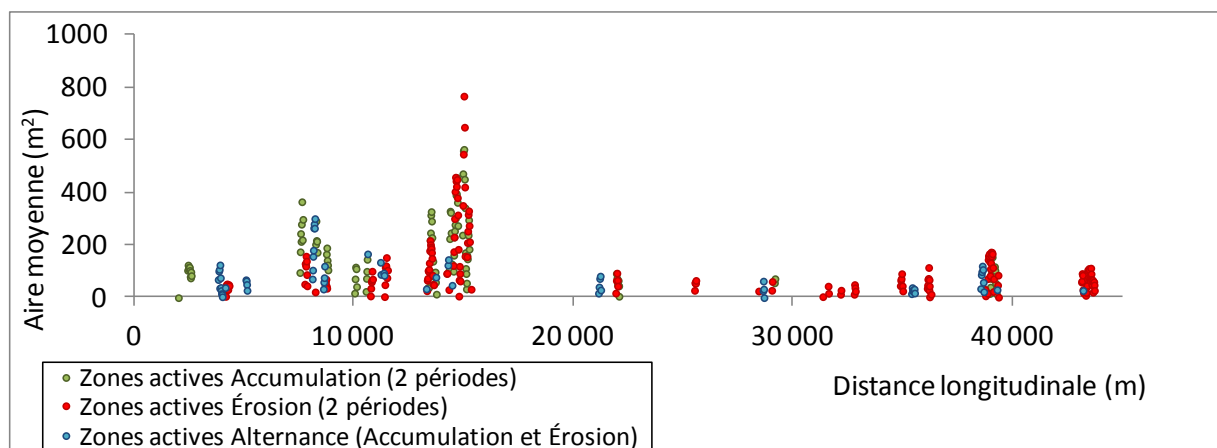
La figure 2.35a montre le regroupement spatial des zones préférentielles d'activité tel que souligné précédemment. La longueur moyenne de ces différents regroupements d'activité persistante est de 1.2 km. Ces zones actives s'associent de façon préférentielle aux bancs d'accumulation et à la présence des tributaires (figure 2.35b). Cette association spatiale souligne les interactions entre les variables et l'importance de ces variables dans la dynamique d'ajustement des rivières et soulèvent la possibilité que ces lieux puissent être utilisés comme indicateur des zones d'instabilité. Sans expliquer tous les endroits où les berges sont en érosion, cet indicateur rend compte de la grande majorité des cas d'activité du chenal. Les observations de terrain à l'été 2011 suggéraient une forte association entre la présence des zones actives et celle des bancs d'accumulation. Les résultats d'analyse de la rivière Nicolet confirment cette relation. Pour l'ensemble de la section d'étude, entre 68% et 75% des zones actives pour une période donnée ont un banc d'accumulation à l'intérieur d'une distance de 80 m. L'association la plus forte est pour la section entre le km 7 et le km 16. Dans ce dernier cas, plus de 94% des zones actives sont en lien avec la présence de bancs d'accumulation au cours des deux périodes d'analyse.

Contrairement à ce qui a été observé dans la rivière de La Fourche, les ratios entre l'aire des bancs et l'aire du chenal sont faibles et permettent de localiser les zones ayant une très forte activité uniquement dans certains secteurs très circonscrits de la rivière. Dans la section amont, les zones où ce ratio est supérieur à 15 % correspondent généralement aux secteurs où l'aire des zones actives est plus élevée. Dans la section aval, la relation entre les zones actives et les bancs d'accumulation est moins bien défini et conséquemment ce ratio ne permet pas de discriminer les secteurs les plus actifs dans cette portion de la rivière.

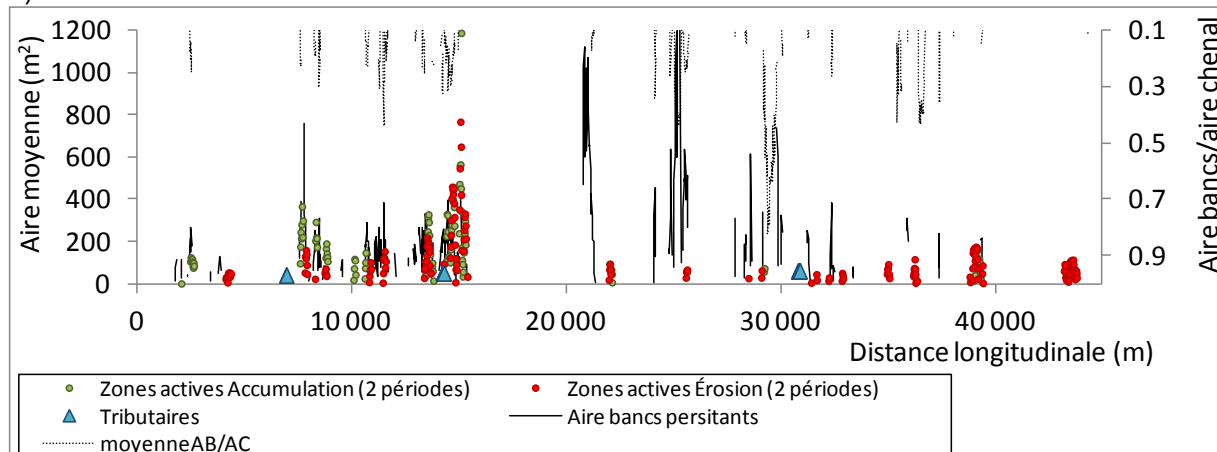
Dans le cas de la Nicolet comme dans celui de la rivière De La Fourche, il y a une coïncidence entre le sous-dimensionnement local de la rivière au début de la période et l'occurrence de l'élargissement de la rivière (tableau 2.5). En effet, plus de 78 % des polygones où la rivière s'est élargie étaient classés comme sous-dimensionnés. Le contraire est observable pour le rétrécissement au cours de la période 1985-2010 où on retrouve ce processus dans un nombre plus grand de polygones surdimensionnés. Pour la période 1966-1985, la distinction est possible uniquement pour la zone la plus active en amont de la rivière Bulstrode, le ratio est alors de 60% pour cette période alors qu'il est de 49% si on considère l'ensemble de la section à l'étude.

