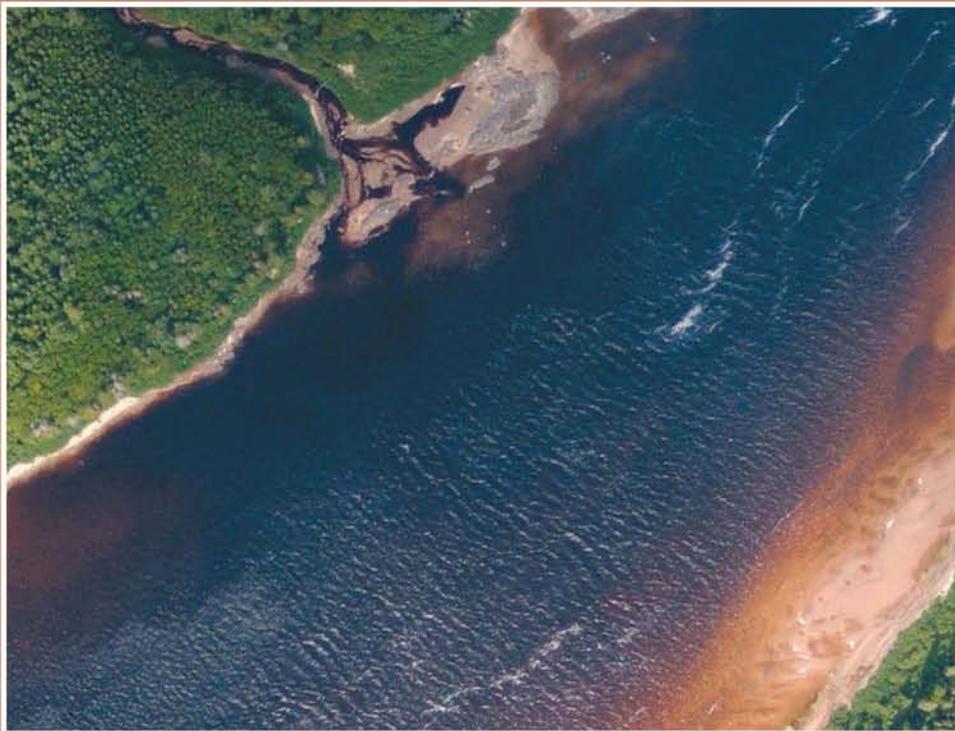


Complexe de ***la Romaine***

Rapport sectoriel

Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique



Septembre 2007



Complexe de la Romaine

Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Rapport sectoriel

HYDRO-QUÉBEC ÉQUIPEMENT

UNITÉ ENVIRONNEMENT

et

GENIVAR SOCIÉTÉ EN COMMANDITE

SEPTEMBRE 2007

Auteur(s) et titre (pour fins de citation) :

GENIVAR, 2007. *Complexe de la rivière Romaine – Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique*. Rapport sectoriel. Pelletier, P., Levasseur, M., Bouazza, Z., Delage, P.-L. et Hamdi, S. GENIVAR Société en commandite pour Hydro-Québec Équipement, Unité Environnement. 84 p. et annexes.

Contexte et objectifs :

Ce rapport sectoriel, qui accompagne l'étude d'impact de l'avant-projet de l'aménagement hydroélectrique du complexe de la rivière Romaine, a pour objectifs : 1) d'évaluer les impacts du changement du régime hydrologique sur la dynamique sédimentaire au droit des frayères à saumon de l'aménagement du complexe la Romaine et 2) d'évaluer la pertinence de procéder à des crues d'entretien visant à maintenir la qualité du substrat des frayères.

Résumé :

Hydro-Québec projette de réaliser sur la rivière Romaine un complexe hydroélectrique comprenant quatre centrales dotées de réservoirs, soit d'aval vers l'amont, les ouvrages de la Romaine-1, de la Romaine-2, de la Romaine-3 et de la Romaine-4. La mise en eau des réservoirs et l'exploitation du complexe de la Romaine entraîneront des modifications aux régimes hydrologique, hydraulique et sédimentaire, particulièrement en aval de la centrale de la Romaine-1. Le débit y sera régularisé, avec le même débit annuel moyen. Ces modifications pourraient affecter la dynamique sédimentaire au droit des frayères à saumon atlantique.

L'approche retenue pour caractériser les conditions hydrosédimentaires actuelles au droit des trois principales frayères à saumon consistait à procéder à une description détaillée de plusieurs variables à différents moments au cours d'un cycle annuel du développement des embryons de saumon. Cette caractérisation a été effectuée au moyen de cubes d'infiltration (nid artificiel), de trappes à sédiments, de turbidimètres et de chaînes d'érosion. Les résultats indiquent que le substrat des frayères du PK 34,5 et du PK 46 se détériore après la période de fraie (octobre). Cette dégradation de la qualité du substrat serait principalement associée au transport en charge de fond et aux processus d'infiltration, sauf durant la période hivernale qui est plutôt caractérisée par des processus de sédimentation. En conditions actuelles, tout indique que le substrat des frayères est principalement nettoyé par les géniteurs lors du creusement des nids en automne.

Un modèle numérique hydrosédimentaire du cours aval de la Romaine (PK 0,7 à PK 51,75) a été mis en œuvre afin d'évaluer les tendances à long terme de la dynamique sédimentaire. Les résultats montrent qu'au droit des frayères, il y aura une certaine tendance à l'érosion du substrat. Étant donné la compétence limitée de la rivière, cette érosion se limitera aux sables. Pour ce qui est des sables fins, les débits en conditions futures seront toujours au-dessus du débit minimum pour assurer leur transport par la rivière vers l'embouchure.

Il est aussi démontré qu'en conditions actuelles, les crues ne participent pas au maintien de la qualité du substrat des frayères, contrairement à ce qui est généralement observé sur d'autres rivières à saumon. Par conséquent, il n'est pas jugé nécessaire de procéder à des crues d'entretien pour assurer le maintien de la qualité du substrat de la Romaine.

Mots clés : Saumon atlantique, frayère, transport de sédiments, charge de fond, érosion, sédimentation, infiltration, crue d'entretien, modélisation hydrosédimentaire, rivière Romaine, Complexe de la Romaine.

Liste de distribution : Hydro-Québec Équipement, Unité Environnement.

Versión : Finale

Code de diffusion : Interne et externe

Date : Septembre 2007

Équipe de réalisation

Hydro-Québec ÉQUIPEMENT (Unité Environnement)

Responsable de l'étude : Michel Bérubé
Conseillère scientifique : Danielle Messier
Ingénieure en hydraulique : Isabelle Thériault

GENIVAR Société en commandite

Directeur de projet : Claude Théberge
Chargés de projet : Pierre Pelletier
Mylène Levasseur
Collaborateurs : Zoubir Bouazza
Pierre-Luc Delage
Samir Hamdi
Karine Lussier
Frédéric Lévesque
Louis Belzile
Steve Renaud
Techniciens : Carl Gauthier
Jacques Mercier
Guy Allard
Dominick Cuerrier
Michel Beurivage
Marie-Claude Julien
Sylvain Boulianne
Cartographes : Diane Gagné
Chantale Landry
Gilles Wiseman
Jean-Marc Tremblay
Traitement de texte et édition : Nancy Paquet
Patricia Castonguay

Aquamatik inc.

Collaborateur : Tewfik Mahdi

N° référence du consultant : B101304

Table des matières

	<i>Page</i>
Sommaire	iii
Équipe de réalisation	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des figures.....	xv
Liste des cartes.....	xvii
Liste des annexes.....	xvii
1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS GÉNÉRAUX	1
1.2 CONCEPTS THÉORIQUES DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE D'UN LIT DE RIVIÈRE	2
1.2.1 Structure typique d'un lit de rivière et caractéristiques spécifiques d'un nid de saumon.....	2
1.2.2 Différenciation entre les processus de sédimentation, d'infiltration et de transport intragravier des sédiments fins	3
1.2.3 Différenciation entre les processus de mise en transport des sédiments fins déposés et d'expulsion des sédiments fins infiltrés.....	4
1.3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	5
1.3.1 Premier objectif : description de la dynamique hydrosédimentaire actuelle.....	5
1.3.2 Deuxième objectif : prévision de la dynamique hydrosédimentaire en conditions futures	6
1.3.3 Troisième objectif : évaluation de la pertinence des crues d'entretien.....	6
2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE	7
2.1 TRONÇON PK 0 À PK 52,5.....	7
2.2 FRAYÈRES À SAUMON	8
3. DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DES FRAYÈRES EN 2005-2006	13
3.1 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	13
3.2 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE	13
3.2.1 Appareils d'échantillonnage	13
3.2.1.1 Cube d'infiltration.....	13

Table des matières (suite)

	<i>Page</i>
3.2.1.2 Trappe à sédiments	14
3.2.1.3 Chaîne d'érosion.....	14
3.2.1.4 Turbidimètre.....	15
3.2.2 Plan d'échantillonnage.....	15
3.2.2.1 Période d'installation des appareils d'échantillonnage.....	15
3.2.2.2 Cubes d'infiltration et trappes à sédiments	15
3.2.2.3 Chaînes d'érosion et turbidimètres	20
3.2.3 Bilan des campagnes d'échantillonnage.....	20
3.3 RÉSULTATS.....	20
3.3.1 État initial de la qualité du substrat des nids artificiels témoins	20
3.3.2 Évolution de la concentration en sédiments fins dans les nids artificiels durant la période d'incubation 2005-2006.....	21
3.3.2.1 Sédiments $\varphi \leq 2$ mm.....	21
3.3.2.2 Sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm.....	23
3.3.3 Variation du transport en charge de fond durant la période d'incubation 2005-2006.....	23
3.3.3.1 Analyse de la taille des sédiments récoltés par les trappes.....	23
3.3.3.2 Analyse de la mobilisation du pavement des frayères.....	26
3.3.4 Fluctuations de la turbidité de l'eau durant la période d'incubation 2005-2006.....	28
3.3.4.1 Description détaillée des résultats issus des turbidimètres.....	28
3.3.4.2 Liens avec le débit et les conditions hydrauliques spécifiques aux frayères.....	28
3.3.5 Faits saillants	30
3.4 DISCUSSION.....	31
3.4.1 Période automnale.....	31
3.4.2 Période hivernale.....	32
3.4.3 Période printanière.....	32
3.4.4 Synthèse et conclusion	33

Table des matières (suite)

	<i>Page</i>
4. MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE DU COURS AVAL DE LA ROMAINE	35
4.1 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	35
4.2 MÉTHODOLOGIE	35
4.2.1 Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire	35
4.2.1.1 Construction du modèle bathymétrique.....	36
4.2.1.2 Caractérisation du lit de la rivière Romaine.....	36
4.2.1.3 Imposition des conditions de niveaux et de débits aux frontières	36
4.2.1.4 Imposition des conditions de transport total à la frontière amont	37
4.2.1.5 Régime thermique des eaux	38
4.2.1.6 Régime des glaces.....	38
4.2.1.7 Pas de temps	38
4.2.2 Scénarios simulés et hydrologie.....	38
4.2.2.1 Conditions actuelles	39
4.2.2.2 Conditions futures	39
4.2.3 Bilans sédimentaires de la rivière Romaine en 2003 et 2004	39
4.2.3.1 Charge sédimentaire de l'année 2003 et 2004	39
4.2.3.2 Matière en suspension et charge de fond au PK 3,8	41
4.2.4 Étalonnage et validation	41
4.2.4.1 Aspect hydraulique.....	42
4.2.4.2 Aspect sédimentaire.....	42
4.2.5 Capacité de mobilisation du pavement des frayères.....	43
4.2.5.1 Équation utilisée pour la détermination de la contrainte de frottement critique	43
4.2.6 Crue d'entretien.....	44
4.3 DESCRIPTION DU SUBSTRAT ET DE LA CHARGE SÉDIMENTAIRE.....	46
4.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	48

Table des matières (suite)

	<i>Page</i>
4.4.1 Bilan sédimentaire global à long terme pour les conditions actuelles.....	48
4.4.2 Bilan sédimentaire global à long terme en conditions futures.....	49
4.4.2.1 Résultats des simulations hydrosédimentaires à long terme.....	49
4.4.2.2 Interprétation des résultats du modèle hydrosédimentaire ($\varphi > 0,125$ mm)	55
4.4.3 Bilan sédimentaire des sables fins ($\varphi \leq 0,125$ mm)	55
4.4.4 Capacité de mobilisation du pavement des frayères	56
4.4.4.1 Contrainte de frottement critique sur les frayères	56
4.4.4.2 Contrainte de frottement τ_0 sur les frayères	56
4.4.4.3 Débit minimum pour la mise en mouvement des sables fins ($\varphi < 0,125$ mm)	61
4.4.4.4 Synthèse	61
5. DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE AU DROIT DES FRAYÈRES EN CONDITIONS FUTURES	63
5.1 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	63
5.2 PRINCIPAUX PARAMÈTRES AFFECTANT LE BILAN SÉDIMENTAIRE	63
5.3 FRAYÈRE DU PK 34,5.....	64
5.3.1 Description générale du site	64
5.3.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures.....	64
5.3.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2$ mm)	64
5.3.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm).....	65
5.3.2.3 Influence du tributaire.....	65
5.3.2.4 Glace.....	65
5.3.2.5 Synthèse	65
5.4 FRAYÈRE DU PK 46.....	66
5.4.1 Description générale du site	66
5.4.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures.....	66
5.4.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2$ mm)	66

Table des matières (suite)

	<i>Page</i>
5.4.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm)	66
5.4.2.3 Influence du tributaire	67
5.4.2.4 Glace	67
5.4.2.5 Synthèse	68
5.5 FRAYÈRE DU PK 49	68
5.5.1 Description générale du site	68
5.5.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures	68
5.5.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2$ mm)	69
5.5.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm)	69
5.5.2.3 Glaces	69
5.5.2.4 Synthèse	69
6. DISCUSSION GÉNÉRALE	71
6.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS MENANT À LA CONCLUSION DE NE PAS PROCÉDER À DES CRUES D'ENTRETIEN SUR LA ROMAINE	71
6.2 EXAMEN DES MÉTHODES GÉNÉRALEMENT UTILISÉES POUR DÉTERMINER LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS D'ENTRETIEN	73
6.2.1 Méthodes basées sur l'analyse hydrologique	73
6.2.2 Méthodes basées sur la morphologie du cours d'eau	74
6.2.3 Méthodes basées sur la mécanique du transport sédimentaire	74
6.2.4 Interprétation des résultats issus de l'utilisation des différentes méthodes	75
7. CONCLUSION	77
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79

Liste des tableaux

	Page
Tableau 2-1. Sites caractéristiques du tronçon d'étude.	8
Tableau 3-1. Périodes et fonctions biologiques critiques du saumon de la rivière Romaine en conditions actuelles.	15
Tableau 3-2. Indices de qualité du substrat des échantillons témoins des frayères à saumon de la rivière Romaine en août-septembre 2005.	21
Tableau 4-1. Caractéristiques du lit de la rivière Romaine utilisées dans le modèle GSTARS.	37
Tableau 4-2. Charge sédimentaire de la rivière Romaine en 2003 et en 2004.	41
Tableau 4-3. Bilans sédimentaires de l'année 2003.	42
Tableau 4-4. Bilans sédimentaires de l'année 2004.	43
Tableau 4-5. Zones situées dans la plaine côtière de la rivière Romaine.	47
Tableau 4-6. Apports de sables fins des tronçons et des tributaires de la rivière Romaine entre le PK 290 et le PK 0.	47
Tableau 4-7. Répartition de la charge sédimentaire annuelle de la rivière Romaine entre le PK 53,5 et le PK 3,8.	48
Tableau 4-8. Bilan sédimentaire à long terme en conditions actuelles au PK 3,8 pour la période 1957-2000.	48
Tableau 4-9. Charge sédimentaire annuelle ($\phi > 0,125$ mm) par segment, en aval de la centrale de la Romaine-1.	53
Tableau 4-10. Contrainte de frottement critique pour les frayères à saumon.	56
Tableau 4-11. Contrainte de frottement sur les principales frayères à saumon de la rivière Romaine pour différentes périodes de retour.	57
Tableau 4-12. Débit minimum requis pour la mise en mouvement des sables fins.	61

Liste des figures

	<i>Page</i>
Figure 1-1. Processus de la dynamique sédimentaire.....	3
Figure 3-1. Évolution de la quantité (%) des sédiments ≤ 2 mm dans les cubes d'infiltration.	22
Figure 3-2. Évolution de la quantité (%) des sédiments $\leq 0,125$ mm dans les cubes d'infiltration.....	24
Figure 3-3. Pourcentage des différentes classes de sédiments récoltés par les trappes.	25
Figure 3-4. Variation temporelle du D90 dans les trappes à sédiments.	27
Figure 3-5. Variation de la turbidité de l'eau durant la période d'incubation 2005-2006.	29
Figure 3-6. Hydrogramme de la rivière Romaine au PK 16 – Station n° 073801 du MENV.	33
Figure 4-1. Hydrogramme moyen annuel de la rivière Romaine au PK 16 en conditions actuelles et futures.	40
Figure 4-2. Diagramme de Shields-Yalin d'après les équations de Julien (1998).	45
Figure 4-3. Tendence simulée du comportement sédimentaire ($\varphi > 0,125$ mm) dans la Romaine en conditions futures.	50
Figure 4-4. Transport total ($\varphi > 0,125$ mm) au droit des sections de la Romaine en conditions futures.	51
Figure 4-5. Transport total ($\varphi > 0,125$ mm) au droit des sections de la Romaine en conditions actuelles et futures.	52
Figure 4-6. Charge sédimentaire annuelle ($\varphi > 0,125$ mm) en aval de la centrale de la Romaine-1 en conditions actuelles et futures.....	54
Figure 4-7. Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 34,5.....	58
Figure 4-8. Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 46.....	59
Figure 4-9. Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 49.....	60

Liste des cartes

	<i>Page</i>
Carte 2-1.	Localisation de la zone d'étude. 9
Carte 2-2	Localisation des principales frayères à saumon atlantique. 11
Carte 3-1.	Localisation des appareils d'échantillonnage sur la frayère du PK 34,5..... 17
Carte 3-2.	Localisation des appareils d'échantillonnage sur la frayère du PK 46. 18
Carte 3-3.	Localisation des appareils d'échantillonnage sur la frayère du PK 49. 19

Liste des annexes

Annexe 1	Lexique
Annexe 2	Photographies aériennes à haute résolution XEOS ^{MC} de la zone d'étude
Annexe 3	Description des appareils d'échantillonnage des frayères
Annexe 4	Récupération des appareils d'échantillonnage des frayères
Annexe 5	Données brutes de l'échantillonnage au droit des frayères
Annexe 6	Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75
Annexe 7	Description du modèle GSTARS
Annexe 8	Détermination des contraintes de frottement (force tractrice) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine

1. Introduction

1.1 Problématique et objectifs généraux

La rivière Romaine se jette dans le golfe du Saint-Laurent à environ 15 km à l'ouest de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord. Hydro-Québec projette d'y réaliser un complexe hydroélectrique de quatre centrales dotées de réservoirs, soit d'aval vers l'amont, les ouvrages de la Romaine-1, de la Romaine-2, de la Romaine-3 et de la Romaine-4.

La mise en eau des réservoirs et l'exploitation du complexe de la Romaine entraîneront une modification des régimes hydrologique, hydraulique et sédimentaire¹ dans la rivière, particulièrement dans le tronçon compris entre l'embouchure (PK 0) et le point de restitution de la centrale de la Romaine-1 (PK 51,5). Dans ce tronçon, qui est fréquenté par le saumon atlantique, le module annuel est de 327 m³/s et le régime hydrologique actuel est typique des rivières de la Côte-Nord, c'est-à-dire caractérisé par des crues printanières généralement fortes (1 500 m³/s en moyenne) et des étiages hivernaux prononcés (entre 100 et 75 m³/s).

Ce régime naturel sera remplacé par un régime d'exploitation où le module annuel demeurera le même, mais où le débit variera généralement entre 200 et 400 m³/s, selon qu'un ou deux groupes turbines-alternateurs seront en fonction à la centrale de la Romaine-1. Or, cette modification du régime hydrologique pourrait modifier notablement la dynamique sédimentaire au droit des frayères à saumon atlantique (*Salmo salar*)².

En effet, il a été observé que la régularisation des cours d'eau entraîne souvent une modification de leur régime sédimentaire (Williams et Wolman, 1984; Wu et Chou, 2003). D'une part, l'écrêtement des crues en aval des ouvrages de retenue s'accompagne d'une baisse de la capacité de transport sédimentaire. D'autre part, les apports de l'amont en sédiments grossiers (sable grossier, gravier, cailloux, galets) sont éliminés par la rétention dans les réservoirs, tandis que les sables fins peuvent continuer, en bonne partie, à être transportés vers l'aval. Il peut en résulter une accumulation des sables fins dans les tronçons de la rivière où la capacité de transport est réduite (Wesche et coll., 1980; Wilcock et coll., 1996 a, b; Kondolf, 1997; Andrews et Nankervis, 1995; Annear, 2002).

1 Un lexique du vocabulaire spécifique à la dynamique hydrosédimentaire est fourni à l'annexe 1.

2 Le terme saumon est utilisé pour désigner le saumon atlantique dans ce document afin d'alléger le texte.

Une partie de ces sables fins peut se loger dans les interstices du substrat des frayères et s'y accumuler avec le temps, la rivière n'ayant plus la compétence de remanier le pavement du lit. Ce colmatage, en plus d'augmenter la proportion de sables fins dans le substrat, crée une sorte de compaction des matériaux qui peut nuire à la construction des nids par les géniteurs, diminuer la survie des œufs en incubation et affecter l'émergence des alevins (Hausle et Coble, 1976; Milhous, 1990; Diplas et Parker, 1985; Wilcock et coll., 1996 a, b; Arthington et coll., 1998; Bravard et Petit, 1997).

Une solution potentielle pour diminuer la détérioration de la qualité du substrat des frayères est la mise en place d'un programme de crues d'entretien. Une crue d'entretien consiste en un déversement contrôlé des eaux d'un réservoir de manière à imiter en partie l'action des crues naturelles (Wesche et coll., 1980; Wilcock et coll., 1996 a, b; Kondolf et Wilcock, 1996; Prowse et Culp, 2003).

Dans ce contexte, les objectifs généraux de la présente étude consistent à :

1. décrire les conditions hydrosédimentaires actuelles au droit des principales frayères à saumon de la Romaine;
2. prévoir les conditions hydrosédimentaires en conditions futures sur ces mêmes sites, à la suite de la régularisation du débit;
3. évaluer la pertinence de procéder à des crues d'entretien visant à maintenir la qualité du substrat des frayères.

1.2 Concepts théoriques de la dynamique sédimentaire d'un lit de rivière

1.2.1 Structure typique d'un lit de rivière et caractéristiques spécifiques d'un nid de saumon

La structure typique d'un lit de rivière est généralement subdivisée en trois couches distinctes, soit le pavement, le sous-pavement et le lit de base (Diplas et Parker, 1992) (figure 1-1). Les trois couches sont constituées d'une structure, formée de particules grossières et d'une matrice, qui correspond aux espaces entre les particules grossières, lesquels sont partiellement remplis par des sédiments plus fins (Church et coll., 1987). Par ailleurs, le pavement est composé de matériaux plus grossiers que le sous-pavement et est ainsi caractérisé par des interstices plus larges et plus nombreux (Frostick et coll., 1984; Kondolf, 2000). Plus le volume de vide est important, plus les sédiments fins transportés par l'écoulement peuvent s'infiltrer dans le substrat. De ce fait, un nid de saumon est plus enclin à subir

l'infiltration que le substrat environnant, puisque lorsque la femelle creuse le nid, elle modifie l'état du substrat en expulsant une certaine quantité de sédiments fins. Ceci a pour effet d'augmenter le volume de vide entre les particules les plus grossières, comparativement au substrat non modifié en périphérie du nid. Puisque la période de développement des embryons de saumon s'étend généralement d'octobre à juin sous nos latitudes, les événements hydrologiques qui surviennent durant cette période peuvent provoquer la mise en transport de sédiments et ainsi permettre aux processus d'infiltration des sédiments fins dans le substrat des frayères de se produire.

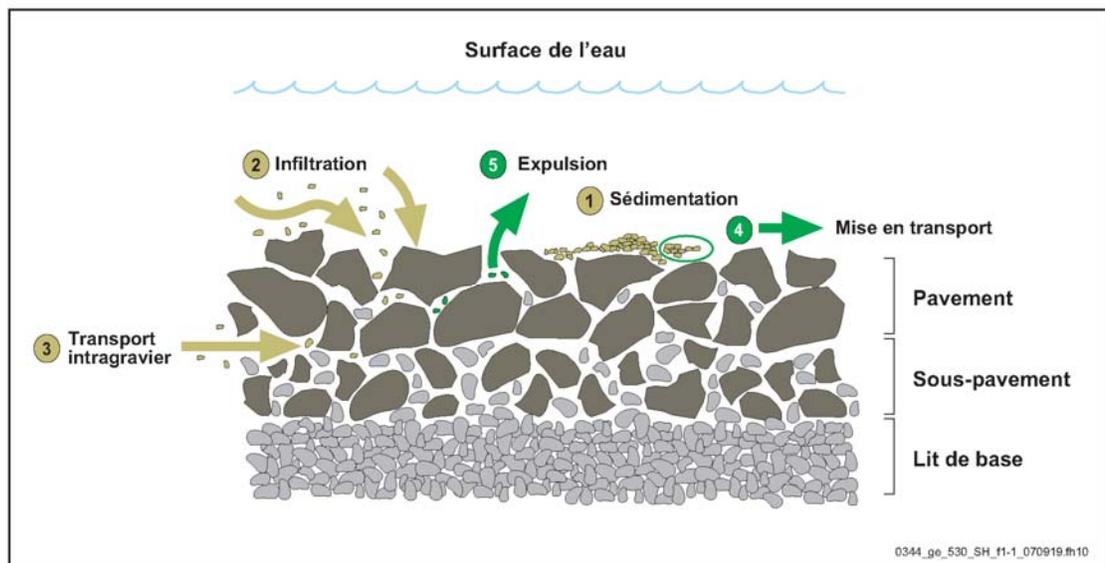


Figure 1-1. Processus de la dynamique sédimentaire.

Le volume de vide caractérisant un substrat, la disponibilité et les caractéristiques des sédiments fins transportés dans l'écoulement ainsi que les conditions hydrauliques, reliées à la capacité de transport de l'écoulement, sont les principales variables qui sont à la base des processus de sédimentation et d'infiltration des sédiments fins, qui sont deux processus très différents.

1.2.2 Différenciation entre les processus de sédimentation, d'infiltration et de transport intragravier des sédiments fins

La sédimentation (n° 1, figure 1-1) correspond à la chute des particules sur le lit de la rivière, par gravité, lorsque les vitesses de l'écoulement ne permettent plus de maintenir ces particules en transport, que ce soit en suspension ou en charge de

fond. La sédimentation survient lors d'une diminution de la vitesse. Malgré qu'une certaine quantité de ces particules tombe dans les interstices du substrat, la majorité d'entre elles se déposent à la surface du lit de la rivière. La période hivernale est particulièrement propice à ce processus, puisque la présence d'un couvert de glace augmente la résistance à l'écoulement, provoquant une augmentation du niveau d'eau et une diminution des vitesses, limitant ainsi la capacité de transport des cours d'eau (Beltaos et coll., 1993; Prowse, 1994). La sédimentation peut aussi survenir très localement, par exemple dans une fosse, puisque les vitesses de l'écoulement sont faibles à cet endroit. De ce fait, il est reconnu que les processus de sédimentation sont fortement reliés aux conditions d'écoulement.

En contrepartie, les processus d'infiltration (n° 2, figure 1-1) peuvent survenir dans toutes les conditions d'écoulement. Selon la littérature scientifique, ces processus seraient majoritairement associés aux événements de transport en charge de fond plutôt qu'en suspension, lesquels ne contribueraient, selon Lisle (1989), qu'à environ 20 % du matériel infiltré. Cette prédominance du transport en charge de fond s'explique entre autres par le fait que les particules transportées de cette façon sont en contact presque continu avec le lit, ce qui facilite l'accès aux interstices du substrat, comparativement aux particules transportées en suspension. De plus, lors d'événements hydrologiques favorisant le transport en charge de fond, les conditions d'écoulement (c.-à-d. vitesse et intensité turbulentes) sont plus favorables à la pénétration profonde des sédiments fins dans les interstices du lit de la rivière.

Enfin, en plus des processus de sédimentation et d'infiltration, le transport intragravier (n° 3, figure 1-1) est un autre processus pouvant expliquer l'augmentation de la quantité de sédiments fins dans le substrat. Les processus de sédimentation et d'infiltration s'effectuent à l'interface entre l'écoulement et le lit de la rivière, tandis que le transport intragravier correspond au déplacement des particules fines à l'intérieur du lit par l'écoulement intragravier. Selon Sear (1993), ce processus compterait pour 25 % de la quantité des sédiments fins présents dans un substrat.

1.2.3 Différenciation entre les processus de mise en transport des sédiments fins déposés et d'expulsion des sédiments fins infiltrés

Selon la littérature scientifique, pour ce qui est des processus de mise en transport des sédiments fins déposés sur le lit (n° 4, figure 1-1) ou des processus d'expulsion hors du lit des particules fines infiltrées en profondeur (n° 5, figure 1-1), l'intensité et

la durée des événements hydrologiques seraient les facteurs prédominants. En période de faible débit, la capacité de transport est faible et ne favorise que la mise en transport des sédiments fins déposés à la surface du pavement. À l'opposé, les événements d'écoulement d'intensité majeure (ex. crue) peuvent permettre de déloger hors du lit les sédiments fins infiltrés en profondeur (Diplas et Parker, 1992; Levasseur et coll., 2006b).

Mis à part les conditions d'écoulement (c.-à-d. vitesse et intensité turbulentes élevées) plus favorables à la mise en transport des sédiments, c'est la mobilisation des particules grossières du pavement qui permet aux sédiments fins coincés entre ces particules grossières d'être expulsés hors du lit. D'après Beschta et Jackson (1979), sans la mobilisation du pavement, aucun mécanisme n'est apparemment disponible pour déloger les sédiments fins infiltrés en profondeur. Par ailleurs, les résultats d'une étude récente (Levasseur et coll., 2006a) indiquent que les événements hydrologiques majeurs ne sont pas exclusivement associés à des événements d'expulsion des sédiments fins hors du lit, mais également parfois à des événements d'infiltration. Ces processus semblent aussi être contrôlés par d'autres variables, très locales, par exemple les conditions géomorphologiques des sites étudiés, les patrons d'écoulement locaux qui en découlent ainsi que la disponibilité et les sources de sédiments fins au droit des sites.

1.3 Approche méthodologique

Les processus et les facteurs qui régissent la dynamique sédimentaire en rivière sont relativement bien connus et décrits dans la littérature scientifique, mais ce n'est que récemment que l'on s'intéresse de façon plus approfondie à ce type de problématique dans le contexte d'une étude d'impact d'un projet hydroélectrique au Québec.

Cette section décrit l'approche générale utilisée pour atteindre les objectifs de cette étude.

1.3.1 Premier objectif : description de la dynamique hydrosédimentaire actuelle

L'approche retenue pour déterminer les conditions actuelles consiste à faire une description détaillée de l'état de la qualité du substrat, du transport en charge de fond et du transport en suspension au droit des principales frayères sur un cycle hydrologique annuel complet. Ces variables sont décrites ou mesurées à différents moments durant cette période à l'aide d'appareils d'échantillonnage appropriés (cubes d'échantillonnage imitant un nid de saumon, trappes à sédiments,

turbidimètre, chaînes d'érosion). Ensuite, elles sont mises en relation avec les événements hydrologiques afin de comprendre la dynamique hydrosédimentaire des frayères en conditions actuelles.

1.3.2 Deuxième objectif : prévision de la dynamique hydrosédimentaire en conditions futures

Pour prévoir la dynamique hydrosédimentaire au droit des frayères à saumon en conditions futures, il faut recourir à une modélisation hydrosédimentaire qui couvre l'ensemble du tronçon compris entre l'embouchure et le point de restitution de la centrale de la Romaine-1. Une telle modélisation permet, d'une part, d'intégrer les modifications que subiront les régimes hydrologique et sédimentaire à la suite de la mise en service du complexe hydroélectrique de la Romaine et, d'autre part, d'anticiper le comportement hydrosédimentaire des frayères de saumon à long terme en phase d'exploitation.

1.3.3 Troisième objectif : évaluation de la pertinence des crues d'entretien

La pertinence des crues d'entretien est évaluée en se basant sur le portrait de la dynamique sédimentaire en conditions actuelles et futures, obtenu à l'aide des relevés de terrain et de la modélisation. Elle est également basée sur l'analyse des contraintes de frottement (aussi désignées forces tractrices), qui sont utilisées afin de déterminer les débits requis pour mobiliser le substrat, évacuer les sédiments fins et nettoyer les frayères. L'analyse des contraintes de frottement est réalisée séparément pour chaque frayère, étant donné que chacune possède ses particularités relativement au substrat et aux conditions hydrauliques. Ainsi, une fois les débits nécessaires au nettoyage de chaque frayère connus, il est possible d'établir la nécessité ou non de faire des crues d'entretien, compte tenu des débits prévus en exploitation.

2. Description de la zone d'étude

La rivière Romaine a un débit annuel moyen de 327 m³/s à son embouchure et son bassin couvre une superficie de 14 470 km².

Ce cours d'eau est classé parmi les 118 rivières à saumon répertoriées au Québec. Le saumon peut remonter le tronçon principal jusqu'à la Grande Chute (située au PK 52,5), ainsi qu'une partie du bassin de la rivière Puyjalon (Schiefer, 1975; Shooner, 1975). La Grande Chute est infranchissable pour les poissons, mais la chute à Charlie, située au PK 35, constitue un obstacle sélectif à la montaison du saumon, puisqu'elle ne laisse passer qu'une partie de la population (GENIVAR, 2005).

L'aire couverte par la présente étude correspond au tronçon (PK 0 à PK 52,5) accessible au saumon, entre l'embouchure et le site prévu de la centrale de la Romaine-1, soit la Grande Chute (carte 2-1 et annexe 2 : photographies aériennes de la zone d'étude). Toutefois, une attention particulière sera portée aux trois principales frayères à saumon de la rivière, lesquelles sont situées au PK 34,5, 46 et 49.

2.1 Tronçon PK 0 à PK 52,5

La longueur de son cours principal, en aval de la centrale de la Romaine-1, est de 52,5 km et la dénivellation est approximativement de 20 m. Dans ce tronçon, la rivière est peu encaissée et s'écoule à travers une plaine argileuse recouverte de sable, où les tourbières abondent. Les écoulements y sont généralement lents ou, à tout le moins, de type fluvial. La rivière présente une succession de longs chenaux entrecoupés de quelques ruptures de pentes abruptes.

Deux chutes importantes permettent de diviser ce tronçon en trois secteurs de longueurs à peu près égales. Il s'agit de la chute de l'Église, au PK 16,1, et de la chute à Charlie, au PK 35. En amont du tronçon, au PK 52,5, se trouve la Grande Chute sur laquelle sera édifié le barrage de la Romaine-1. Le tableau 2-1 liste les sites caractéristiques du domaine d'étude.

La rivière Puyjalon, qui se jette principalement au droit du PK 11 de la rivière Romaine, est le seul tributaire d'envergure dans le tronçon situé en aval du PK 52,5. Son débit annuel moyen est de 34 m³/s.

Tableau 2-1. Sites caractéristiques du tronçon d'étude.

Endroit	Point kilométrique
Rapide à Brillant	0,7
Rivière Puyjalon	11,0
Chute de l'Église	16,1
Rapide à Ferdinand	30,6
Chute à Charlie	35,0
Sortie du canal de fuite de la Romaine-1 (projeté)	51,5
Grande Chute	52,5
Barrage de la Romaine-1 (projeté)	52,5

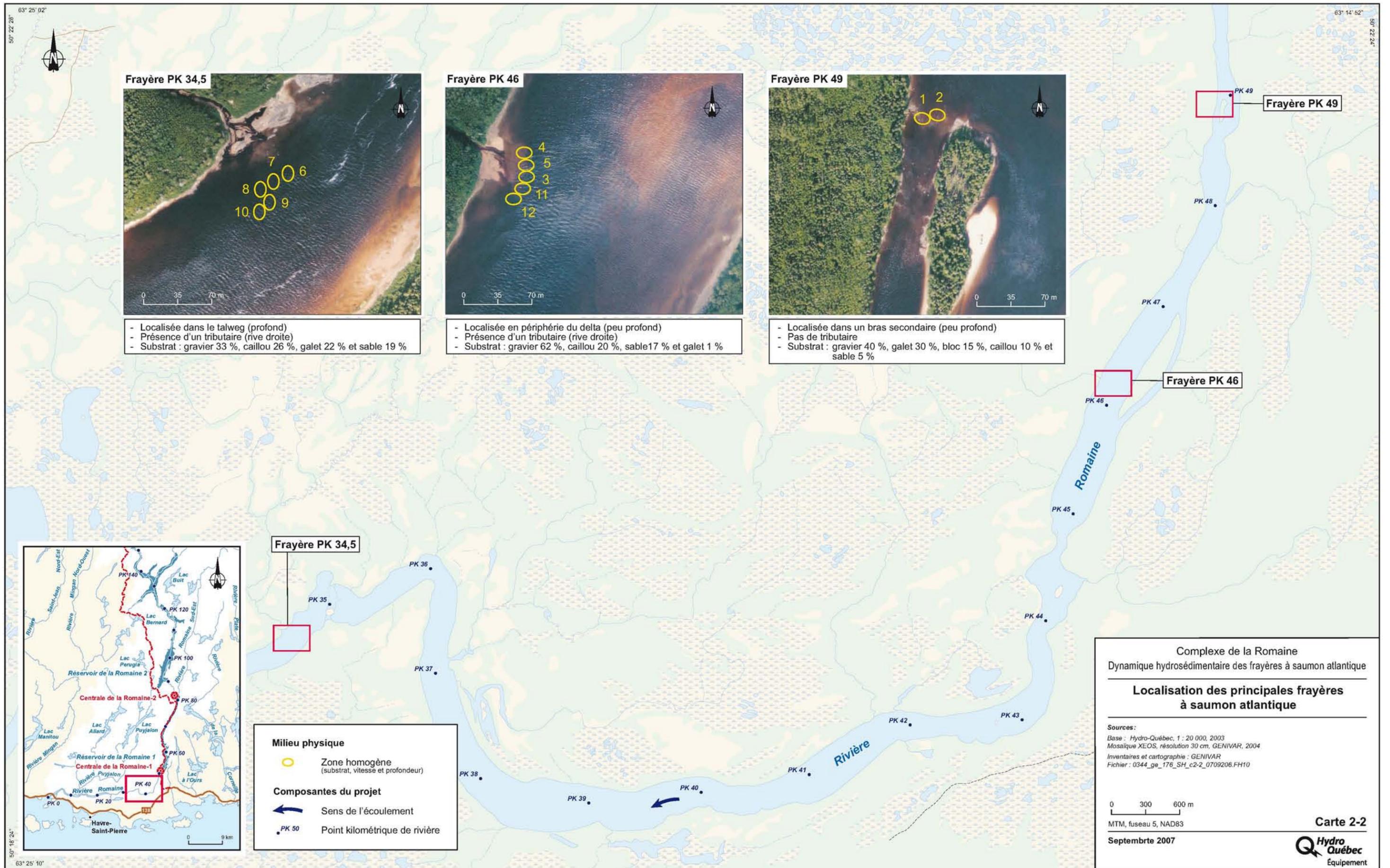
2.2 Frayères à saumon

Le contexte hydraulique et sédimentologique est très différent d'une frayère à l'autre. La frayère localisée au PK 34,5 est profonde (2 à 4 m) et située dans le talweg (carte 2-2). Elle possède un substrat principalement constitué de gravier (33 %), de cailloux (26 %), de galets (22 %) et de sable (19 %), qui est de bonne qualité pour la fraie. Immédiatement en amont de la frayère, en rive droite, un petit tributaire se jette dans la Romaine et pourrait influencer dans une certaine mesure les conditions sur la frayère.