POLYGONES OÙ IL Y A EU ÉLARGISSEMENT AU COURS DE LA PÉRIODE				POLYGONES OÙ IL Y A EU RÉTRÉCISSEMENT AU COURS DE LA PÉRIODE			
	N	ZONES SURDIMENSIONNÉES	ZONES SOUS- DIMENSIONNÉES		N	ZONES SURDIMENSIONNÉES	ZONES SOUS- DIMENSIONNÉES
1966 (1966-1985)	271	14%	86%	198	49%	51%	
1985 (1985-2010)	178	22%	78%	265	71%	7%	

Tableau 2.5 Localisation des changements dans la largeur en lien avec le surdimensionnement et le sous-dimensionnement local de la Nicolet.



a)



b)

Figure 2.35 a) Localisation des zones actives persistantes, rivière Nicolet; b) localisation des zones actives persistantes et des bancs d'accumulation persistants (les îles stables ne sont pas représentées).

Les zones actives identifiées pour la Nicolet sont localisées à la fois dans des sections sinueuses ou rectilignes avec et sans végétation riveraine. Les résultats et observations de terrain suggèrent que la végétation riveraine arbustive ne joue pas un rôle direct dans la présence ou l'absence de zones actives. Toutefois, la végétation contribue à la stabilisation graduelle des bancs d'accumulation particulièrement dans les sections où les méandres sont actifs. Dans ces cas, elle contribue à la dynamique sédimentaire de la rivière.

La faible variation longitudinale dans la nature des sédiments des berges ne permet pas d'accorder une forte importance à cette variable dans l'explication de la répartition longitudinale des zones actives. Toutefois, la plus forte occurrence d'activité le long des rives est observée dans les dépôts de till. La texture du sol dans ces secteurs est classée comme « alluvions, limons, sables » (classe 1) et « sableux » (classe 2). Ces classes de texture sont dominantes à proximité de la rivière. Des relevés de terrain confirment l'uniformité dans la taille des sédiments des rives. D'une période à l'autre, il n'y a pas de modification dans de la

proportion de zones actives observées dans l'une ou l'autre des classes de texture de sol, ce qui laisse croire que l'influence de ce facteur n'est pas dominant pour expliquer la variabilité spatiale des zones actives.

Les zones argileuses sont très circonscrites dans la section à l'étude. Elles sont surtout situées dans la portion aval de la section et entre le km 10 et le km 16. Dans ce dernier secteur, 99% des polygones classés « argileux » sont porteurs d'une zone active au cours de l'une ou l'autre des deux périodes (1966-1985 et 1985-2010). Pour la période 1966-1985, la proportion de polygones actifs dans cette zone est de 64% soit près du double de celle pour la seconde période (34%). Bien que la présence de sédiments argileux ne semble pas contraindre le déplacement de la rive, elle pourrait cependant influencer sur le type de processus et l'ampleur des processus. L'intensité des processus pourrait être supérieure dans certaines circonstances hydro-sédimentaires favorables. Les fluctuations rapides et de grande ampleur des débits et une forte concentration de l'eau sur la berge ou en pied de berge peuvent augmenter les risques de glissement de terrain et forcer par la suite l'accumulation sédimentaire dans le chenal et un réajustement local de l'écoulement et de la morphologie de la rivière. Le contexte de la période 1966-1985 pourrait avoir été favorable.

6 SYTHÈSE ET DISCUSSION

Les résultats obtenus pour les deux rivières à l'étude mettent en évidence les liens entre les ajustements morphologiques de la rivière et les tendances hydrologiques de la période. Ils soulignent aussi les différences spatiales dans l'intensité et le type de processus actifs en fonction des caractéristiques locales de la rivière. Le couplage érosion-accumulation sédimentaire en lien ou non avec le déplacement de méandre est le processus d'ajustement fluvial dominant sur les deux rivières. L'amplification de ce processus est favorisée par certaines caractéristiques physiques qui modifient la relation entre la capacité de transport de la rivière et les apports sédimentaires. Les zones persistantes d'accumulation sur le lit du chenal coïncident fréquemment avec les zones persistantes d'activité le long des berges et sont donc des lieux préférentiels d'ajustement de la rivière. Les zones actives entre ces zones préférentielles sont activées en fonction des changements hydrologiques, hydrauliques et sédimentaires.