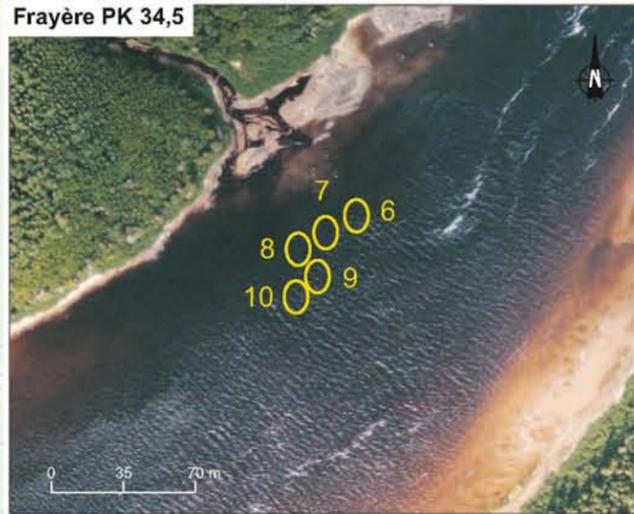
La frayère du PK 46 se trouve également à l'embouchure d'un tributaire situé en rive droite. De fait, elle est localisée en périphérie du delta de ce tributaire, en bordure du talweg de la Romaine (carte 2-2). Le substrat est composé de gravier (62 %), de cailloux (20 %), de sable (17 %) et de galets (1 %). Les vitesses et les profondeurs sont plutôt faibles sur le delta, mais plus élevées en périphérie de ce dernier, étant donné la proximité du talweg de la Romaine.

La frayère du PK 49 est située sur la tête d'un seuil dans un bras secondaire de la Romaine (carte 2-2). Le substrat y est plus grossier que celui des deux autres sites étudiés. Il est principalement constitué de gravier (40 %), de galets (30 %), de petits blocs (15 %), de cailloux (10 %) et de sable (5 %). Les vitesses d'écoulement observées et les profondeurs sont faibles en général. Lors d'années de faible hydraulité, le seuil est parfois exondé en période de fraie.

Mentionnons enfin que les deux frayères les plus fréquentées par le saumon sont celles des PK 34,5 et 46.

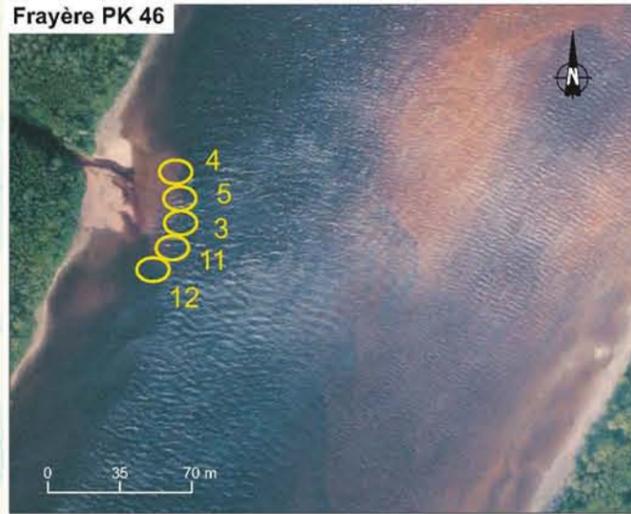


Frayère PK 34,5



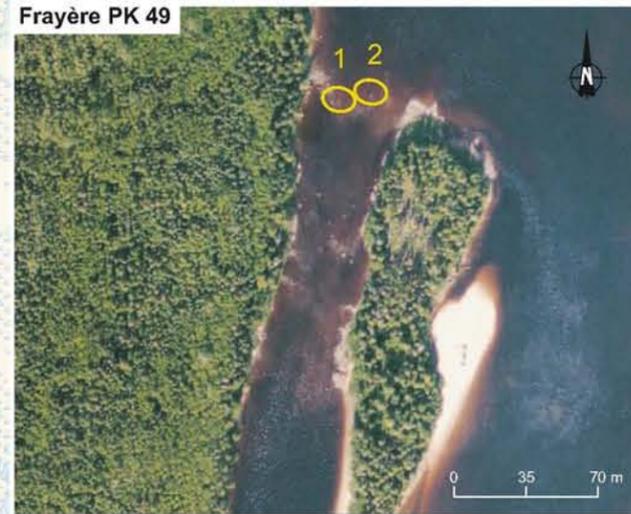
- Localisée dans le talweg (profond)
- Présence d'un tributaire (rive droite)
- Substrat : gravier 33 %, caillou 26 %, galet 22 % et sable 19 %

Frayère PK 46



- Localisée en périphérie du delta (peu profond)
- Présence d'un tributaire (rive droite)
- Substrat : gravier 62 %, caillou 20 %, sable 17 % et galet 1 %

Frayère PK 49



- Localisée dans un bras secondaire (peu profond)
- Pas de tributaire
- Substrat : gravier 40 %, galet 30 %, bloc 15 %, caillou 10 % et sable 5 %

Frayère PK 34,5



Milieu physique

Zone homogène (substrat, vitesse et profondeur)

Composantes du projet

Sens de l'écoulement

Point kilométrique de rivière

Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Localisation des principales frayères à saumon atlantique

Sources:
Base : Hydro-Québec, 1 : 20 000, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_176_SH_c2-2_0709206.FH10

0 300 600 m
MTM, fuseau 5, NAD83

Septembre 2007

Carte 2-2



3. Dynamique sédimentaire des frayères en 2005-2006

3.1 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de ce volet de l'étude sont 1) de déterminer l'état de la qualité du substrat de fraie en conditions actuelles et 2) de caractériser son évolution au cours d'une période d'incubation complète. Étant donné que les processus et les facteurs qui influencent la dynamique sédimentaire sont nombreux et complexes, il est nécessaire de caractériser de façon détaillée plusieurs variables au terrain.

Ce chapitre présente d'abord la démarche méthodologique (section 3.2), puis fait une description détaillée des résultats (section 3.3). Il livre ensuite, à la section 3.4, une interprétation de ces derniers, subdivisée de façon à analyser la dynamique sédimentaire pour trois périodes bien distinctes de la période d'incubation 2005-2006, soit l'automne, l'hiver et le printemps.

3.2 Démarche méthodologique

Afin d'atteindre les objectifs, quatre campagnes d'échantillonnage ont été menées sur les frayères du PK 34,5, du PK 46 et du PK 49, entre les mois de septembre 2005 et août 2006. Les sections suivantes présentent les appareils d'échantillonnage utilisés, le plan d'échantillonnage suivi ainsi que le bilan des différentes campagnes d'échantillonnage.

3.2.1 Appareils d'échantillonnage

3.2.1.1 Cube d'infiltration

Un nouveau dispositif d'échantillonnage a été utilisé pour déterminer la qualité du substrat des frayères à l'étude. Il s'agit du cube d'infiltration, développé récemment par Levasseur et coll. (2006b), dont une description détaillée est présentée à l'annexe 3. Cet appareil permet d'évaluer la qualité du substrat par la quantité de sédiments fins contenue dans un échantillon de sédiments. Il permet également de vérifier si la qualité du substrat se dégrade ou s'améliore dans le temps, en comparant le contenu en sédiments fins d'échantillons prélevés à des moments différents. Ainsi, une augmentation de la quantité de sédiments fins dans le substrat des échantillons indique qu'il y a eu sédimentation et/ou infiltration et/ou apport par le transport intragravier. À l'opposé, une diminution de la quantité de sédiments fins dans le substrat des échantillons suggère plutôt l'expulsion d'une certaine quantité de ces sédiments. Le principal avantage du cube d'infiltration est qu'il permet d'échantillonner dans un environnement qui reproduit le plus fidèlement possible les

caractéristiques morpho-sédimentologiques d'un nid naturel de saumon, qui diffèrent des caractéristiques du substrat environnant. À cet égard, cet appareil peut être considéré comme un nid de saumon artificiel.

3.2.1.2 Trappe à sédiments

Des trappes à sédiments ont aussi été installées sur chacune des frayères étudiées, puisque, selon la littérature, les processus d'infiltration sont généralement associés aux événements de transport en charge de fond. Comparativement au cube d'infiltration, qui contient du substrat et qui permet de déterminer la quantité de sédiments fins qui s'infiltrent ou se déposent dans le substrat de fraie, la trappe est un récipient vide qui permet de récolter l'ensemble des particules, de toutes tailles, qui sont transportées en charge de fond et en suspension. Il est à mentionner que les trappes ne permettent pas de tenir compte du transport intragravier. Les détails concernant cette technique d'échantillonnage sont présentés à l'annexe 3.

L'objectif principal des trappes à sédiments n'est pas de déterminer la quantité (ou volume) des sédiments transportés, mais plutôt d'évaluer la compétence de la rivière associée à des événements hydrologiques particuliers, à partir de la taille maximale des particules récoltées. Ainsi, à la suite d'un événement hydrologique particulier, il est possible de déterminer s'il y a eu ou non mobilisation du pavement de la frayère. Pour ce faire, il faut comparer le diamètre de la particule la plus grossière (D90) récoltée dans les trappes au diamètre moyen (D50) du substrat de la frayère étudiée. Ainsi, une valeur de D90 supérieure à la valeur du D50 du substrat de la frayère suggère une mobilisation du pavement, tandis qu'une valeur inférieure indique que le pavement n'a pas bougé.

Le cube d'infiltration et la trappe à sédiments fournissent des informations différentes, mais complémentaires. L'analyse conjointe des résultats issus de ces deux types d'appareils permet d'obtenir un portrait détaillé de la dynamique sédimentaire sur une frayère, en reliant les caractéristiques des événements hydrologiques à la compétence de l'écoulement et aux processus d'infiltration ou d'expulsion des sédiments fins contenus dans le substrat.

3.2.1.3 Chaîne d'érosion

Afin de compléter le plan d'échantillonnage avec les cubes et les trappes, deux chaînes d'érosion ont été installées sur chacune des frayères. Cet appareil permet de caractériser la chronologie des principaux événements d'érosion et de sédimentation survenant sur l'ensemble d'une période d'échantillonnage (détails présentés à l'annexe 3).

3.2.1.4 Turbidimètre

Afin d'obtenir des informations sur le transport en suspension, un turbidimètre a été installé sur chacune des trois frayères, puisque la turbidité est un bon indicateur de la matière en suspension (MES) dans ce type d'environnement. L'appareil, relié à un système d'acquisition de données, a permis d'enregistrer deux mesures de turbidité quotidiennement, et ce, de septembre 2005 à août 2006. Tout comme pour les autres appareils d'échantillonnage, la description détaillée de cet appareil apparaît à l'annexe 3.

3.2.2 Plan d'échantillonnage

3.2.2.1 Période d'installation des appareils d'échantillonnage

Tous les appareils d'échantillonnage, c'est-à-dire les cubes d'infiltration, les trappes à sédiments, les turbidimètres et les chaînes d'érosion, ont été installés entre le 11 août et le 15 septembre 2005, soit environ un mois avant la saison de reproduction du saumon en conditions naturelles (tableau 3-1). Cette période a été choisie afin, d'une part, de s'assurer de ne pas perturber les activités de reproduction et, d'autre part, de profiter des faibles débits facilitant les travaux au terrain.

Tableau 3-1. Périodes et fonctions biologiques critiques du saumon de la rivière Romaine en conditions actuelles.

Date	Fonction biologique critique
1 ^{er} au 31 octobre	Reproduction (fraie)
1 ^{er} novembre au 31 mai	Incubation des oeufs
1 ^{er} au 30 juin	Éclosion des œufs et émergence des alevins

Source : GENIVAR, 2006.

3.2.2.2 Cubes d'infiltration et trappes à sédiments

Zones homogènes

Chaque frayère a été subdivisée en zones homogènes, quant au substrat, à la profondeur et à la vitesse d'écoulement. Au total, cinq zones homogènes ont été délimitées sur les frayères du PK 34,5 et du PK 46 (cartes 3-1 et 3-2), tandis que seulement deux zones l'ont été sur celle du PK 49 (carte 3-3), puisque cette dernière est généralement la moins fréquentée par le saumon lors de la fraie. Chaque zone couvre une superficie d'environ 8 m².

À l'intérieur de chaque zone, quatre cubes d'infiltration (nids artificiels) ont été enfouis dans le substrat. Un premier cube est extrait aussitôt après son installation et constitue l'échantillon témoin, qui reflète la composition granulométrique d'un nid de saumon qui vient d'être creusé. L'extraction des autres cubes, à trois autres moments durant la période d'incubation, permet de connaître l'évolution de la qualité du substrat de fraie.

La majorité des cubes d'infiltration a été enfouie dans le substrat tel que décrit par Levasseur et coll. (2006b), à l'exception de ceux de la frayère du PK 49. Ces derniers n'ont pu être installés comme prévu, puisque la frayère était exondée lors de l'installation des appareils. Pour cette raison, les résultats relatifs aux cubes d'infiltration de la frayère du PK 49 ne sont pas présentés dans ce rapport.

Dans chaque zone homogène, trois trappes à sédiments ont également été enfouies dans le substrat à proximité des cubes d'infiltration. Ainsi, à chaque cube est associée une trappe à sédiments, à l'exception du cube témoin, puisque ce dernier est extrait du lit immédiatement après son installation. Dans l'optique d'échantillonner le transport en charge de fond pour différentes périodes de temps spécifiques, chaque trappe était installée avec un couvercle afin d'être activée au moment jugé opportun.

Périodes d'échantillonnage

À la suite de l'installation des cubes et des trappes et de l'extraction de l'échantillon témoin, l'échantillonnage a été répété à trois autres occasions durant la période d'incubation 2005-2006. À chaque fois, une paire cube-trappe était récoltée dans chaque zone homogène des trois frayères. Les trois occasions ci-dessous ont été sélectionnées dans le but d'évaluer l'effet de conditions hydrosédimentologiques qui peuvent modifier la dynamique sédimentaire de la rivière Romaine, tout en respectant les périodes biologiques critiques du saumon :

- début d'hiver (début février) : à la suite des crues d'automne afin d'en évaluer les effets (cubes-trappes en bleu, cartes 3-1, 3-2 et 3-3);
- fin d'hiver (fin mars) : juste avant le départ des glaces afin de caractériser l'effet de l'étiage hivernal et de la présence d'un couvert de glace stable (cubes-trappes en rose, cartes 3-1, 3-2 et 3-3);
- fin de l'été (août) : après le départ des glaces et la crue de printemps, afin de déterminer l'effet de la crue (cubes-trappes en vert, cartes 3-1, 3-2 et 3-3).

Zone homogène

Type d'appareil

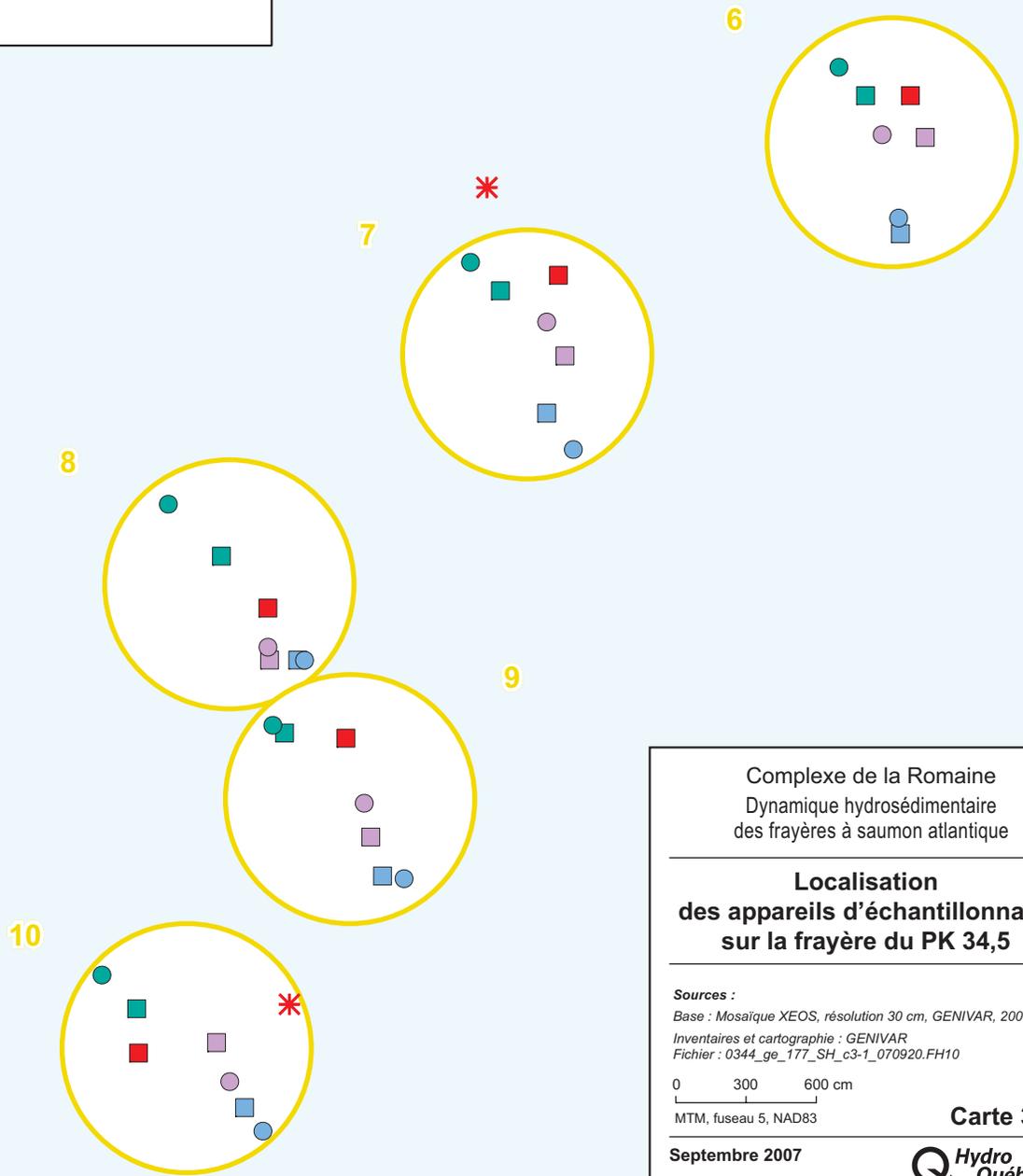
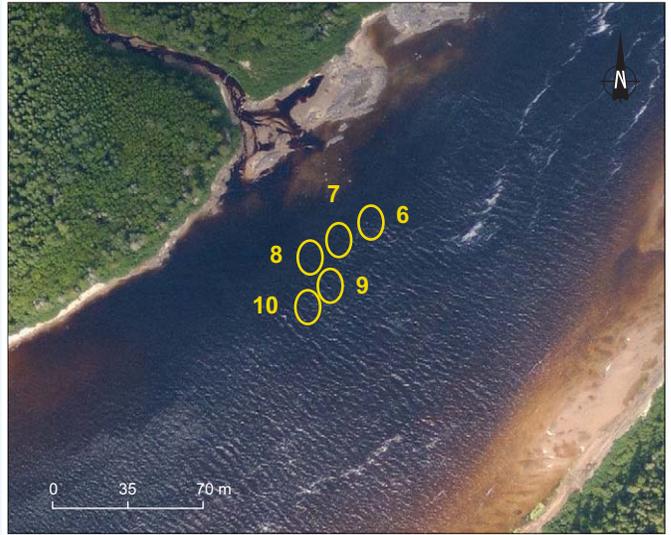
Numéro de la zone homogène

Type d'appareil d'échantillonnage

- Trappe à sédiment
- Cube d'infiltration
- ▲ Turbidimètre
- * Chaîne d'érosion

Période d'échantillonnage

- Septembre 2005 (échantillon témoin)
- Février 2006
- Mars 2006
- Août 2006



Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire
des frayères à saumon atlantique

**Localisation
des appareils d'échantillonnage
sur la frayère du PK 34,5**

Sources :
Base : Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_177_SH_c3-1_070920.FH10

0 300 600 cm
MTM, fuseau 5, NAD83

Septembre 2007

Carte 3-1
 Hydro Québec
Équipement

Zone homogène

Type d'appareil

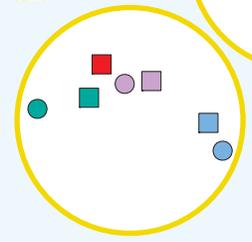
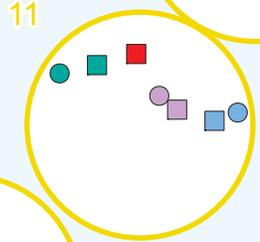
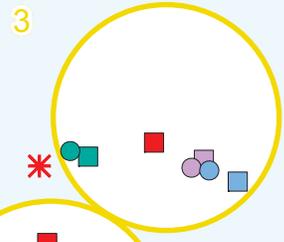
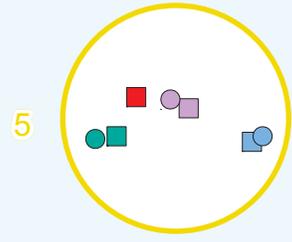
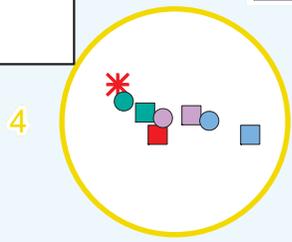
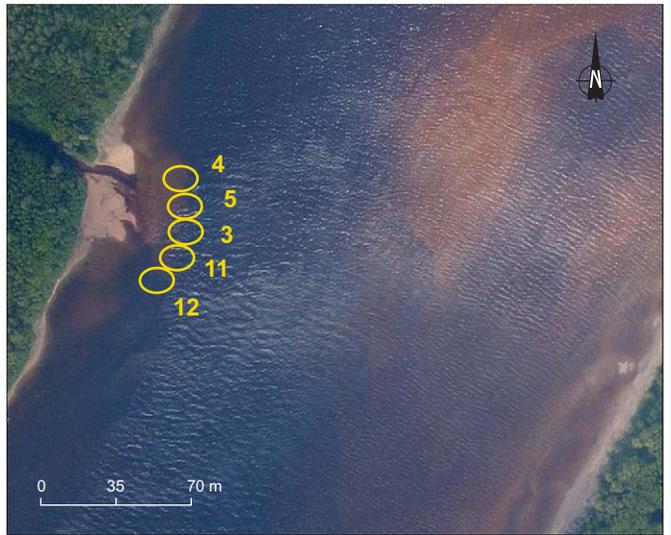
Numéro de la zone homogène

Type d'appareil d'échantillonnage

- Trappe à sédiment
- Cube d'infiltration
- ▲ Turbidimètre
- * Chaîne d'érosion

Période d'échantillonnage

- Septembre 2005 (échantillon témoin)
- Février 2006
- Mars 2006
- Août 2006



Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire
des frayères à saumon atlantique

**Localisation
des appareils d'échantillonnage
sur la frayère du PK 46**

Sources :
Base : Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_178_SH_c3-2_070920.FH10

0 300 600 cm
MTM, fuseau 5, NAD83

Septembre 2007

Carte 3-2
 Hydro Québec
Équipement

Zone homogène

Type d'appareil

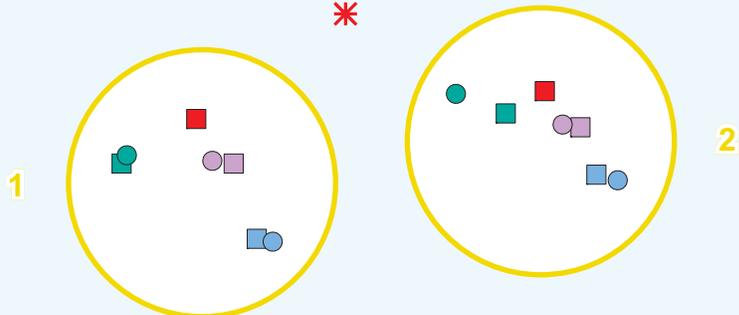
Numéro de la zone homogène

Type d'appareil d'échantillonnage

- Trappe à sédiment
- Cube d'infiltration
- ▲ Turbidimètre
- * Chaîne d'érosion

Période d'échantillonnage

- Septembre 2005 (échantillon témoin)
- Février 2006
- Mars 2006
- Août 2006



Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire
des frayères à saumon atlantique

**Localisation
des appareils d'échantillonnage
sur la frayère du PK 49**

Sources :
Base : Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_179_SH_c3-3_070920.FH10

0 300 600 cm
MTM, fuseau 5, NAD83

Septembre 2007

Carte 3-3
 Hydro Québec
Équipement

3.2.2.3 Chaînes d'érosion et turbidimètres

Lors de chacune des visites au terrain effectuées aux mois de février, de mars et d'août pour récolter des cubes et des trappes, une lecture des chaînes d'érosion était effectuée et les données enregistrées par le système d'acquisition de données de chaque turbidimètre étaient récupérées.

3.2.3 Bilan des campagnes d'échantillonnage

À la suite des différentes campagnes d'échantillonnage, la grande majorité des appareils a été récupérée et aucun problème d'échantillonnage majeur n'est survenu sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. Les détails concernant les échantillons manquants sont présentés à l'annexe 4. Il est à mentionner que le plan d'échantillonnage initial tenait compte d'une perte éventuelle d'un certain nombre d'échantillons et que ces éléments manquants n'affectent pas la qualité des résultats et des analyses qui en découlent.

3.3 Résultats

3.3.1 État initial de la qualité du substrat des nids artificiels témoins

Le tableau 3-2 présente les résultats d'analyse des échantillons témoins du substrat (c.-à-d. cubes en rouge sur les cartes 3-1, 3-2) qui ont été extraits des frayères du PK 34,5 et du PK 46 à la fin août-début septembre 2005³. Rappelons qu'en raison des contraintes d'installation des appareils, les résultats pour la frayère du PK 49 ne sont pas présentés.

Afin de déterminer la qualité du substrat de ces nids artificiels, deux indices largement utilisés dans la littérature ont été calculés, soit celui du pourcentage de sédiments dont la taille est inférieure ou égale à 2 mm ($\varphi \leq 2$ mm) et celui du pourcentage de sédiments dont la taille est inférieure ou égale à 0,125 mm ($\varphi \leq 0,125$ mm).

Les résultats montrent que les valeurs des deux indices granulométriques pour l'ensemble des échantillons des frayères du PK 34,5 et du PK 46 sont inférieures aux valeurs critiques établies dans la littérature (tableau 3-2). Ces résultats suggèrent que le substrat des échantillons témoins des deux principales frayères de la rivière Romaine est de bonne qualité au début de la période d'incubation.

3 Les données brutes associées à ces résultats ainsi que celles de l'ensemble des résultats provenant des cubes et des trappes sont fournies à l'annexe 5.

Tableau 3-2. Indices de qualité du substrat des échantillons témoins des frayères à saumon de la rivière Romaine en août-septembre 2005.

Frayère	Zone homogène	Indices granulométriques	
		$\varphi \leq 2 \text{ mm}^1$ (%)	$\varphi \leq 0,125 \text{ mm}^2$ (%)
PK 34,5	6	11,95	0,08
	7	18,29	0,14
	8	5,97	0,04
	9	7,86	0,09
	10	12,75	0,08
	Moyenne	11,36	0,09
	Écart type	4,79	0,04
PK 46	3	10,56	0,08
	4	13,73	0,14
	5	6,73	0,13
	11	4,84	0,05
	12	7,01	0,04
	Moyenne	8,57	0,09
	Écart type	3,55	0,05

1 Pourcentage de toutes les classes de sédiments de 2 mm et moins de diamètre (Peterson, 1978). Règle de décision : Si le % est inférieur à 20 %, le substrat est de qualité et assure une bonne survie des embryons.

2 Pourcentage de toutes les classes de sédiments de 0,125 mm et moins de diamètre (Levasseur et coll., 2006a). Règle de décision : Si le % est inférieur à 0,17 %, le taux de survie des embryons est supérieur à 75 %.

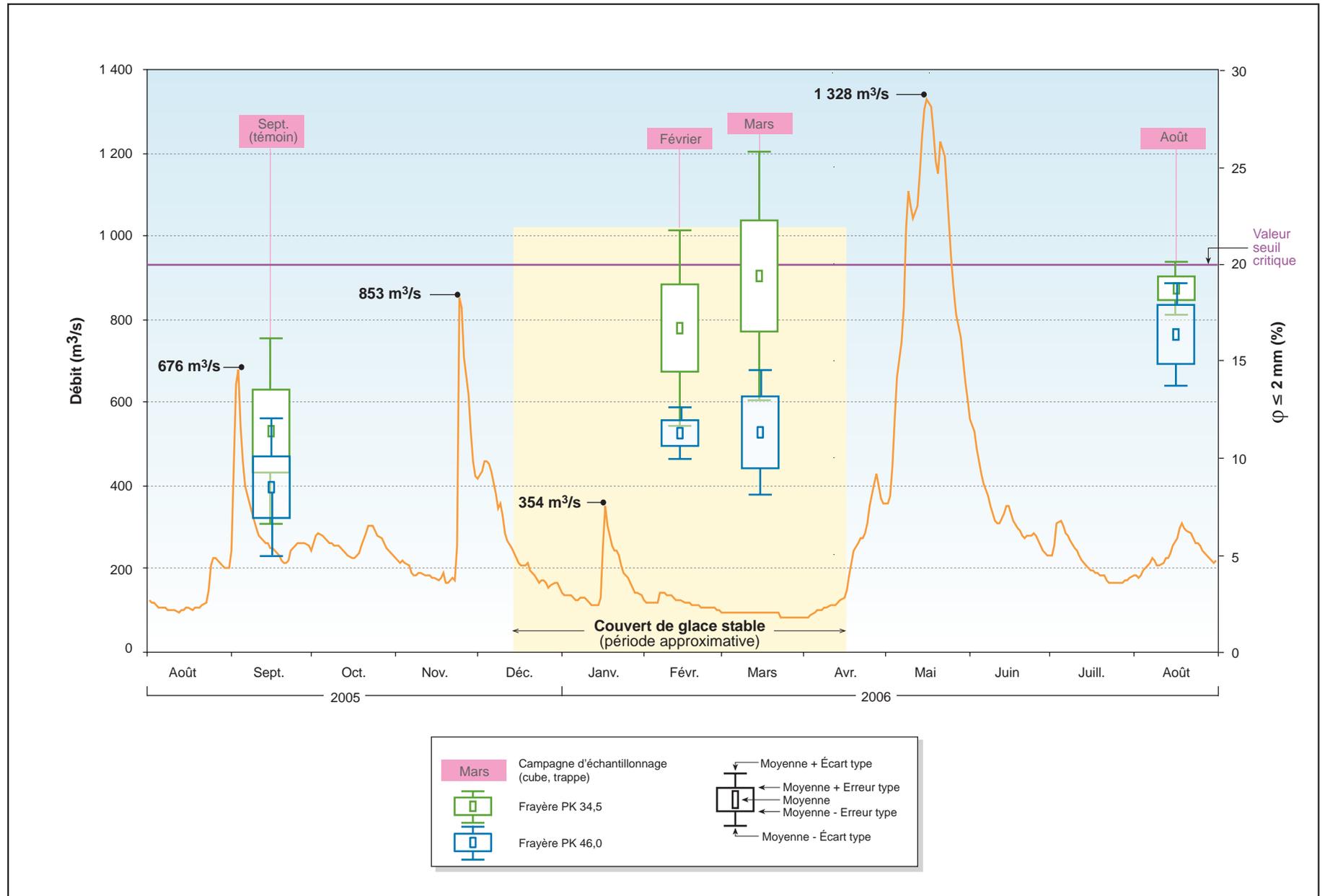
3.3.2 Évolution de la concentration en sédiments fins dans les nids artificiels durant la période d'incubation 2005-2006

3.3.2.1 Sédiments $\varphi \leq 2 \text{ mm}$

La figure 3-1 illustre la variation temporelle de la quantité de sédiments $\varphi \leq 2 \text{ mm}$, exprimée en pourcentage, contenue dans les nids artificiels des frayères du PK 34,5 et du PK 46 sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. De façon générale, on note une tendance à l'augmentation de la quantité de ces sédiments dans les nids artificiels, pour les deux frayères. Entre la campagne initiale de septembre 2005 et la campagne finale d'août 2006, l'augmentation a été similaire dans les deux frayères, soit en moyenne de 7,37 % au PK 34,5 et de 7,87 % au PK 46.

Malgré cette tendance à l'augmentation, les valeurs du pourcentage de sédiments $\varphi \leq 2 \text{ mm}$ dans les nids artificiels sont presque toutes inférieures à la valeur critique établie à 20 % (Peterson, 1978). Seule la campagne de mars pour la frayère du PK 34,5 (figure 3-1) fait exception. Une analyse détaillée des données montre en effet que deux des cinq nids artificiels possèdent des valeurs supérieures à 20 % pour cette période.

Figure 3-1 Évolution de la quantité (%) des sédiments $\varphi \leq 2$ mm dans les cubes d'infiltration



3.3.2.2 Sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm

Tout comme pour les sédiments $\varphi \leq 2$ mm, on observe une augmentation de la quantité des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm dans les nids artificiels tout au long de la période d'incubation 2005-2006 dans les frayères du PK 34,5 et du PK 46 (figure 3-2).

L'augmentation moyenne du pourcentage des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm dans les nids artificiels entre la première et la dernière campagne d'échantillonnage est légèrement plus importante à la frayère du PK 46 (0,44 %) qu'à la frayère du PK 34,5 (0,31 %).

Contrairement aux résultats obtenus pour les sédiments $\varphi \leq 2$ mm, le pourcentage en sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm de la majorité des nids artificiels des deux frayères est bien au-delà de la valeur critique établie à 0,17 % (Levasseur et coll., 2006a) et ce, dès la deuxième campagne de terrain qui a eu lieu en février (figure 3-2). Ces observations suggèrent que la qualité du substrat des principales frayères de la rivière Romaine s'est détériorée rapidement lors de la période d'incubation 2005-2006. L'état du substrat, environ cinq mois après la reproduction, ne correspond plus à des conditions favorisant de bons taux de survie, selon les valeurs seuils des deux indices utilisés.

3.3.3 Variation du transport en charge de fond durant la période d'incubation 2005-2006

3.3.3.1 Analyse de la taille des sédiments récoltés par les trappes

Les résultats indiquent que le transport en charge de fond est survenu sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006, puisqu'aucune trappe à sédiments extraite du lit des trois frayères étudiées lors des différentes campagnes d'échantillonnage n'était vide. L'analyse du contenu des trappes suggère que les sédiments transportés en charge de fond sur l'ensemble de la période d'incubation sont majoritairement des sables, des sables fins et des graviers. La figure 3-3 illustre la quantité des différentes tailles de sédiments, exprimée en pourcentage, contenue dans les trappes pour les trois frayères à l'étude, et ce, pour chacune des campagnes d'échantillonnage.