Les caractéristiques hydrologiques de la période régissent la direction des ajustements morphologiques de la rivière. Ainsi, les périodes où les débits sont supérieurs à la moyenne tendent à être dominées par des processus d'érosion des rives et par l'élargissement de la rivière. Cette tendance est toutefois observable dans la mesure où la période précédente était contrastée. Ainsi, la période pour laquelle nous avons observé un élargissement généralisé de la rivière, soit 1964-1980 pour la rivière De La Fourche et 1966-1985 pour la Nicolet, diffère considérablement de la période précédente qui était caractérisée par des débits inférieurs à la moyenne, conditions pour lesquelles la morphologie de la rivière était probablement adaptée. La modification graduelle et soutenue des débits par rapport à la période précédente a favorisé un réajustement progressif de la morphologie du chenal. Les périodes de changements dans le régime hydrologique correspondaient aux ajustements morphologiques les plus importants.

La longueur et l'alternance des cycles hydrologiques où les débits sont supérieurs ou inférieurs à la moyenne influencent la morphologie de la rivière et par conséquent, l'alternance entre les phases dominées par l'accumulation et celles dominées par l'érosion. Les longs cycles tendent à favoriser la dominance d'un processus sur l'autre tandis que des cycles plus courts maintiennent la rivière en ajustement continu mais où les deux processus seraient plus ou moins en équilibre et agiraient en alternance. L'augmentation anticipée de la fréquence des crues en lien avec les projections de changement climatique aura un impact sur la dynamique actuelle des ajustements fluviaux. Ces impacts différeront toutefois selon la distribution temporelle des fortes crues.

L'altération du cycle d'oscillation entre les fréquences de fortes et faibles crues peut modifier le rôle relatif des variables impliquées dans les ajustements morphologiques du cours d'eau. Les impacts associés à l'altération de ces longs cycles hydro-climatiques par une plus grande dispersion temporelle des fortes crues pourraient entraîner une période de forte accumulation sédimentaire dans la rivière. Ces sédiments apportés au chenal lors de fortes crues pourraient demeurer plus longtemps dans la rivière s'ils ne peuvent être mobilisés à nouveau par d'autres crues les années suivantes. L'influence locale des accumulations sédimentaires intra-chenal sur l'écoulement et sur l'érosion des rives pourrait alors être accrue.

Les secteurs où on retrouve une forte présence de contraintes à la migration latérale de la rivière et des sources sédimentaires importantes sont généralement les zones où nous observons une amplification des ajustements morphologiques par rapport à la tendance moyenne pour la rivière. Les ponts et tributaires modifient localement de façon marquée les conditions hydrauliques et sédimentaires. Ces zones sont des lieux privilégiés d'ajustement où la largeur de la rivière est souvent surdimensionnée par rapport aux caractéristiques de largeur des secteurs avoisinants et où les bancs d'accumulation sont toujours observés. Dans les zones fortement stabilisées, la zone d'ajustement latérale est transférée vers l'aval. Les zones fortement stabilisées agissent comme des zones de stockage temporaire et de transfert sédimentaire. De fait, nous avons pu documenter sur la rivière De La Fourche une forte variation temporelle dans l'aire et la longueur des bancs d'accumulation dans un des secteurs fortement stabilisés. Le processus d'ajustement dans ces zones est marqué par une modification du lit et de la résistance à l'écoulement plutôt que par une modification latérale du chenal.

Cette recherche a aussi permis de développer un nouvel outil d'analyse et de valider l'applicabilité de la méthode pour identifier des secteurs actifs de la rivière et les variables clés favorisant l'occurrence de changements morphologiques des berges et du chenal. Ceci a permis de confirmer le rôle prépondérant du continuum sédimentaire dans les ajustements du chenal. Nous pouvons ainsi proposer une série d'indicateurs qu'il est impératif de documenter dans l'analyse des risques d'érosion des berges pour plusieurs rivières dans le sud du Québec. Ces indicateurs permettront de mieux évaluer les effets des interventions futures ou des scénarios de changements climatiques et par conséquent des changements anticipés dans les régimes hydrologiques.

6.1 VARIABLES CLÉS AGISSANT SUR LES AJUSTEMENTS LOCAUX DE LA RIVIÈRE

Nous avons identifié cinq éléments clés qui jouent un rôle direct ou indirect dans la localisation et la persistance des zones actives que ce soit par des pertes ou des gains en sédiments le long des rives et sur le type d'ajustement morphologique de la rivière. Ces éléments clés sont :

- Les sources sédimentaires importantes provenant du chenal, des berges et de la vallée et des tributaires.
- Les bancs d'accumulation et le ratio (aire occupée par les bancs/aire du chenal).
- Les zones préférentielles d'accumulation en lien avec les zones surdimensionnées dans la rivière qui sont associées par exemple aux méandres et/ou l'entrée des tributaires. Ces zones correspondent aux endroits de modification abrupte et locale dans les conditions de l'écoulement.
- La roche en place et autres points de contrainte (ex. : pont) dans le chenal et la vallée. Ces lieux affectent le continuum sédimentaire en imposant un niveau de base local et/ou en modifiant drastiquement les caractéristiques de l'écoulement et la capacité d'ajustement du chenal.
- Contraintes à la migration latérale de la rivière comme les ouvrages de stabilisation de berges et les berges composées de sédiments fortement consolidés et de roche en place.