Figure 3-2 Évolution de la quantité $\varphi \leq 0,125$ mm dans les cubes d'infiltration

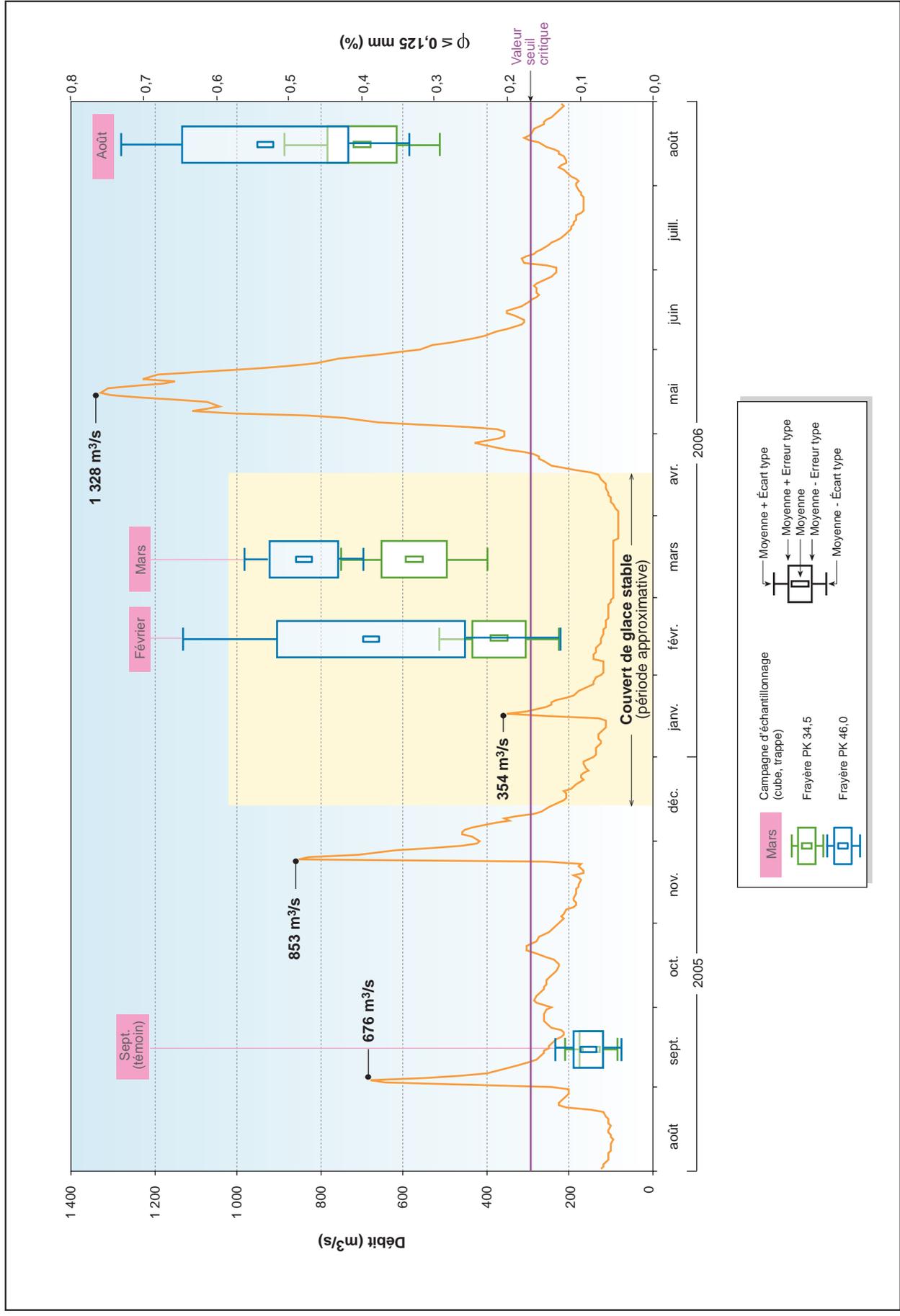
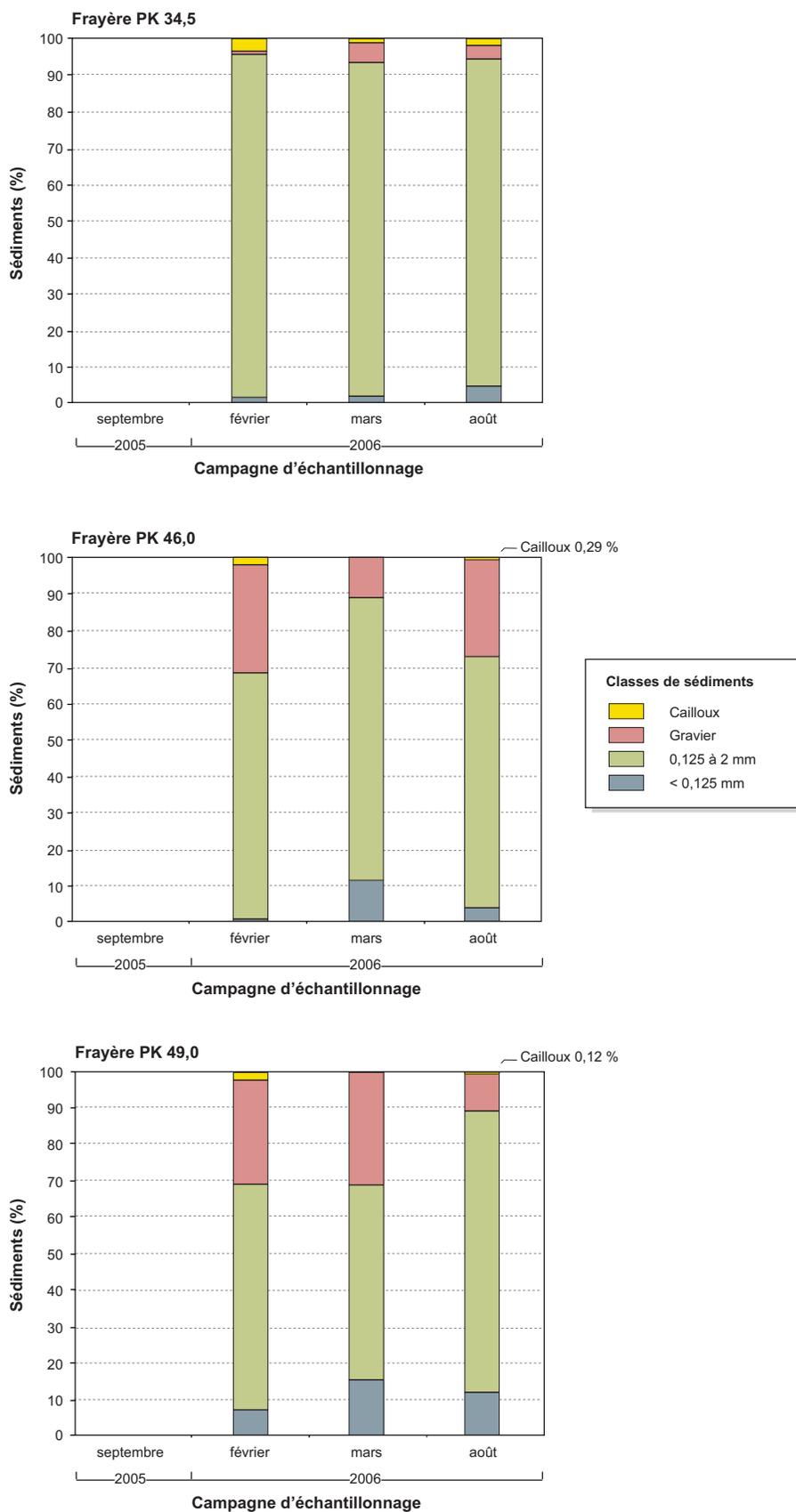


Figure 3-3 Pourcentage des différentes classes de sédiments récoltés par les trappes



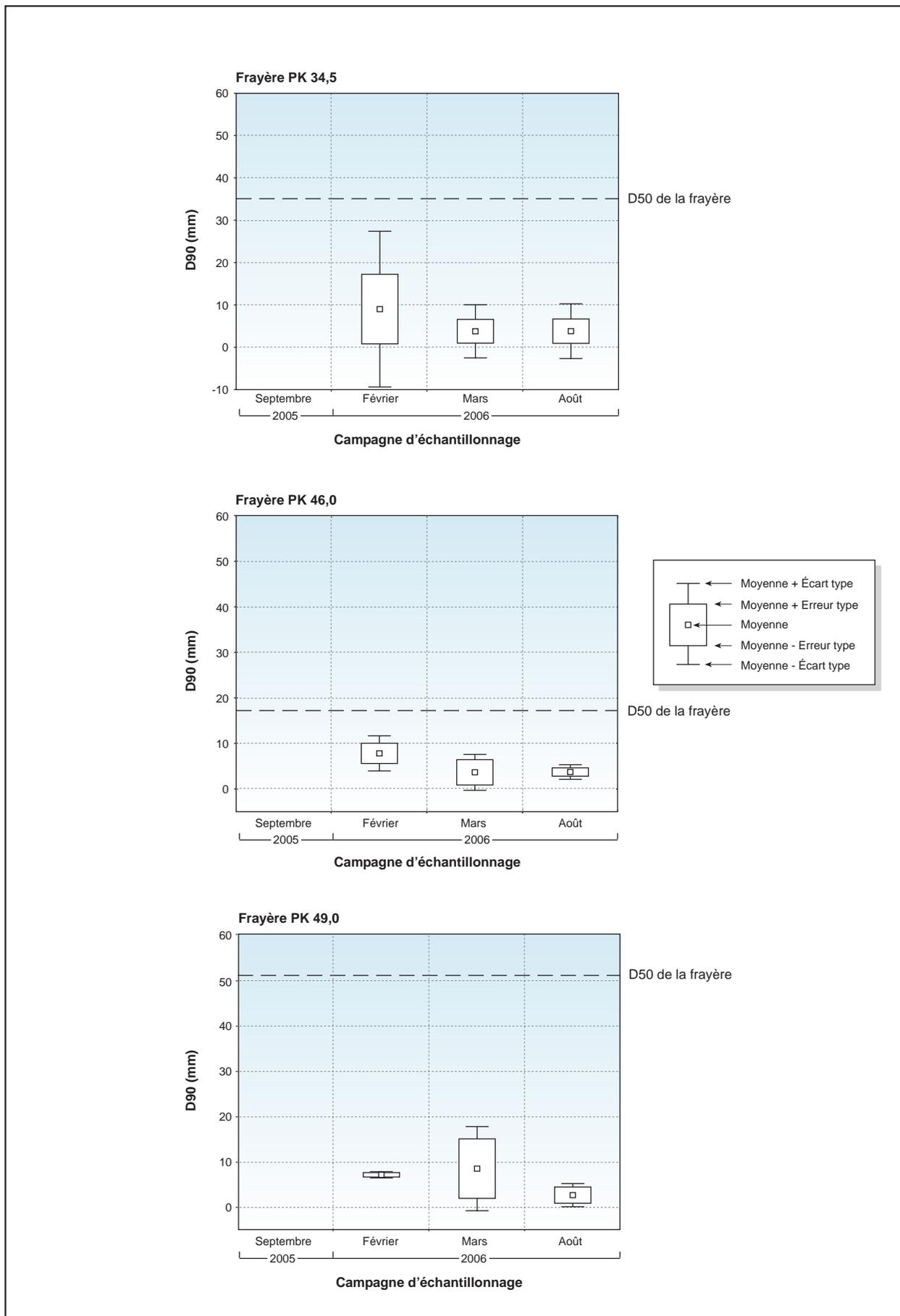
À la frayère du PK 34,5, le contenu des trappes est similaire pour l'ensemble des campagnes d'échantillonnage. Près de 95 % des sédiments récoltés sont des sédiments dont la taille est ≤ 2 mm, soit des sables, des sables fins, des silts, des limons et des argiles. Pour ce qui est de la frayère du PK 46, les sédiments récoltés sont un peu plus grossiers. De façon générale, les sables et sables fins représentent environ 70 % du contenu total et les graviers, près de 30 %. Seule la période d'échantillonnage entre février et mars 2006 fait exception, puisque le pourcentage des sédiments $\phi \leq 2$ mm contenus dans les trappes relevées en mars avoisine 90 % et que, de ce total, près de 12 % sont des sédiments $\phi < 0,125$ mm. Enfin, pour la frayère du PK 49, les résultats sont semblables à ceux de la frayère du PK 46. La majorité des sédiments récoltés sont des sables et des graviers. Par ailleurs, les quantités de sédiments $\phi < 0,125$ mm sont plus importantes sur cette frayère que sur celles du PK 34,5 et du PK 46, et ce, sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006.

3.3.3.2 Analyse de la mobilisation du pavement des frayères

Le contenu des trappes fournit également des informations sur la mobilisation du pavement des frayères entre les différentes périodes d'échantillonnage, comme mentionné à la section 3.2.1.2. La figure 3-4 présente les valeurs du D90 pour les trois frayères à l'étude. Puisque les valeurs du D90 issues de l'analyse du contenu des trappes sont inférieures aux valeurs du D50 du substrat de chacune des frayères, il est clair que le pavement des trois frayères n'a pas été mobilisé sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006, même lors de la crue printanière. Par ailleurs, il est nécessaire d'interpréter avec précaution le contenu de ces trappes, puisqu'il est difficile d'évaluer à quel moment elles ont cessé d'échantillonner lors de cette période. Puisque le transport de sédiments est sélectif, c'est-à-dire que les particules plus petites sont mises en transport avant les particules grossières, et que la quantité de sédiments fins est importante dans cette rivière, il est probable que les trappes aient été saturées rapidement de sédiments fins dès le début de la crue de printemps en 2006.

Deux résultats supportent cette hypothèse. D'une part, les valeurs du D90 des trappes récoltées en août, après la crue de printemps, sont plus faibles que celles des trappes récoltées en février (figure 3-4), et ce, malgré le fait que le débit maximum atteint lors de la crue de printemps était beaucoup plus important que les débits atteints lors de la période automnale. D'autre part, les résultats illustrés à la figure 3-3 montrent que les trappes relevées en automne ont capté des sédiments plus grossiers que les trappes relevées en août.

Figure 3-4 Variation temporelle du D90 dans les trappes à sédiments



3.3.4 Fluctuations de la turbidité de l'eau durant la période d'incubation 2005-2006

3.3.4.1 Description détaillée des résultats issus des turbidimètres

Au droit des trois frayères à l'étude, entre les mois de septembre 2005 et mars 2006, la turbidité est généralement constante et inférieure à 30 UNT (figure 3-5). Seule la période entre le début décembre et la fin janvier fait exception, avec des fluctuations de la turbidité. Durant cette période, la mise en place du couvert de glace a été perturbée par une crue causée par un redoux et qui semble avoir engendré un impact sur la turbidité de l'eau.

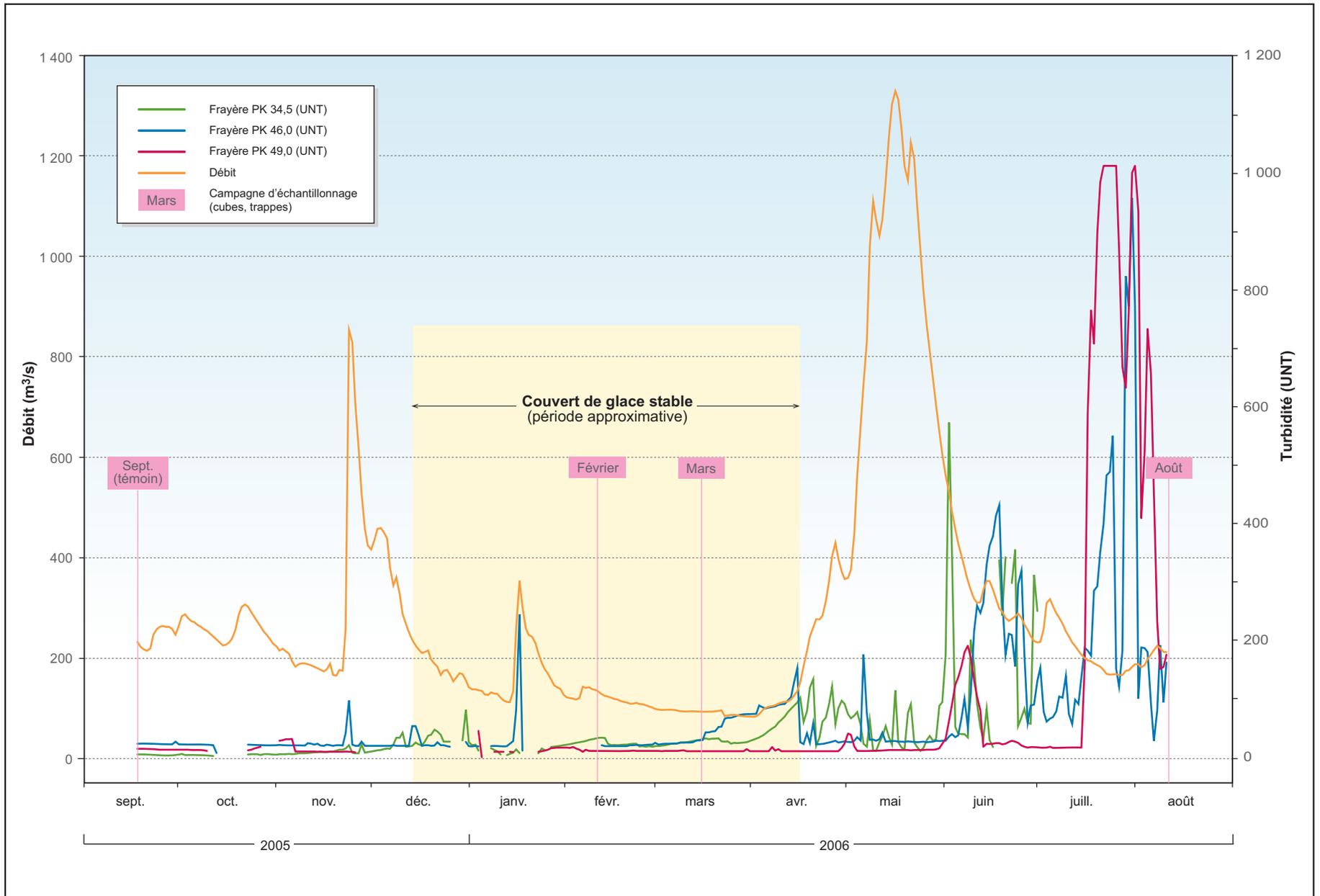
Lors de l'étiage hivernal et en présence d'un couvert de glace stable, soit en février et en mars, les valeurs de la turbidité sont à nouveau constantes sur les trois frayères à l'étude (figure 3-5). Par ailleurs, dès le début de la fonte des neiges, soit vers la mi-mars, la turbidité augmente graduellement sur la frayère du PK 34,5 et sur celle du PK 46 et commence à fluctuer grandement dès la mi-avril. Pour cette même période, la turbidité de l'eau est plutôt stable sur la frayère du PK 49.

Entre la fin du mois de mai et la fin de l'échantillonnage, à la mi-août, deux augmentations majeures de la turbidité surviennent sur les trois frayères étudiées (figure 3-5). La première augmentation se produit vers la mi-juin, où les valeurs de turbidité atteignent environ 190 UNT sur la frayère du PK 49, 430 UNT sur la frayère du PK 46 et 350 UNT sur celle du PK 34,5. La seconde augmentation se produit vers la fin juillet et est associée aux valeurs maximales de turbidité atteintes sur l'ensemble de la période d'incubation, soit d'environ 1 000 UNT. Mentionnons qu'un décalage dans le temps des valeurs de turbidité maximales atteintes à chacune des trois frayères est observable. Les valeurs maximales surviennent d'abord sur la frayère du PK 49, ensuite sur la frayère du PK 46 et finalement sur celle du PK 34,5 (figure 3-5).

3.3.4.2 Liens avec le débit et les conditions hydrauliques spécifiques aux frayères

D'abord, les résultats laissent présumer que les augmentations de la turbidité ne sont pas, de façon générale, reliées aux variations du débit de la Romaine enregistrées au PK 16 durant la période d'incubation 2005-2006. Il est généralement reconnu que les valeurs maximales de turbidité précèdent habituellement les valeurs maximales du débit, soit lors de la crue de printemps. D'ailleurs, à la suite des relevés au terrain en 2004 sur la Romaine, les valeurs maximales de charges solides en suspension ont précédé les valeurs maximales de débit (Environnement Illimité, 2005). Dans la présente étude, selon les résultats illustrés à la figure 3-5, tel n'est pas le cas.