La position relative de ces éléments le long de la rivière module l'amplitude des ajustements morphologiques et la localisation des zones actives marquées par une érosion persistante des berges.

6.1.1 Indicateurs de localisation des zones actives importantes

Les résultats obtenus dans le contexte des rivières Nicolet et De La Fourche permettent de proposer une série d'indicateurs permettant l'identification de zones à fort risque en ce qui concerne l'érosion des berges et la stabilité du lit de la rivière.

- Zones préférentielles d'accumulation et de surdimensionnement de la rivière

Ces zones sont majoritairement associées aux portions aval des méandres actifs, aux confluents de cours d'eau mais aussi à des sections rectilignes en aval des zones de contrainte (ex. en aval de zones d'enrochement). Ce sont généralement les zones les plus actives de la rivière.

- Ratio (aire occupée par des bancs/aire du chenal) et l'orientation des bancs dans le chenal

Dans le cas de la rivière De La Fourche, les zones d'intense activité sont associées à des ratios élevés d'occupation du chenal par des bancs. La composante verticale des bancs est importante à considérer en plus du ratio. Ainsi, la hauteur relative des bancs par rapport à la hauteur des rives est plus grande sur rivière De La Fourche que sur la Nicolet. L'influence sur l'écoulement est marquée pour une large gamme de débits qui contribuent davantage à la mobilité des sédiments du lit de la rivière. Dans le cas de la Nicolet, l'influence des bancs pour

des forts débits et hauts niveaux d'eau est possiblement moindre à cause de la forte submergence de plusieurs des bancs dans ces conditions.

Les bancs d'accumulation exercent un fort contrôle sur l'écoulement et en conséquence sur les processus locaux d'érosion et d'accumulation. Les modifications dans les directions d'écoulement en lien avec la présence des bancs dans ces zones d'ajustements morphologiques marqués sont à surveiller notamment dans les secteurs où on retrouve des habitations ou infrastructures près de la rivière. Le suivi des bancs d'accumulation permet de visualiser et quantifier l'évolution de ce type de secteur.

- Points de contrôle sédimentaire et morphologique dans le paysage

La position relative des points de contrôle influe sur la présence des zones actives et favorise leur maintien en des positions relativement stables dans le temps. Ces points de contrôle doivent être identifiés. La position des zones de stockage sédimentaire dans les terrasses de la vallée doit être considérée dans cette procédure d'identification.

Les zones de surdimensionnement du chenal et de la vallée en présence d'une faible pente de la rivière créent des conditions favorables à l'accumulation sédimentaire.

- Contraintes à la migration latérale de la rivière

Les zones de contrainte à la migration latérale de la rivière favorisent le transit des sédiments et force le déplacement aval des zones actives ce qui entraîne un ajustement de la rivière par une accumulation sédimentaire et la construction de bancs.

6.1.2 Indicateurs : modulant l'amplitude zones actives

- Proximité des sources sédimentaires majeures

Le contact direct entre le chenal et les sources sédimentaires majeures que constituent certains versants favorisent l'apport rapide d'un fort volume de sédiments et l'ajustement de la rivière sur des centaines de mètres en aval de la source. Les apports provenant des tributaires favorisent aussi un ajustement local de la rivière. Dans le cas d'apport massif dans un contexte de faible débit sur le cours d'eau principal et dans un milieu de faible pente (cas de la Nicolet km 11 à km 15), les ajustements en lien avec ces apports peuvent se propager vers l'amont et persister sur une longue période.

- Points de contrainte sédimentaire et morphologique dans le paysage

La proximité longitudinale entre les points de contrainte et les sources sédimentaires influe sur l'amplitude des ajustements locaux en contractant la longueur de la zone d'ajustement. Plus ces zones sont rapprochées et plus les impacts associés à chaque élément pourront se cumuler et la direction du changement devient alors plus imprévisible. Les cas où les ponts font obstacle à la migration longitudinale des méandres sont des exemples où il y a combinaison et amplification des impacts normalement associés à la présence d'un pont et à l'activité d'un méandre. Dans cette optique, les zones où les ponts sont localisés à l'aval de méandres actifs sont potentiellement à risque constant d'ajustement.

- Séquence temporelle des périodes hydrologiques (CDDmax)

Les conditions hydro-sédimentaires antérieures influencent la direction et l'amplitude des ajustements de la rivière. Les ajustements les plus marqués sont observés lorsque le régime hydrologique, défini par la tendance CDDmax, contraste fortement avec la période précédente et que la durée de cette période a été longue.

6.2 *VULNÉRABILITÉ DES BERGES AUX MODIFICATIONS DES VARIABLES DE CONTRÔLE DES PROCESSUS D'ÉROSION*

La vulnérabilité des berges réfère au niveau de stress que la berge peut supporter avant de subir une modification. La vulnérabilité des berges est contrôlée d'une part par ses caractéristiques biophysiques intrinsèques au milieu et d'autre part par l'hydrodynamique locale en lien avec la présence des bancs d'accumulation actifs. La stabilité passée de la berge, les apports sédimentaires locaux, la position des points de contrainte, l'état actuel des berges et la présence de bancs d'accumulation sont donc considérés dans cette évaluation. La notion de connectivité est aussi importante dans l'établissement du degré de vulnérabilité puisque la réponse d'une zone peut être amplifiée par le fait que le secteur amont et/ou aval est en érosion ou en accumulation et qu'il y a réorganisation locale des sédiments et de l'écoulement.

6.2.1 *Démarche d'évaluation*

La démarche d'évaluation de la vulnérabilité des berges proposée s'appuie sur les éléments clés et les indicateurs identifiés comme importants pour localiser les zones persistantes d'activité et évaluer l'amplitude des ajustements. La démarche d'analyse repose à la fois sur des éléments du paysage et sur des aspects dynamiques du milieu en lien avec les ajustements récents. Les étapes suivantes font partie de la démarche :

1. Localiser les points de contrôle et les sources sédimentaires majeures dans la vallée;
2. Délimiter les zones favorables à l'accumulation en lien avec la dynamique d'écoulement imposée par les variables du milieu (ex. : zone de bris de pente de la vallée ou de la rivière, zones de surdimensionnement, portion aval des méandres, embouchure des tributaires, ponts, ouvrages de stabilisation de berge, etc.);
3. Délimiter les zones à très haut potentiel d'accumulation et de forte activité en relation avec les points 1 et 2;
4. Analyser les photos aériennes historiques à des périodes hydrologiques clés afin d'établir l'amplitude des ajustements possibles dans le cas de la rivière étudiée et la position des anciens chenaux (périodes récentes);
5. Évaluer la tendance (locale) récente dans l'ajustement de la rivière en lien avec les périodes hydrologiques (CDDmax) et sédimentaires: phase dominante de rétrécissement ou d'élargissement du chenal, phase d'accumulation sédimentaire intra-chenal;
6. Évaluer le type d'ajustement probable de la rivière et localiser les zones à risque d'érosion de berges en relation avec la présence actuelle des bancs d'accumulation et leur stade d'évolution (ex. : ratio aire banc/aire chenal);

7. Évaluer les risques en lien avec les aspects dynamiques des zones actives en intégrant les fluctuations des débits et en qualifiant la séquence temporelle des débits (ex. périodes avec dominance de débits forts et modérés) représentatives du climat actuel et futur.

Les étapes 1 à 3 permettent de faire une première classification en termes des conditions favorables imposées par le milieu. L'étape 4 fournit un cadre pour délimiter les zones de migration passée de la rivière et par le fait même des indications concernant l'amplitude des ajustements locaux. Les étapes 5 à 7 permettent de situer temporellement le contexte d'ajustement actuel de la rivière. Cette étape est importante puisqu'elle détermine dans quelle phase la rivière se situe et vers quel état elle pourrait évoluer. L'identification de cette tendance devrait permettre d'éviter des interventions dans la direction opposée à celle poursuivie par la rivière.

6.2.2 Outil d'analyse

L'outil d'analyse développé sert de base pour documenter les différentes étapes énumérées dans la démarche d'évaluation. L'outil d'analyse s'appuie sur un système d'information géographique (ArcGis) pour intégrer et combiner un ensemble de variables. Les polygones d'analyse, issus de la discrétisation fine le long de l'axe central de la rivière, sont au cœur de l'outil. La discrétisation longitudinale permet de considérer les aspects dynamiques liés à l'évolution temporelle de la morphologie de la rivière, d'évaluer le rôle des bancs d'accumulation sur les processus actifs le long des rives à différentes périodes de temps et d'identifier les zones persistantes d'accumulation et d'activité. La discrétisation à l'échelle fine, la mise en relation spatiale des variables et le suivi temporel à cette même échelle sont des éléments originaux et uniques de l'outil ce qui a permis de confirmer plusieurs hypothèses de travail. Par exemple, nous avons validé l'influence des tributaires et des zones de contrainte, notamment les ponts, sur le continuum sédimentaire et les ajustements morphologiques de la rivière.

La mise en place de l'outil d'analyse est relativement simple et présente plusieurs avantages notamment en facilitant le suivi de l'évolution des ajustements le long des rives de la rivière et des bancs d'accumulation et en appuyant la planification des interventions en rivière et l'évaluation des risques. Dans cette optique, la mise à jour des bases de données est primordiale pour tenir compte des changements morphologiques récents de la rivière et pour bonifier et valider l'exactitude des variables liées à la persistance ou mobilité des formes et en conséquence de la dynamique des processus.

Les analyses des relations entre les variables et la création des variables secondaires sont faites à l'extérieur du SIG avant d'être réintégrées dans celui-ci. Les procédures utilisées pour les analyses ne sont pas encore regroupées dans un outil unique.