Figure 3-5 Variation de la turbidité de l'eau durant la période d'incubation 2005-2006



L'hypothèse qui permet d'expliquer cette discordance est que les trois turbidimètres étaient localisés dans des conditions non représentatives des conditions moyennes de la rivière Romaine. En effet, le turbidimètre du PK 49 est situé dans le bras secondaire de la rivière et ne reçoit qu'une proportion du débit total. De plus, les appareils des frayères du PK 34,5 et du PK 46 étaient situés en aval de l'embouchure de tributaires et pouvaient subir leur influence. La similitude entre les courbes de turbidité des frayères du PK 34,5 et du PK 46 et leur différence avec celle du PK 49, permettent de corroborer cette hypothèse.

3.3.5 Faits saillants

- Le substrat des deux principales frayères de la rivière Romaine (PK 34,5 et PK 46) est de bonne qualité immédiatement après la fraie, car la quantité de sédiments $\varphi \leq 2$ mm et $\varphi \leq 0,125$ mm dans les nids artificiels témoins est inférieure aux valeurs critiques associées à la survie des embryons de saumon, établies dans la littérature scientifique.
- Il y a une tendance générale à l'augmentation de la quantité des sédiments $\varphi \leq 2$ mm dans le substrat de fraie des deux principales frayères (PK 34,5 et PK 46) sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. Toutefois, les valeurs de l'indice sont bien en dessous de la valeur critique reconnue dans la documentation scientifique.
- Il y a une tendance générale à l'augmentation de la quantité des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm dans le substrat de fraie des frayères du PK 34,5 et du PK 46 sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. Comparativement aux sédiments $\varphi \leq 2$ mm, les valeurs de l'indice sont bien au-delà de la valeur critique établie, et ce, dès la deuxième campagne d'échantillonnage (février 2006).
- Il y a transport en charge de fond durant toute la période d'incubation 2005-2006 pour les trois frayères à l'étude. La majorité des sédiments transportés, soit entre 70 et 90 % du contenu total des trappes, sont des sédiments $\varphi \leq 2$ mm.
- La taille des particules les plus grossières (D90) transportées en charge de fond et récoltées par les trappes est inférieure à la taille des particules moyennes (D50) du substrat des trois frayères. Ceci indique que le pavement des frayères n'a pas été mobilisé au cours de la période d'incubation 2005-2006.

- Il y a transport en suspension, comme le montrent les valeurs de la turbidité mesurées au droit des trois frayères, et ce, sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. Par ailleurs, ces valeurs sont relativement faibles et constantes pour la majorité de la période d'incubation et augmentent à partir du mois d'avril pour les frayères du PK 34, 5 et du PK 46 et vers la fin mai pour la frayère du PK 49. La turbidité de l'eau atteint des valeurs maximales entre la fin mai et la fin de la période d'échantillonnage (mi-août), et ce, pour les trois frayères étudiées.

3.4 Discussion

La discussion est orientée de façon à brosser le portrait détaillé de la dynamique sédimentaire au droit des trois frayères, en faisant une analyse des relations entre les différentes variables et processus étudiés au terrain. Cette analyse est présentée pour trois périodes bien distinctes de la période d'incubation 2005-2006, soit l'automne, l'hiver et le printemps. Ensuite, en conclusion, une synthèse est présentée.

3.4.1 Période automnale

Entre les campagnes de septembre 2005 et de février 2006, une augmentation notable de la quantité des sédiments $\varphi \leq 2$ mm et $\varphi \leq 0,125$ mm dans le substrat des nids artificiels des frayères du PK 34,5 et du PK 46 a été observée (figures 3-1 et 3-2). Durant cette période, quelques crues sont survenues, dont les deux plus importantes se sont produites à la fin novembre (853 m³/s) et à la mi-janvier (354 m³/s) lors d'un redoux. L'examen de l'hydrogramme moyen de la Romaine (figure 3-6), basé sur 44 années d'observation du débit, montre que ces deux événements de crue sont généralement peu fréquents. Malgré ces deux crues de forte intensité pour cette période de l'année, la mobilisation du pavement qui aurait pu permettre d'expulser une certaine quantité de sédiments fins à l'extérieur du substrat des frayères ne s'est pas produite (figure 3-4). Seul le transport en charge de fond, majoritairement de sables, a eu lieu (figure 3-3). En ce qui a trait au transport en suspension lors de cette période, les courbes de turbidité indiquent de façon générale très peu d'événement d'intensité élevée, même si l'augmentation de la quantité des sédiments fins dans le substrat des nids artificiels a eu lieu.

Ces résultats suggèrent que l'augmentation notable de la quantité des sédiments fins dans le substrat des nids artificiels des frayères étudiées, entre septembre et février, est majoritairement reliée au transport en charge de fond et au processus d'infiltration. D'une part, comme mentionné précédemment, les débits sont trop faibles pour permettre la mobilisation du pavement des frayères et ainsi nettoyer le

substrat. D'autre part, ils sont généralement trop élevés (c.-à-d. 200 m³/s en moyenne sur l'ensemble de la période d'échantillonnage) pour permettre aux sédiments fins ($\varphi \leq 2$ mm) de se déposer.

3.4.2 Période hivernale

Entre les campagnes de février et de mars 2006, aucun événement hydrologique particulier n'a eu lieu. Un couvert de glace stable était présent et le débit a diminué graduellement. D'ailleurs, c'est durant cette période que les valeurs les plus faibles du débit ont été atteintes, soit une moyenne approximative de 100 m³/s. Cette période est aussi caractérisée par des valeurs faibles de turbidité et généralement très peu variables (figure 3-5).

Les résultats issus de l'analyse du contenu des trappes récupérées en mars indiquent que ces faibles débits sont associés à une faible capacité de transport de l'écoulement, car ils n'ont permis de transporter que de petites quantités de sédiments de petite taille. En effet, entre 70 et 90 % des sédiments récoltés par les trappes durant la période hivernale sur les frayères ont un $\varphi \leq 2$ mm (figure 3-3). Par ailleurs, ces faibles débits n'ont pas permis de nettoyer le substrat des frayères, puisque la mobilisation du pavement n'a pas eu lieu (figure 3-4). Étant donné que les quelques crues d'automne n'ont pas permis la mobilisation du pavement, il n'est pas surprenant que la mobilisation ne se soit pas produite lors de la période hivernale, durant laquelle les débits étaient plus faibles.

La tendance à l'augmentation de la quantité de sédiments fins dans les nids artificiels (figures 3-1 et 3-2) des frayères du PK 34,5 et du PK 46 pour cette période serait reliée à la prédominance des processus de sédimentation plutôt que d'infiltration. En effet, la diminution graduelle des débits correspond à des conditions d'écoulement propices à la mise en place de ce type de processus.

3.4.3 Période printanière

La période d'échantillonnage comprise entre mars et août 2006 est caractérisée par le départ des glaces, la crue de printemps (dont la pointe a atteint 1 328 m³/s à la mi-mai), la décrue et l'étiage estival (dont les plus faibles valeurs de débit avoisinaient 170 m³/s vers la fin de juillet). L'examen de l'hydrogramme moyen de la Romaine (figure 3-6) montre que la crue printanière de 2006 correspond à une crue moyenne de récurrence de 2 ans.

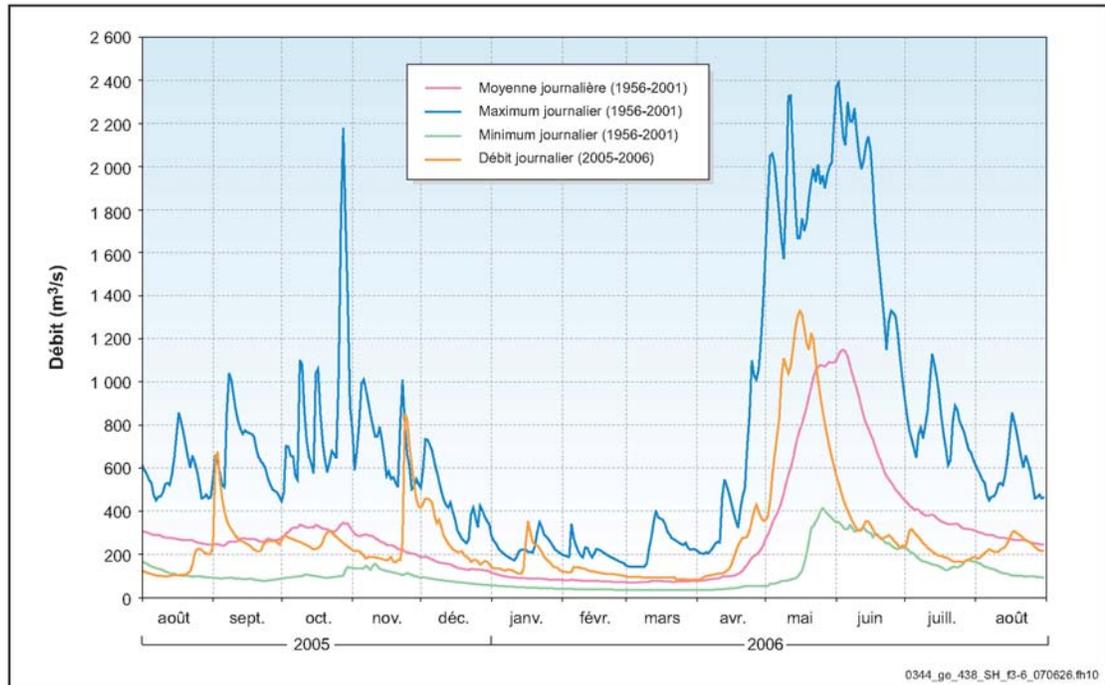


Figure 3-6. Hydrogramme de la rivière Romaine au PK 16 – Station n° 073801 du MENV.

Les résultats indiquent que c'est lors de cette période que les événements de turbidité élevée et ceux de la charge de fond ont été les plus importants lors de la période d'incubation 2005-2006. De plus, la totalité des trappes à sédiments récoltées en août étaient saturées. Par ailleurs, comme mentionné à la section 3.3.3.2, puisqu'il n'est pas possible d'établir à quel moment les trappes ont cessé d'échantillonner, il est impossible de connaître la taille maximale des particules transportées lors de la crue de printemps, ni de déterminer si le pavé a été mobilisé ou non. Toutefois, il est très probable que ce dernier n'ait pas bougé, puisqu'il y a une tendance générale à l'augmentation de la quantité des sédiments fins dans les cubes d'infiltration (nids artificiels) entre les campagnes de mars et d'août (figures 3-1 et 3-2).

3.4.4 Synthèse et conclusion

Selon deux études récentes menées en milieu naturel (Levasseur et coll., 2006a; Julien et Bergeron, 2006), l'augmentation dans le substrat de fraie de sédiments $\phi \leq 0,125$ mm apparaît être un facteur plus néfaste pour la survie des embryons de saumon que l'augmentation de sédiments $\phi \leq 2$ mm. Pour les conditions hydrologiques qui sont survenues entre septembre 2005 et août 2006, le substrat des frayères du PK 34,5 et du PK 46 de la rivière Romaine a généralement subi

l'infiltration des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm. Malgré le fait que les différences du pourcentage de sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm dans le substrat des nids artificiels entre les campagnes d'échantillonnage consécutives ne soient pas toujours significatives, elles le sont toutefois entre la première campagne (septembre 2005) et la dernière (août 2006).

De façon générale, les événements hydrologiques ont mené à une diminution de la qualité du substrat des frayères du PK 34,5 et du PK 46 sur l'ensemble de la période d'incubation 2005-2006. Cette dégradation de la qualité du substrat est principalement associée aux événements de transport en charge de fond, puisque les événements de turbidité survenus lors de la période d'incubation 2005-2006 ne semblent pas être reliés à l'augmentation de la quantité de sédiments fins observée dans les nids artificiels des frayères. Par exemple, la figure 3-2 indique une augmentation relativement similaire de la quantité des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm contenue dans les nids artificiels des frayères du PK 34,5 et du PK 46 entre les campagnes de février et de mars 2006 et entre celles de mars et d'août 2006, et ce, malgré des valeurs de turbidité beaucoup plus élevées entre le mois d'avril et le mois de juillet 2006 comparativement à celles entre le mois de février et le mois de mars 2006 (figure 3-5). Les événements de turbidité auraient ainsi peu d'impact sur les processus d'infiltration des sédiments fins dans le substrat. Ces observations sont cohérentes avec celles tirées de la littérature scientifique, qui suggèrent que l'augmentation de la quantité de sédiments fins dans le substrat de fraie pendant la période d'incubation serait surtout attribuable au transport en charge de fond plutôt qu'au transport en suspension.

Bref, en conditions actuelles, les résultats indiquent que le substrat des frayères du PK 34,5 et du PK 46 se détériore rapidement, puisque les quantités de sables fins dans les nids artificiels sont bien au-delà de la valeur critique établie, et ce, dès la deuxième campagne d'échantillonnage (février 2006). Cette dégradation de la qualité du substrat serait principalement associée aux événements de transport en charge de fond et aux processus d'infiltration, en dehors de la période hivernale qui est plutôt caractérisée par la mise en place de processus de sédimentation. En conditions actuelles, sur la Romaine, tout indique que le substrat des frayères est principalement nettoyé par les géniteurs lors de la fraie. En effet, la rivière ne possède pas la compétence de nettoyer le substrat au droit des trois frayères, même lors de la crue printanière. Le creusage des nids par les géniteurs à l'automne apparaît donc comme le seul événement qui puisse éliminer ou réduire, très localement, la quantité de sédiments fins dans le substrat.

4. Modélisation hydrosédimentaire du cours aval de la Romaine

4.1 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de ce chapitre sont :

- d'identifier, en conditions futures, les tendances à long terme de la dynamique sédimentaire de l'ensemble du cours aval de la rivière;
- d'évaluer la capacité de mobilisation du pavement des frayères à saumon.

L'approche préconisée pour atteindre ces objectifs repose sur une modélisation numérique de la dynamique sédimentaire du cours aval de la Romaine. Le modèle numérique sert en quelque sorte d'intégrateur pour considérer un maximum de modifications apportées au système hydrique dans son ensemble (charge sédimentaire, hydrologie, déversements, température de l'eau, etc.). Des simulations sur plusieurs années permettent aussi d'identifier les tendances à long terme.

4.2 Méthodologie

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour la modélisation hydrosédimentaire du cours aval de la Romaine et pour les calculs liés à la capacité de mobilisation du pavement des frayères. Une description détaillée de la mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire est fournie à l'annexe 6.

4.2.1 Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire

L'ensemble des simulations de la dynamique sédimentaire du cours aval de la Romaine a été réalisé à l'aide du modèle unidimensionnel GSTARS, version 3.0, développé par le U.S. Bureau of Reclamation (Yang et Simões, 2002).

Ce modèle est conçu pour résoudre les problèmes complexes du transport de sédiments dans les rivières pour lesquelles les données sont limitées. Une présentation sommaire du modèle GSTARS est incluse à l'annexe 7.

La mise en œuvre du modèle du cours aval a pu être réalisée en intégrant les résultats de diverses études et de campagnes de relevés réalisées principalement dans le contexte de l'étude d'impact du complexe de la Romaine.

4.2.1.1 Construction du modèle bathymétrique

Le modèle bathymétrique du cours aval de la Romaine s'étend du rapide à Brillant (PK 0,7), près de son embouchure avec le golfe du Saint-Laurent, jusqu'au PK 51,75, soit 250 m en amont de la sortie du canal de fuite de la centrale de la Romaine-1 (PK 51,5). Le modèle est constitué au total de 142 sections, dont 113 sections de relevés au terrain et 29 sections fictives établies afin d'obtenir un meilleur étalonnage du modèle (carte A6-1 de l'annexe 6). La densité des sections est plus élevée au droit des trois frayères à saumon.

4.2.1.2 Caractérisation du lit de la rivière Romaine

La caractérisation granulométrique du lit de la rivière Romaine a été faite en se basant sur les études de GENIVAR (2002) et de POLY-GÉO (2006).

En analysant les segments (GENIVAR, 2002) et les zones (POLY-GÉO, 2006) définis dans les deux études, une synthèse a été réalisée pour résumer et définir de nouveaux segments pour le modèle GSTARS. La composition granulométrique retenue pour la configuration du modèle est présentée au tableau 4-1. À noter que les 142 sections du modèle ne sont pas toutes présentées dans ce tableau. Celles qui manquent sont interpolées linéairement par GSTARS entre chaque section.

Les sables fins ($\varphi < 0,125$ mm), bien que présents, n'ont pas été pris en considération pour l'aspect modélisation. Le manque de données d'analyses granulométriques et la méconnaissance des propriétés mécaniques et géotechniques des argiles et des silts de la rivière Romaine ne permettent pas d'en tenir compte lors des simulations.

Comme l'élévation de la roche-mère, ou autrement dit l'épaisseur du substrat, n'est pas connue, des limitations sur l'érosion du lit de la rivière ont été imposées uniquement au voisinage des chutes et des rapides où le substrat est constitué de roc ou de matériaux grossiers. À ces endroits, ces limitations ont pour effet d'empêcher toute érosion de la rivière.

4.2.1.3 Imposition des conditions de niveaux et de débits aux frontières

Une relation niveau-débit est imposée à la limite aval du domaine modélisé, soit à la section du PK 0,7. La relation utilisée est tirée de GENIVAR (2004b).

Les débits, que ce soit en conditions actuelles ou futures, sont imposés à l'extrémité amont du modèle (section du PK 51,75). La section 4.2.2 fournit plus de détails concernant les séries hydrologiques de débits utilisées.

Tableau 4-1. Caractéristiques du lit de la rivière Romaine utilisées dans le modèle GSTARS.

PK	Lieu	Pourcentage des classes granulométriques (%)						Zone non érodable
		Sable fin	Sable	Gravier	Caillou	Galet	Bloc	
0,70	Rapide à Brillant	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
2,50		n/d	65	35	-	-	-	non
14,10		n/d	80	20	-	-	-	non
14,30		n/d	-	-	-	-	-	100 ^b
16,40	Chute de l'Église	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
18,00		n/d	70	15	15	-	-	non
30,00		n/d	70	15	15	-	-	non
30,20		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
30,75		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
32,00		n/d	70	15	15	-	-	non
33,00		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
34,20		Frère du PK 34,5 ^a	n/d	19	33	26	22	-
34,80	Chute à Charlie	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
37,00		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
37,20		n/d	83	10	7	-	-	non
40,10		n/d	41	25	34	-	-	non
44,20		n/d	41	25	34	-	-	non
44,58		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
44,68		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
44,80		n/d	-	30	40	30	-	non
45,10		n/d	-	30	40	30	-	non
46,10		Frère du PK 46 ^a	n/d	17	62	20	1	-
48,50	Frère du PK 49 ^a	n/d	5	40	10	30	15	non
50,55		n/d	55	35	5	5	-	non
50,75		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
51,75	Centrale RO-1	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui

a Données provenant des nids artificiels de la campagne d'août 2006 de terrain.

b Roc imposé.

n/d : Non déterminé.

Sources : GENIVAR (2002) et POLY-GÉO (2006).