6.2.3 Scénarios hydrosédimentaires

Les projections hydrologiques réalisées pour la rivière Nicolet à partir des scénarios climatiques indiquent une augmentation de 5 à 10% de la fréquence des crues (nombre de jour où le débit est supérieur ou égal à la valeur du 75^e percentile) pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence. L'accroissement de la fréquence des crues augmente la

possibilité d'observer des événements pouvant mobiliser les sédiments du lit et des rives et de générer une séquence d'ajustement morphologique. Tel qu'indiqué par les résultats de cette étude, il importe de considérer la distribution temporelle des crues car celle-ci est déterminante pour caractériser le régime hydrologique d'une période et pour établir le contexte hydrosédimentaire pour la rivière. Les projections hydrologiques disponibles pour cette étude ne permettent pas d'analyser la répartition temporelle des crues. Il serait donc important dans les études qui suivront d'avoir accès à des séries temporelles de débits pour lesquelles il sera possible d'étudier la séquence d'occurrence des crues afin d'évaluer les effets morphologiques potentiels des changements hydro-climatiques anticipés.

En l'absence de séries temporelles des débits, il est possible d'élaborer différents scénarios et d'identifier celui ou ceux qui entraîneraient les effets morphologiques les plus marqués et d'évaluer par la suite la probabilité d'occurrence de ces scénarios.

Si on pose les prémisses suivantes : 1) le taux d'augmentation de 10% (référence vs futur) du nombre de jours où $Q \geq 75^{\text{e}}$ percentile est plausible malgré le biais des débits simulés par rapport aux observations; 2) le taux est applicable pour les deux rivières étudiées et 3) le taux d'augmentation du nombre de jours où $Q \geq 75^{\text{e}}$ percentile équivaut au taux d'augmentation du nombre de jours où le débit est supérieur au débit de récurrence 2 ans. Il est possible de regarder où se situe la projection pour la période future par rapport aux observations des périodes passées. Les figures 2.36a et b montrent le nombre total de jours où $Q > Q_{2\text{ans}}$ par période de 30 ans pour la période historique. Les données sont représentées par saut de cinq ans. La période de référence de 1961-1990 est identifiée en vert. Pour les deux cas à l'étude, l'augmentation projetée (identifiée en noire) de la fréquence des débits supérieurs à $Q_{2\text{ans}}$ correspond à une fréquence similaire à ce qui a été observée au cours de la période 1966-1995. Cette période a été identifiée comme une période d'élargissement dans notre étude.

Dans les deux cas, la période récente de 1981-2010 correspond à une période où la fréquence des crues est réduite et à une période où l'on a pu identifier une tendance au rétrécissement du chenal. Par rapport à cette période récente de 1981-2010, les projections pour la période 2041-2070 indiquent qu'il y aurait une forte augmentation (76%) des crues morphogènes pour la Nicolet et une faible réduction (10%) pour la rivière De La Fourche,

Si les caractéristiques de la période de 2041-2070 représentent la période à venir dans la prochaine décennie, l'élargissement du chenal et l'accroissement des processus d'érosion seraient dominants pour la Nicolet. Pour la rivière De La Fourche, la tendance au rétrécissement du chenal pourrait se poursuivre et ce type d'ajustement pourrait être dominant. L'influence directe des bancs sur l'écoulement, l'érosion des berges et l'évolution de la rivière pourra cependant être accrue puisque la capacité de transport de la rivière sera moindre qu'actuellement et que les sédiments déjà présents dans le chenal ne seront pas transportés massivement.

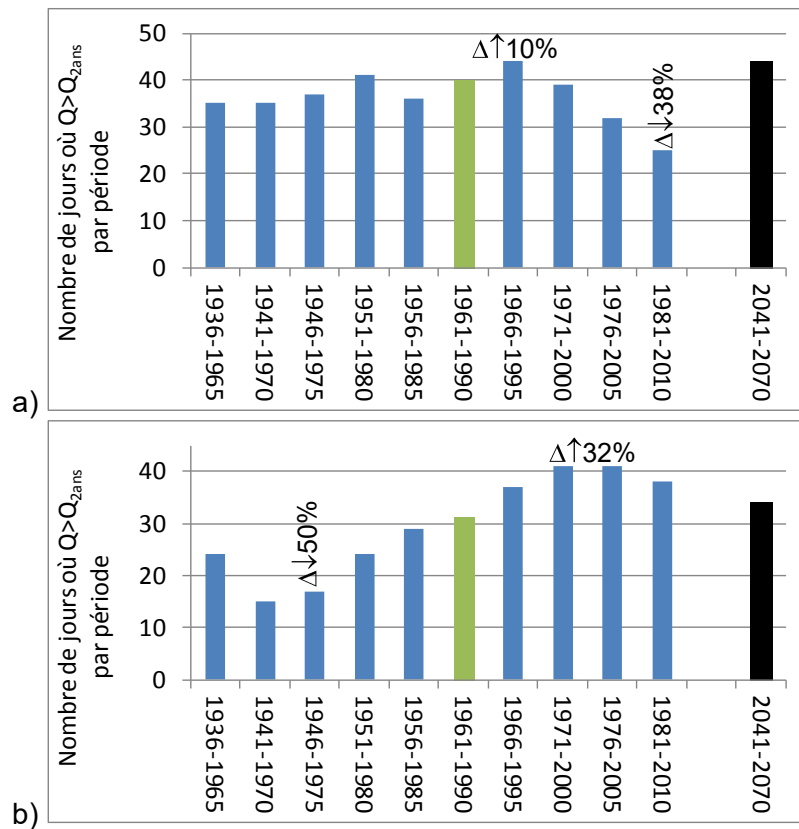


Figure 2.36 Nombre total de jours où le débit est supérieur au débit de récurrence 2 ans par période de 30 ans (saut par tranche de 5 ans). a) Rivière Nicolet Sud-Ouest; b) rivière Du Sud. Les données observées et la projection d'une augmentation de 10% pour la période future par rapport à la période de référence (en vert) sont représentées. Les pourcentages indiquent les différences par rapport à la période de référence.