4.2.1.4 Imposition des conditions de transport total à la frontière amont

Conditions actuelles

Pour les simulations en conditions actuelles, une relation entre le débit liquide de la rivière et le débit solide qu'elle transporte est imposée à la section amont du domaine modélisé. L'analyse des résultats de la campagne de mesures réalisée en 2003 (Environnement Illimité, 2004) a permis d'élaborer cette relation. Notons que le débit solide est composé de la charge de fond (CF) et de la matière en suspension (MES), sans distinction entre les deux.

La relation entre le débit liquide Q_L et le débit solide Q_s a été définie dans GSTARS par un modèle de type puissance et est illustrée à la figure A6-1 de l'annexe 6.

Conditions futures

Pour établir le bilan sédimentaire à long terme en conditions futures, la charge sédimentaire provenant de l'amont de la centrale de la Romaine-1 a été fixée comme nulle, étant donné la présence des réservoirs de la Romaine-1 et de la Romaine-2, qui favoriseront la rétention des sédiments transportés par la rivière.

4.2.1.5 Régime thermique des eaux

Les équations de transport de sédiments sont dépendantes de plusieurs variables, dont la masse volumique et la viscosité cinématique de l'eau, soit deux paramètres qui varient en fonction de la température de l'eau. Cette dernière est prise en compte dans la modélisation. Les données de températures, tant en conditions actuelles qu'en phase d'exploitation (conditions futures), ont été fournies par Hydro-Québec (voir la section 2.5 de l'annexe 6 pour plus de détails).

4.2.1.6 Régime des glaces

Le régime des glaces ne peut être considéré dans GSTARS. Par conséquent, les simulations sont réalisées comme étant à surface libre, sans couvert de glace.

4.2.1.7 Pas de temps

Le pas de temps retenu pour le calcul hydraulique est la journée. Ce choix est dicté essentiellement par le fait que les débits disponibles sont journaliers et qu'il atténue les variations rapides de débits pouvant contrevenir aux hypothèses de base sur la permanence du régime d'écoulement.

Pour les calculs reliés à la dynamique sédimentaire, plusieurs simulations préliminaires ont été effectuées en faisant réduire progressivement le pas de temps d'une journée à une heure, ce qui a permis de voir que la stabilité du modèle est atteinte avec un pas d'une heure. Un pas de temps d'une heure est donc retenu pour toutes les simulations reliées à la dynamique sédimentaire.

4.2.2 Scénarios simulés et hydrologie

Afin de pouvoir évaluer les impacts de l'exploitation du complexe de la Romaine sur la dynamique sédimentaire, des simulations à long terme sont réalisées pour les

conditions actuelles et futures. Les résultats du modèle permettent alors d'établir des tendances à long terme et des bilans sédimentaires moyens annuels.

4.2.2.1 Conditions actuelles

Les conditions actuelles sont simulées en se basant sur une série hydrologique de débits journaliers totalisant 44 années, mesurés de 1956 à 2001 au PK 16 de la rivière Romaine (données de la station n° 073801 qui proviennent de la base de données HYDAT, Environnement Canada, 2004). L'hydrogramme moyen annuel de la série hydrologique en conditions actuelles est présenté à la figure 4-1.

4.2.2.2 Conditions futures

Pour les simulations en conditions futures, une série hydrologique basée sur les scénarios de gestion de la centrale de la Romaine-1 est utilisée (Hydro-Québec, 2006). En tenant compte des règles de gestion projetées pour le complexe de la Romaine, Hydro-Québec a bâti (base hebdomadaire) une série hydrologique en phase d'exploitation en se basant sur les débits de 1957 à 2003 (Hydro-Québec, 2006), soit une période de 46 ans. L'hydrogramme moyen annuel de la série hydrologique en conditions futures est présenté à la figure 4-1.

Notons que ces simulations tiennent compte des déversements hebdomadaires prévus à l'évacuateur de crue de la centrale de la Romaine-1.

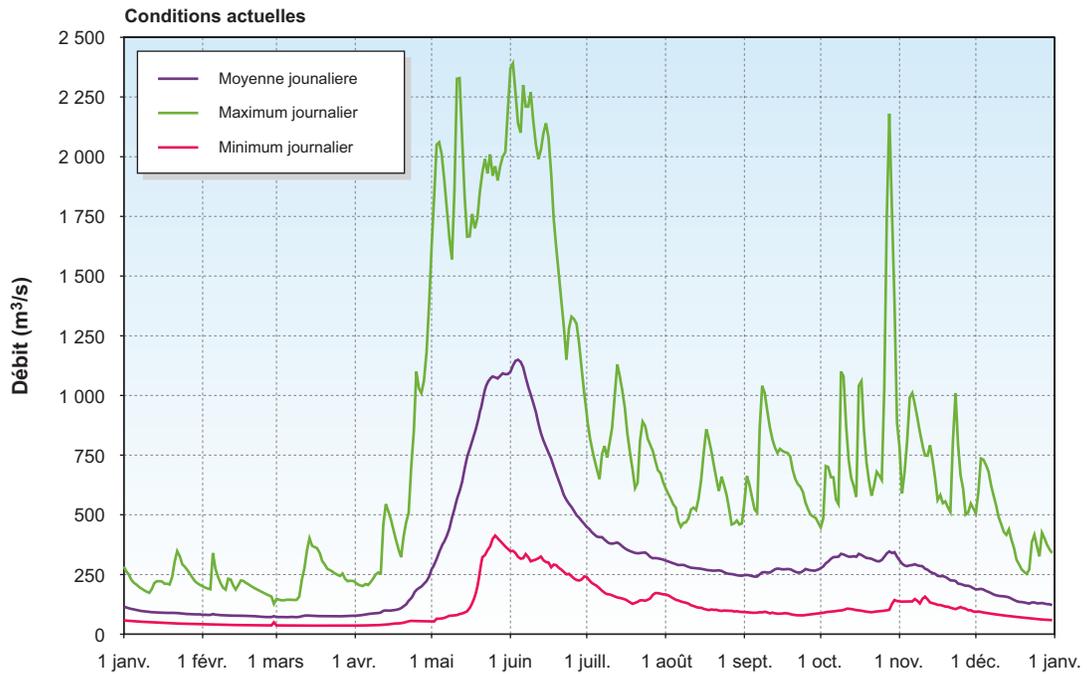
4.2.3 Bilans sédimentaires de la rivière Romaine en 2003 et 2004

Dans l'objectif de pouvoir étalonner et valider le modèle hydrosédimentaire, un bilan sédimentaire de la rivière Romaine en 2003 et 2004 doit être établi en se basant sur les résultats des campagnes antérieures d'échantillonnage de la matière en suspension et de la charge de fond (Environnement Illimité, 2004 et 2005). Les aspects géomorphologiques de la rivière Romaine ont aussi été considérés (POLYGÉO, 2002 et 2006).

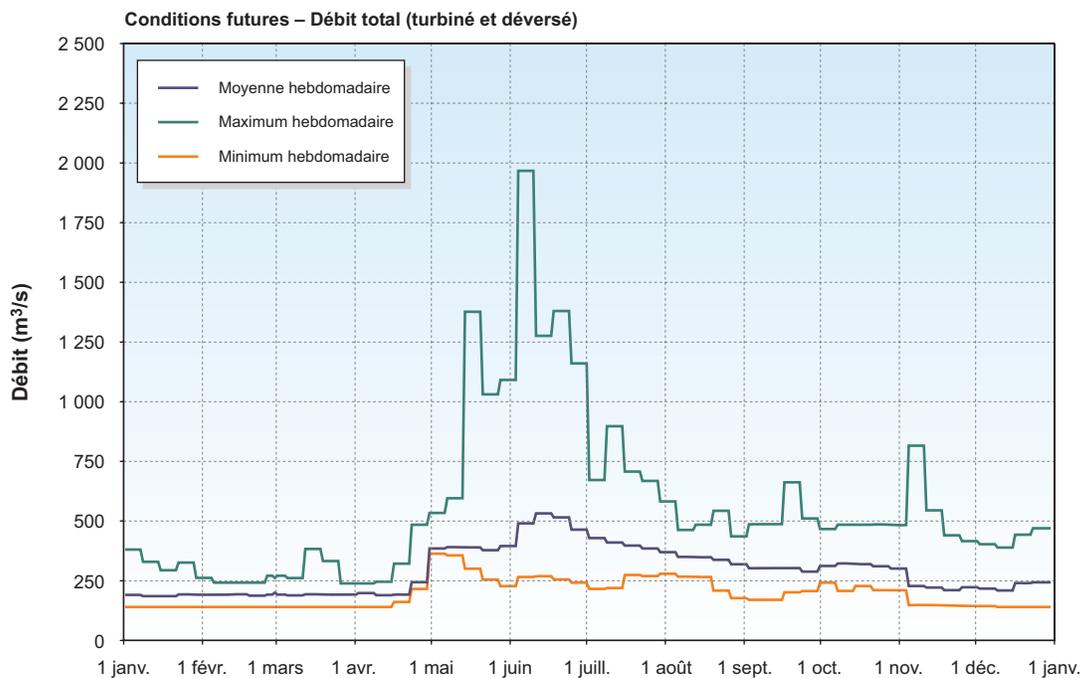
4.2.3.1 Charge sédimentaire de l'année 2003 et 2004

La charge sédimentaire des années 2003 et 2004 est présentée au tableau 4-2. Pour l'élaboration de la charge sédimentaire, les lacunes de données durant la campagne de mesures ont été comblées par interpolation linéaire. Pour les périodes estivales et automnales, les valeurs de MES ont été estimées à 2,0 mg/l aux stations amont et aval, alors que pour la période hivernale, une concentration de 1,5 mg/l a été supposée. D'autres corrections ont été apportées aux mesures pour pallier aux problèmes d'échantillonnage (Environnement Illimité, 2005).

Figure 4-1 **Hydrogramme moyen annuel de la rivière Romaine au PK 16 en conditions actuelles et futures**



Données de 1956 à 2001 à la station 073801 du MENV au PK 16.



Données de 1957 à 2003 d'Hydro-Québec.

Tableau 4-2. Charge sédimentaire de la rivière Romaine en 2003 et en 2004.

Année	Station amont			Station aval (PK 3,8)		
	Matière en suspension (t)	Charge de fond (t)	Total (t)	Matière en suspension (t)	Charge de fond (t)	Total (t)
2003	29 825 ^a	3 159 ^a	32 984 ^a	62 066	7 889	69 955
2004	26 745 ^b	5 740 à 7 512 ^b	32 485 à 34 257 ^b	42 839	8 196 à 11 834	51 035 à 54 673

a Données de la station au PK 53,5.

b Données de la station au PK 162,0.

Source : Environnement Illimité (2005).

Environnement Illimité (2005) a estimé le rapport entre la charge de fond et la matière en suspension. En 2003, ce rapport était de 13 % à la station aval (PK 3,8) et de 11 % à la station amont (PK 53,5). En 2004, il a été évalué à 19 % et à 21 % respectivement pour la station aval (PK 3,8) et la station amont (PK 162,0). Pour ces deux années de mesures, les données indiquent que la charge de fond a représenté au maximum 21 % de la matière en suspension.

4.2.3.2 Matière en suspension et charge de fond au PK 3,8

Aux fins du processus d'étalonnage et de validation du modèle hydrosédimentaire, une relation entre le débit liquide et le débit solide est élaborée pour reconstituer les débits solides qui transitent au PK 3,8. Cette relation est établie à partir des concentrations de sédiments mesurées en 2003 (Environnement Illimité, 2004) et du débit de la rivière, puis une courbe de type puissance est ajustée.

La figure A6-5 à l'annexe 6 compare le débit solide reconstitué à partir de la relation au débit solide mesuré. Les débits solides reconstitués représentent bien les valeurs des débits solides mesurés.

À partir de la relation débit solide versus débit liquide au PK 3,8, le bilan de reconstitution pour les années 2003 et 2004 a été extrapolé et est évalué respectivement pour ces deux années à 38 300 et à 37 800 tonnes.

Lors de l'étalonnage et de la validation, les débits solides ainsi reconstitués sont comparés aux résultats du modèle.

4.2.4 Étalonnage et validation

Avant de simuler les deux scénarios retenus, le modèle GSTARS doit être étalonné et validé pour les aspects hydraulique et sédimentaire.

Cette section décrit sommairement les résultats de l'étalonnage et de la validation. L'annexe 6 fournit plus de détails à ce sujet.

4.2.4.1 Aspect hydraulique

Les simulations hydrauliques sont effectuées dans le but d'étalonner le modèle hydrosédimentaire avec le modèle hydrodynamique tiré de GENIVAR (2004b).

Les conditions hydrauliques du modèle hydrosédimentaire de la rivière Romaine ont été calibrées et validées à partir de quatre simulations dont deux à débit moyen (400 et 500 m³/s) et deux autres à débit élevé (1 000 et 1 500 m³/s). Les figures A6-6 et A6-7 de l'annexe 6 comparent les lignes d'eau du modèle hydrosédimentaire et celles de GENIVAR (2004b). Les résultats obtenus sont tout à fait comparables. En effet, les écarts d'élévations maximums entre les lignes d'eau sont d'environ 20 cm.

4.2.4.2 Aspect sédimentaire

Le modèle de Ackers et White (HR Wallingford, 1990), le plus utilisé dans la littérature scientifique, a été retenu pour modéliser le transport de sédiments. Aux fins de comparaison avec les résultats de la simulation (41 000 tonnes), rappelons que le bilan de reconstitution de l'année 2003 au PK 3,8 est de 38 300 tonnes (section 4.2.3.2).

Le tableau 4-3 présente aussi le bilan sédimentaire, soit la différence entre la charge sédimentaire à l'amont au PK 53,5 et à l'aval au PK 3,8. Les bilans sédimentaires s'élèvent à 12 800 et à 15 500 tonnes respectivement pour la reconstitution et la simulation de l'année 2003. Le bilan sédimentaire d'Environnement Illimité (2004) est de l'ordre de 36 971 tonnes.

Tableau 4-3 Bilans sédimentaires de l'année 2003.

Source	Station amont (PK 53,5) (t)	Station aval (PK 3,8) (t)	Bilan sédimentaire (t)
Reconstitution GENIVAR - 2003	25 500	38 300	12 800
Simulation 2003	25 500	41 000	15 500
Mesures 2003 ^a	32 984	69 955	36 971

a Environnement Illimité (2004).

Malgré les différences méthodologiques, les bilans sédimentaires demeurent du même ordre de grandeur. Somme toute, le bilan sédimentaire (matière en suspension et charge de fond) de l'année 2003 est de l'ordre de 14 150 tonnes.

À noter qu'il s'agit d'une moyenne entre le bilan sédimentaire de la reconstitution GENIVAR et la simulation de l'année 2003.

L'année hydrologique 2004 a été simulée afin de valider le modèle hydrosédimentaire en utilisant toujours l'équation de transport total de Ackers et White (HR Wallingford, 1990). La charge sédimentaire au PK 3,8 de l'année 2004 obtenue pour la simulation de l'année 2004 est de 39 400 tonnes.

Aux fins de comparaison avec les résultats de la simulation (39 400 tonnes), rappelons que le bilan de reconstitution au PK 3,8 est de 37 800 tonnes (section 4.2.3.2).

Le bilan sédimentaire de l'année 2004 est d'environ 13 400 tonnes (tableau 4-4). Précisons qu'il s'agit d'une moyenne entre le bilan sédimentaire de la reconstitution GENIVAR et la simulation de l'année 2004. Le bilan sédimentaire d'Environnement Illimité (2005) est entre 18 550 et 20 406 tonnes.

Tableau 4-4 Bilans sédimentaires de l'année 2004.

Source	Station amont (PK 53,5) (t)	Station aval (PK 3,8) (t)	Bilan sédimentaire (t)
Reconstitution GENIVAR - 2004	25 200	37 800	12 600
Simulations 2004	25 200	39 400	14 200
Mesures 2004 ^a	32 485 à 34 257 ^b	51 035 à 54 673	18 550 à 20 406

a Environnement Illimité (2005).

b La station amont de Environnement Illimité est située au PK 162.

4.2.5 Capacité de mobilisation du pavement des frayères

Le nettoyage des frayères peut se produire lors des crues par une mobilisation du pavement. Pour ce faire, il est requis que les contraintes de frottement (parfois appelées forces tractrices) agissant sur le substrat soient suffisantes pour faire bouger les matériaux les plus grossiers des frayères, facilitant ainsi l'expulsion des sédiments fins.

4.2.5.1 Équation utilisée pour la détermination de la contrainte de frottement critique

Les sédiments d'une rivière sont susceptibles d'être entraînés sous l'action des forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement. L'eau étant en mouvement, elle exerce sur les matériaux composant le substrat d'une rivière une contrainte de

frottement τ_o . Cette contrainte est fonction du poids volumique γ_w de l'eau, de la hauteur de la colonne d'eau h et de la pente d'énergie S_e , aussi appelée le gradient hydraulique :

$$\tau_o = \gamma_w h S_e$$

Sur un lit de rivière, pour qu'il y ait une mise en mouvement d'une particule composant le substrat, la contrainte de frottement due à l'action des forces hydrodynamiques doit être supérieure à la contrainte de frottement critique τ_c qui correspond au début de l'entraînement. Cette contrainte critique est essentiellement fonction du diamètre du grain d , de la hauteur de la colonne d'eau h et de la pente d'énergie décrite par le paramètre de Shields (1936) τ_* :

$$\tau_c = \tau_* (\gamma_s - \gamma_w) d$$

où γ_s est le poids volumique spécifique du grain et τ_* le paramètre de Shields :

$$\tau_* = \frac{\gamma_w R_h S_e}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d}$$

On retrouve dans la littérature scientifique plusieurs méthodes pour déterminer la contrainte de frottement critique. À la suite d'une revue présentée à l'annexe 8, les équations de Julien (1998) ont été retenues. Ces équations sont simples d'approche et basées sur le diagramme de Shields (figure 4-2) largement utilisé dans la pratique (entre autres dans les modèles numériques d'écoulement HEC-RAS et MIKE-11).