7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif global du projet était de développer et de tester une approche d'analyse permettant l'identification de zones actives de la rivière, d'évaluer la vulnérabilité des rives en prenant en considération le continuum sédimentaires et les contraintes à la migration latérale et aux ajustements verticaux du chenal. Cet objectif a été atteint. L'outil a été appliqué avec succès sur deux rivières de piémont où la charge de fond est importante. L'outil et la démarche d'évaluation peuvent être appliqués sur d'autres rivières du même type. Les résultats obtenus peuvent aussi être transférés puisque plusieurs des indicateurs clés sont facilement identifiables.

Les zones proximales des zones persistantes d'accumulation sédimentaire et d'instabilité sont des zones préférentielles où les ajustements ont lieu dans la rivière. Il est par conséquent impératif de minimiser les interventions dans ces zones. Une approche par « espace de liberté » est à privilégier dans ces zones, autant que faire se peut, afin de favoriser l'ajustement local et naturel de la rivière.

Il importe aussi d'interpréter les impacts morphologiques associés à l'occurrence d'une forte crue en rapportant celle-ci dans le contexte hydrologique des périodes récentes afin d'identifier dans quelle tendance globale celle-ci s'insère. Cette remise en contexte temporel permet de mieux envisager les interventions à privilégier et à calibrer les dimensions de la rivière lorsque cela s'avère le seul recours. Mettre en place des ouvrages de stabilisation de berge en remodelant le chenal aux dimensions initiales pourrait être risqué et inutile dans un contexte où la tendance à observer des débits supérieurs à la moyenne est initiée et que conséquemment la rivière est en phase d'élargissement.

Il est ainsi recommandé de définir les stratégies d'intervention en tenant compte des caractéristiques de la période hydrologique, de la sensibilité des lieux et de l'amplitude et du type d'ajustement morphologique de la rivière observées localement par le passé et attendus en fonction des caractéristiques locale des bancs d'accumulations.

La formation et la sensibilisation des gestionnaires, des riverains et des intervenants en rivière est un atout pour accroître la compréhension du fonctionnement des rivières, pour favoriser les échanges et pour éventuellement innover dans les approches d'intervention.

8 RÉFÉRENCES

- Alber A. et H. Piégay (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125, 343–360.
- Auger, P. et J. Baudrand (2004). Gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec : cadre de référence pour les organismes de bassins versants prioritaires, Québec, ministère de l'Environnement, Direction des politiques de l'eau, Envirodoq no ENV/2004/0009, 26 p.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier and A.G. Roy (2010). Impact of climate change on the hydrology of St-Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, 384: 65-83.
- Boyer, C., A.G. Roy, C. Ou , A. St-Hilaire et J. Cardille (2012). Intégration des données spatiales et temporelles pour une gestion optimale des berges dans un contexte de changements environnementaux (résultats rivière Nicolet), 33p.
- Boyer C. A.G. Roy et L. Chaput-Desrochers (2013). Vulnérabilité des berges dans un contexte de changements environnementaux : Application du concept de continuum sédimentaire, Rapport, 39 p.
- Carbonneau P., M. A. Fonstad, W. A. Marcus and S.J. Dugdale (2012). Making riverscapes real, *Geomorphology*, 137, 1, 74–86.
- Church, M. and S. Rice (2009). Form and growth of bars in a wandering gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1422–1432.
- Conseil de la science et de la technologie (2010) Gestion durable des ressources en eau au Québec : les défis de l'intégration et les enjeux de recherche associés Perspectives STS, 94 p.
- Dauphin, K. (2009). Diagnostic du bassin versant de la rivière Nicolet, Corporation pour la promotion de l'environnement de la rivière Nicolet, 88 p.
- Formann E., H.M. Habersack and St. Schober (2007). Morphodynamic river processes and techniques for assessment of channel evolution in Alpine gravel bed rivers. *Geomorphology* 90, 340–355.
- Fryirs K.A., G.J. Brierley, N. J. Preston and J. Spencer (2007). Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the Upper Hunter catchment, New South Wales, Australia, *Geomorphology*, 84, 297–316.
- Gaeuman D., J.C. Schmidt and P.R. Wilcock (2005). Complex channel responses to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah. *Geomorphology*, 64, 185–206.
- Gouvernement du Québec, Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2, a. 2.1).
- Habersack H. and H. Piégay (2008). River restoration in the Alps and their surrounding: past experience and future challenges. In H. Habersack, H. Piégay, M. Rinaldi eds : *Gravel Bed Rivers 6: From Process Understanding to River Restoration*, 703-738.
- Ham D.G. (2005). Morphodynamics and sediment transport in a wandering gravel-bed channel: Fraser River, British Columbia. PhD Thesis, University of British Columbia, 272 p.

- Hey R.D. and C. Thorne (1986). Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 8, 671-689.
- Hooke J.M. (1986). The significance of mid-channel bars in an active meandering river. *Sedimentology*, 33, 839-850.
- Hooke, J.M. (2007). Spatial variability mechanisms and propagation of change in an active meandering river. *Geomorphology*, 84, 277–296.
- Hooke J.M. and L. Yorke (2010). Rates distributions and mechanisms of change in meander morphology over decadal timescales, River Dane, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1601-1614.
- Hooke J.M. and L. Yorke (2011). Channel bar dynamics on multi-decadal timescales in an active meandering river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1910-1928.
- IPCC Technical Paper VI – (2008). Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof, Eds. IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.
- Liébault F. and H. Piégay, (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 425–444.
- Lewin J. (1976). Initiation of bedforms and meanders in coarse-grained sediment. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 281–285.
- Luchi R., J.M. Hooke, G. Zolezzi and W. Bertoldi (2010). Width variations and mid-channel bar inception in meanders: River Bollin (UK). *Geomorphology*, 119, 1-8.
- Moretto J., E. Rigon, L. Mao, L. Picco, F. Delai and M.A. LENZI (2013). Channel adjustments and island dynamics in the Brenta River (Italy) over the last 30 years. *River research and applications*, DOI: 10.1002/rra.2676
- Neiman, R.J. and H. Décamps (1997). The ecology of interfaces: Riparian Zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 621-658.
- Opperman, J.J., R. Luster, B. A. McKenney, M. Roberts and A. W. Meadows (2010). Ecologically Functional Floodplains: Connectivity, Flow Regime, and Scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 46:211-226.
- Ou, C., A. St-Hilaire, C. Boyer, A.G. Roy et T.B.M.J. Ouarda (2012). Hydrological time series analysis for Nicolet river basin, under reference and future climate scenarios, 249p.
- Ouranos (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois, Montréal (Québec), 2010, 48 p.
- Pahl-Wostl, C., M. Craps, A. Dewulf, E. Mostert, D. Tabara, and T. Taillieu (2007). Social learning and water resources management. *Ecology and Society*, 12, 5, 1-19.
- Piégay H., S.A. Darby, E. Mosselmann and N. Surian (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications* 21, 773-789.
- Piégay H., B. Belletti and F. Liébault (2009). Typologie de rivières en tresses du bassin RMC, Rapport de l'année 1. 105 p.

Thorne C., R.G. Allen and A. Simon (1996). Geomorphological river channel reconnaissance for river analysis, engineering and management. Transactions of the Institute of British Geographers New Series, 21, 3, 469-483.

Toone J., (2009). Geomorphological discontinuities and ecological organisation: a case study of the River Drome. Unpublished thesis, 203 p.

Toone J., S.P. Rice and H. Piégay (2014). Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river: contingent responses to external and internal controls ». Geomorphology, 205, 5-16.

9 ANNEXES

Rapports disponibles:

Ou, C., A. St-Hilaire, C. Boyer, A.G. Roy et T.B.M.J. Ouarda (2012). Hydrological time series analysis for Nicolet river basin, under reference and future climate scenarios, Research report, INRS-ETE, 249 pages

- Ce rapport présente les analyses hydrologiques des séries historiques et simulés (période de référence et future) pour trois stations de jaugeage situées dans le bassin de la rivière Nicolet : Nicolet, Nicolet Sud-Ouest et Bulstrode.

Boyer, C., A.G. Roy, C. Ou, A. St-Hilaire et J. Cardille (2012). Intégration des données spatiales et temporelles pour une gestion optimale des berges dans un contexte de changements environnementaux (résultats rivière Nicolet), 33p.

- Ce rapport contient les résultats détaillés de l'étude effectuée sur les rivières Nicolet et Nicolet Sud-Ouest. Ce rapport a été soumis à Ouranos en octobre 2012.

Boyer C. A.G. Roy et L. Chaput-Desrochers (2013). Vulnérabilité des berges dans un contexte de changements environnementaux : Application du concept de continuum sédimentaire, Rapport, 39 p.

- Ce rapport contient les résultats détaillés de l'étude effectuée sur la rivière De La Fourche. Ce rapport a été soumis à Ouranos en juin 2013.

Ateliers :

Au cours de la dernière phase du projet les résultats obtenus sur les rivières De La Fourche et Nicolet ont été exposés aux riverains, aux membres des comités de bassin versant et aux gestionnaires et aménagistes régionaux qui ont à intervenir en milieu fluvial dans différentes sections du bassin versant. Ce transfert de connaissance a été fait dans le cadre de trois ateliers organisés en partenariat avec les membres de Copernic (OBV de la rivière Nicolet) pour la rivière Nicolet et en partenariat avec le directeur de l'OBV de la Cote du Sud et le directeur des services d'inspection des cours d'eau.

Les ateliers visaient d'une part à donner une nouvelle perspective sur la rivière en mettant en évidence la variabilité spatio-temporelle naturelle des ajustements des rivières et en

fournissant des informations permettant de mieux comprendre les interactions entre les variables morphologiques et dynamiques de la rivière. Nous avons aussi échangé sur les façons d'intervenir en rivière et sur le concept « d'espace de mobilité ». Ce qui est une étape préliminaire pour ultimement favoriser l'implication sociétale dans l'élaboration de solutions et de stratégies efficaces et innovatrices de gestion.