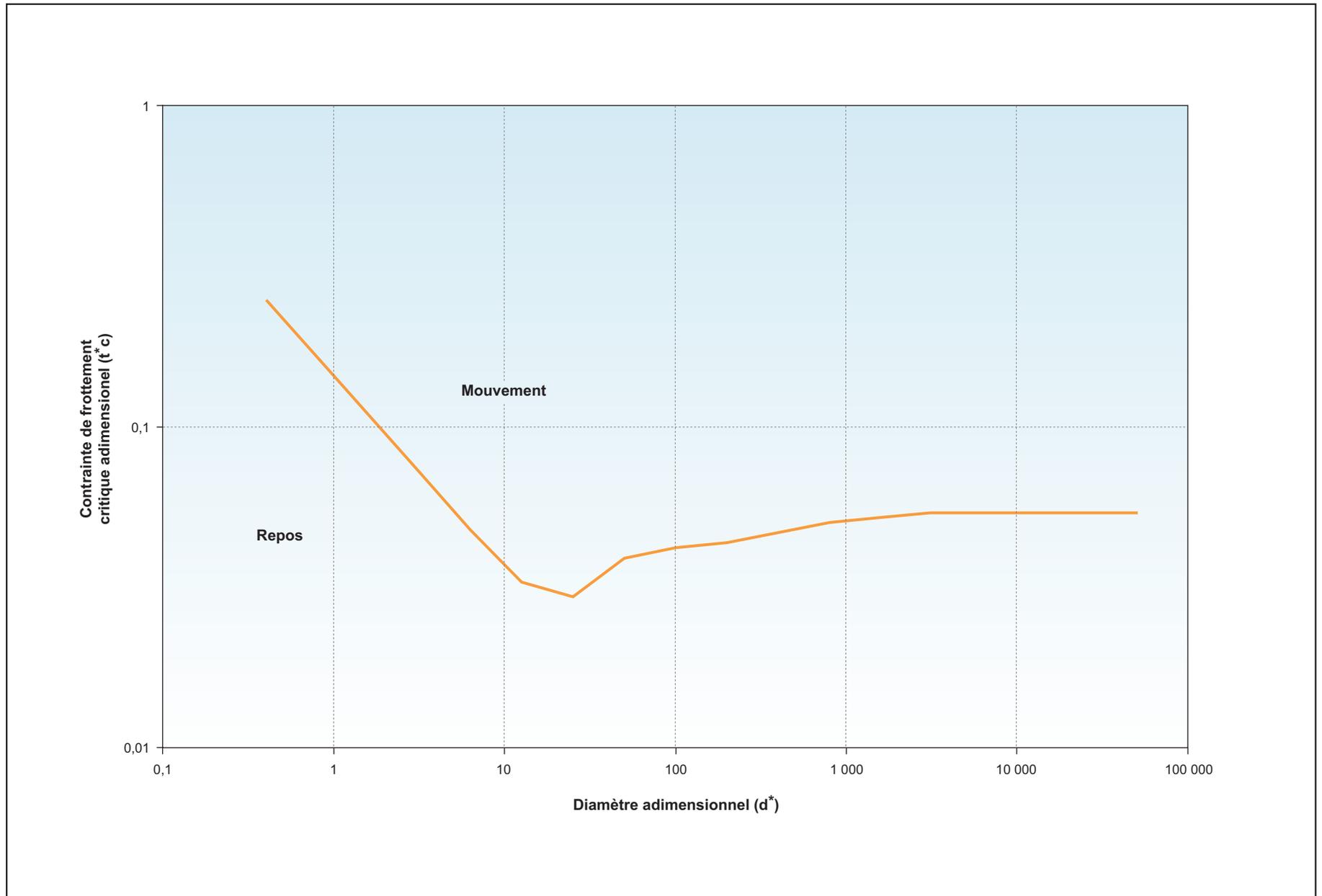
4.2.6 Crue d'entretien

La méthodologie retenue pour évaluer la pertinence de mettre en place un programme de crue d'entretien ayant comme objectif le maintien de la qualité du substrat des frayères à saumon est basée sur l'évaluation de la capacité de mobilisation du pavement des frayères lors du passage des crues.

Une telle méthode permet de considérer les spécificités d'une rivière en intégrant les conditions hydrologiques et hydrosédimentaires en conditions futures. Selon Reiser et coll. (1987, 1989) :

“The use of methods based on sediment transport mechanics (e.g. Meyer-Peter & Muller 1948; Einstein 1950; Parker et coll. 1982) provides **the most reliable approach** for the determination of required flushing flow rates”.

Figure 4-2 Diagramme de Shields-Yalin d'après les équations de Julien (1998)



Cependant, l'application d'une telle méthode nécessite une bonne connaissance des données de terrain comme la granulométrie des sédiments, la géométrie des sections de la rivière, la bathymétrie de la rivière, la pente des frayères et évidemment une détermination précise des conditions hydrauliques de l'écoulement (Reiser et coll. 1987, 1989). Dans le cas de la rivière Romaine, l'ensemble de ces données est disponible et un modèle numérique 1D a été développé, étalonné et validé pour déterminer les conditions hydrauliques actuelles et futures avec précision.

4.3 Description du substrat et de la charge sédimentaire

En se basant sur la documentation disponible, cette section décrit brièvement le substrat et la charge sédimentaire.

Au cours d'études antérieures portant sur l'habitat du saumon, GENIVAR (2002) a caractérisé le substrat des habitats du saumon en aval de la centrale de la Romaine-1.

De cette étude, il découle que le lit de la rivière Romaine est constitué essentiellement de sables. La présence de sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm) a été signalée à l'approche de l'embouchure, soit entre la chute de l'Église et le rapide à Brillant, dans une proportion de l'ordre de 5 %. Les graviers constituent la classe qui domine après celle des sables. La présence de cailloux a été signalée à plusieurs endroits, notamment au niveau des frayères.

POLY-GÉO (2006) a de son côté caractérisé la plaine côtière (PK 0 à PK 52,5) en analysant la géomorphologie des rives et des terrains adjacents le long du tronçon étudié de la rivière Romaine, laquelle s'est entaillée à travers des dépôts marins silto-argileux épais. Ces dépôts constituent près des trois quarts des matériaux encaissants. Près de la moitié des rives est constituée de sable, le reste étant composé à peu près en parts égales de sédiments fins et de roc. L'érosion affecte tout près de 17 % des rives et se manifeste par éboulements et glissements de terrain. Elle touche principalement les talus composés de sédiments argileux recouverts de sable et de tourbe.

Six zones composant la plaine côtière ont également été identifiées par POLY-GÉO (2006). Chacune des zones présente des caractéristiques relativement uniformes en ce qui concerne le profil longitudinal de la rivière et les différentes composantes géomorphologiques des talus et des berges (tableau 4-5).

Tableau 4-5. Zones situées dans la plaine côtière de la rivière Romaine.

Zone	PK	Matériaux composant les berges (%)				
		Roc	Cailloux et/ou blocs	Gravier ^a	Sable	Sédiments fins ^b
1	0,00 à 2,25	82			18	
2	2,25 à 16,00	14			57	29
3	16,00 à 30,00	12		3	46	39
4	30,00 à 35,00	36		1	31	32
5	35,00 à 47,00	27		9	49	15
6	47,00 à 52,50	49	12		39	

a Il s'agit d'un mélange de sable et de gravier.

b Sédiments fins constitués d'argiles et de silts.

Source : POLY-GÉO (2006).

Les matériaux de surface le long de la rivière sont constitués essentiellement de tourbe mince (moins de 2 m de profondeur) ou épaisse (2 à 6 m de profondeur) en rive gauche, de sable le long des pieds des talus, de sable et de gravier autour du PK 40, de roc au niveau des rapides et des chutes et de sédiments fins entre le PK 16 et le PK 35 (zones 3 et 4). Il y a absence de till et de concentration de blocs ou de cailloux dans ce tronçon.

La quantité de sables fins provenant de l'érosion des rives de la rivière Romaine ainsi que de ses principaux tributaires entre les PK 0 et PK 290 totalise 16 490 t/a (tableau 4-6). La majorité des sédiments provient de la plaine côtière (entre le PK 2,25 et le PK 30) et du piémont (entre le PK 75,0 et le PK 90,5).

Tableau 4-6. Apports de sables fins des tronçons et des tributaires de la rivière Romaine entre le PK 290 et le PK 0.

Tronçon (km)	Contribution des rives en érosion - sable fin (silt et argile)					
	Rivière Romaine		Tributaires		Total	
	(t/a)	(%)	(t/a)	(%)	(t/a)	(%)
290 – 162,5	1 100	7	800	5	1 900	12
162,5 – 53,5	2 600	16	50	0	2 650	16
53,5 – 0	11 900	72	40	0	11 940	72
Total	15 600		890		16 490	100

Source : POLY-GÉO (2006).

La répartition de la charge sédimentaire du cours aval de la Romaine, incluant la matière en suspension et la charge de fond, est résumée au tableau 4-7.

Tableau 4-7. Répartition de la charge sédimentaire annuelle de la rivière Romaine entre le PK 53,5 et le PK 3,8.

Point d'intérêt	Matière en suspension - Charge silto-argileuse (t/a)	Charge de fond – sable (t/a)	Total (t/a)
PK 53,5	4 550	3 200	7 750
Érosion des tributaires	40	5	45
Érosion des rives	11 900	5 900	17 800
Station aval (PK 3,8)	> 16 500	8 000 à 12 000	24 500 à 28 500

Source : POLY-GÉO (2006).

En considérant les conclusions tirées de POLY-GÉO (2006) et connaissant la géométrie de la rivière en amont de la centrale de la Romaine-1, il est fort probable que la majorité des sédiments transitant par le PK 53,5 soit constituée de sables et de sables fins. Le reste des sédiments semble être piégé dans les fosses et les bassins.

4.4 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats traitant de la dynamique sédimentaire du cours aval de la rivière Romaine en conditions actuelles et futures.

4.4.1 Bilan sédimentaire global à long terme pour les conditions actuelles

La charge sédimentaire à long terme a été évaluée à partir de la relation de débit liquide versus débit solide au PK 3,8 (section 4.2.3.2) pour les années de 1957 à 2000, soit un total de 44 années.

Afin de calculer le bilan sédimentaire, la charge sédimentaire à long terme au PK 53,5 a été évaluée (relation développée à la section 4.2.1.4) à 1,106 million de tonnes. Le bilan sédimentaire est donc de 0,553 million de tonnes, soit 12 600 tonnes par année entre les PK 53,5 et 3,8 en conditions actuelles (tableau 4-8).

Tableau 4-8. Bilan sédimentaire à long terme en conditions actuelles au PK 3,8 pour la période 1957-2000.

Source	Station amont (PK 53,5) (10 ⁶ t)	Station aval (PK 3,8) (10 ⁶ t)	Bilan sédimentaire (10 ⁶ t)	Bilan sédimentaire annuel (t/a)
Reconstitution GENIVAR (1957-2000)	1,106	1,659	0,553	12 600

4.4.2 Bilan sédimentaire global à long terme en conditions futures

4.4.2.1 Résultats des simulations hydrosédimentaires à long terme

Dans un premier temps, la figure 4-3 illustre le bilan entre le taux moyen annuel d'érosion et celui de sédimentation pour chacune des sections, basé sur les 46 années simulées.

Le tronçon situé entre le canal de fuite de la centrale de la Romaine-1 (PK 51,5) et le PK 45 a majoritairement tendance à s'éroder. Ceci est principalement dû au fait que les eaux provenant du réservoir de la centrale de la Romaine-1 sont beaucoup moins chargées en sédiments qu'en conditions actuelles. La rivière aura alors tendance à reconstituer sa charge sédimentaire, ce qui explique l'érosion dans ce secteur.

Entre le PK 45 et la chute à Charlie (PK 35), malgré quelques zones d'érosion, la majeure partie de ce secteur représente des zones de sédimentation. Entre la chute à Charlie et la chute de l'Église (PK 16), il y a une zone d'érosion dans les premiers kilomètres en amont et, par la suite, les zones d'érosion et de sédimentation alternent. En aval de la chute de l'Église, la tendance est nettement à l'érosion.

Le transport total (moyenne sur 46 ans) au droit de chaque section est illustré à la figure 4-4. Présentés sous cette forme, les résultats du modèle hydrosédimentaire montrent que la rivière en aval de la centrale de la Romaine-1 peut être analysée en trois segments dont le comportement est pratiquement indépendant du point de vue de la dynamique sédimentaire. Ces segments correspondent aux discontinuités physiques du talweg et sont définis comme suit :

- segment amont : de la centrale de la Romaine-1 à la chute à Charlie;
- segment intermédiaire : de la chute à Charlie à la chute de l'Église;
- segment aval : de la chute de l'Église au rapide à Brillant (PK 0,7).

La figure 4-5 permet aussi de comparer le transport total pour les conditions actuelles et futures.

Figure 4-3 Tendence simulée du comportement sédimentaire ($\phi > 0,125$ mm) dans la Romaine en conditions futures

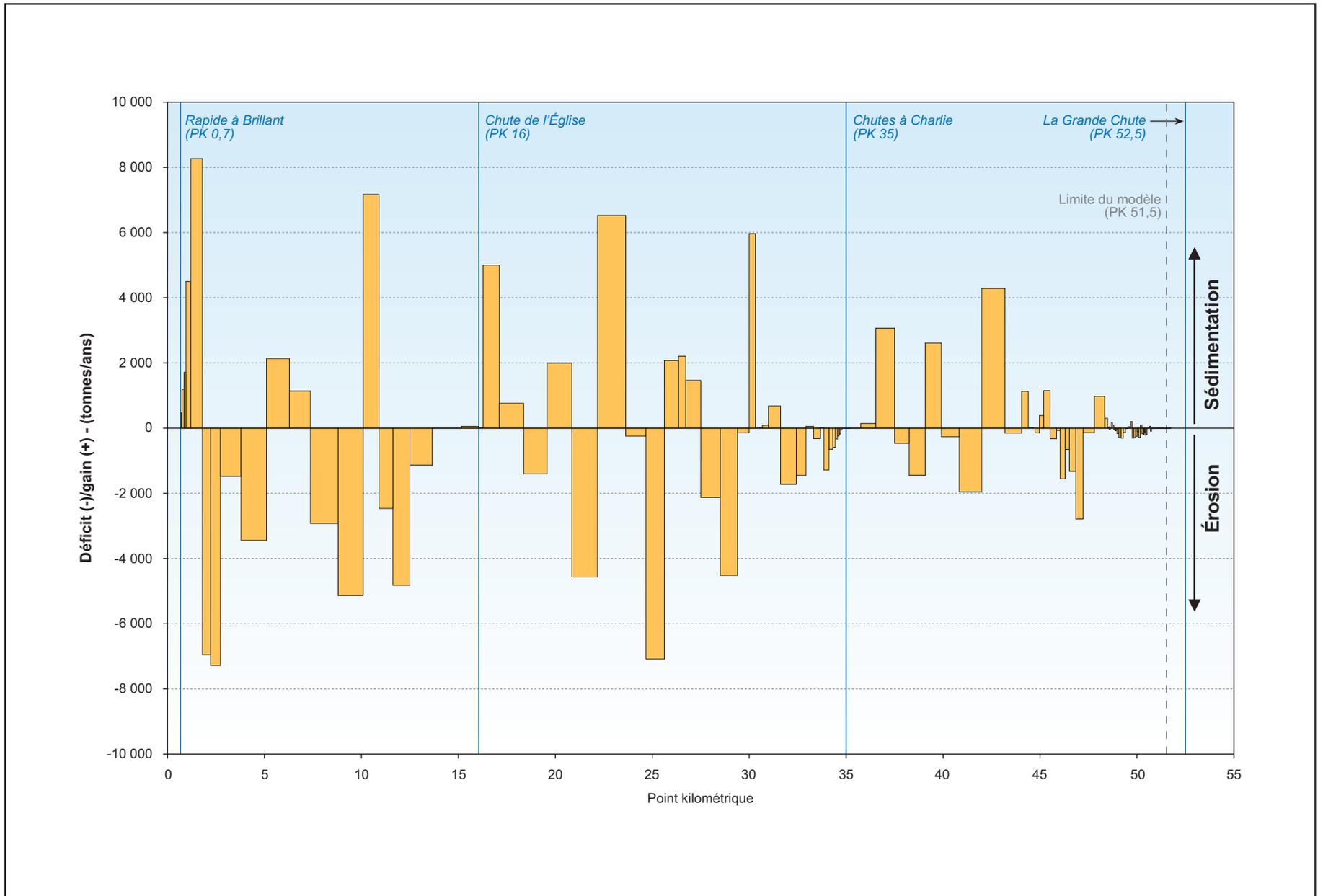


Figure 4-4 Transport total ($\varphi > 0,125$ mm) au droit des sections de la Romaine en conditions futures

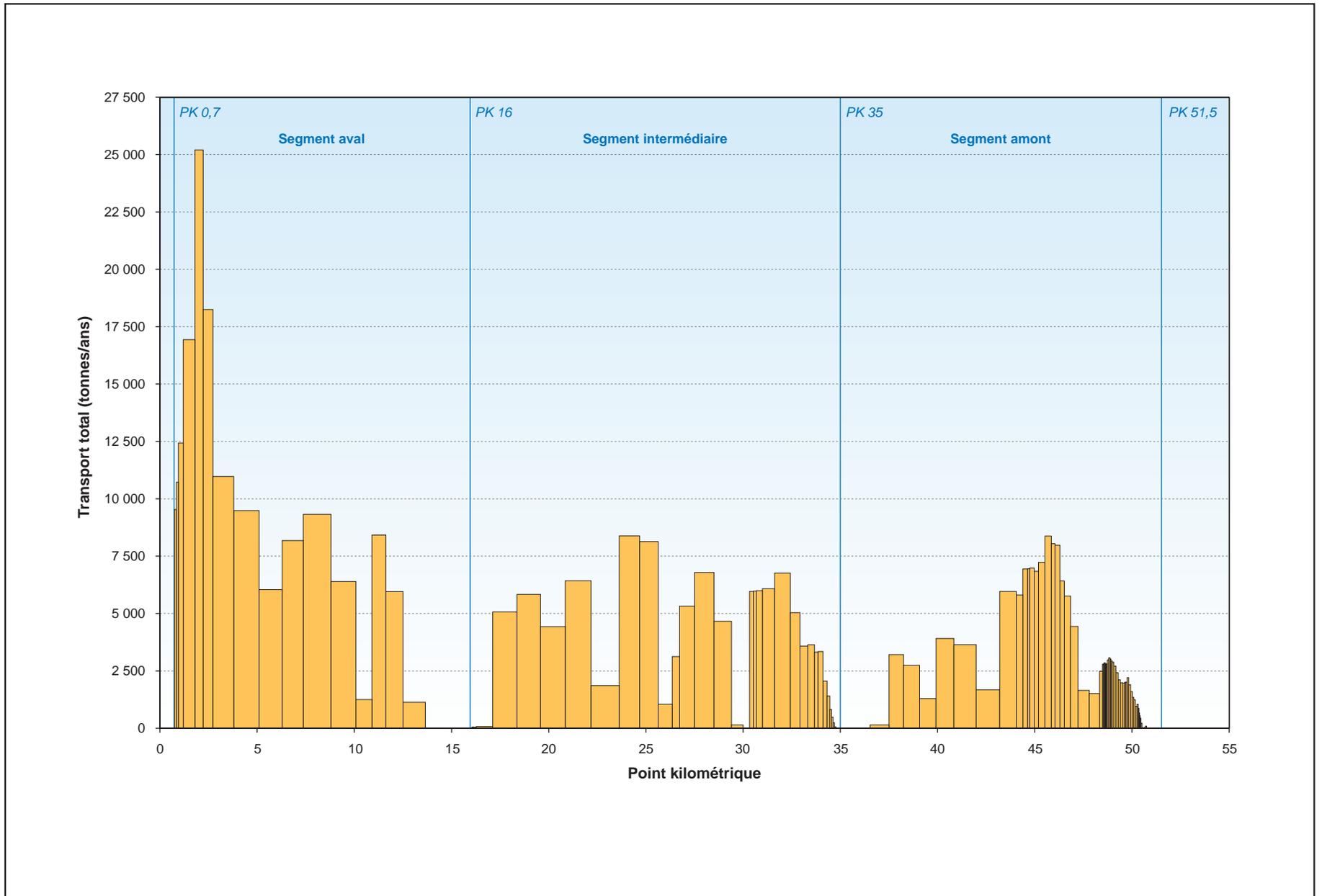
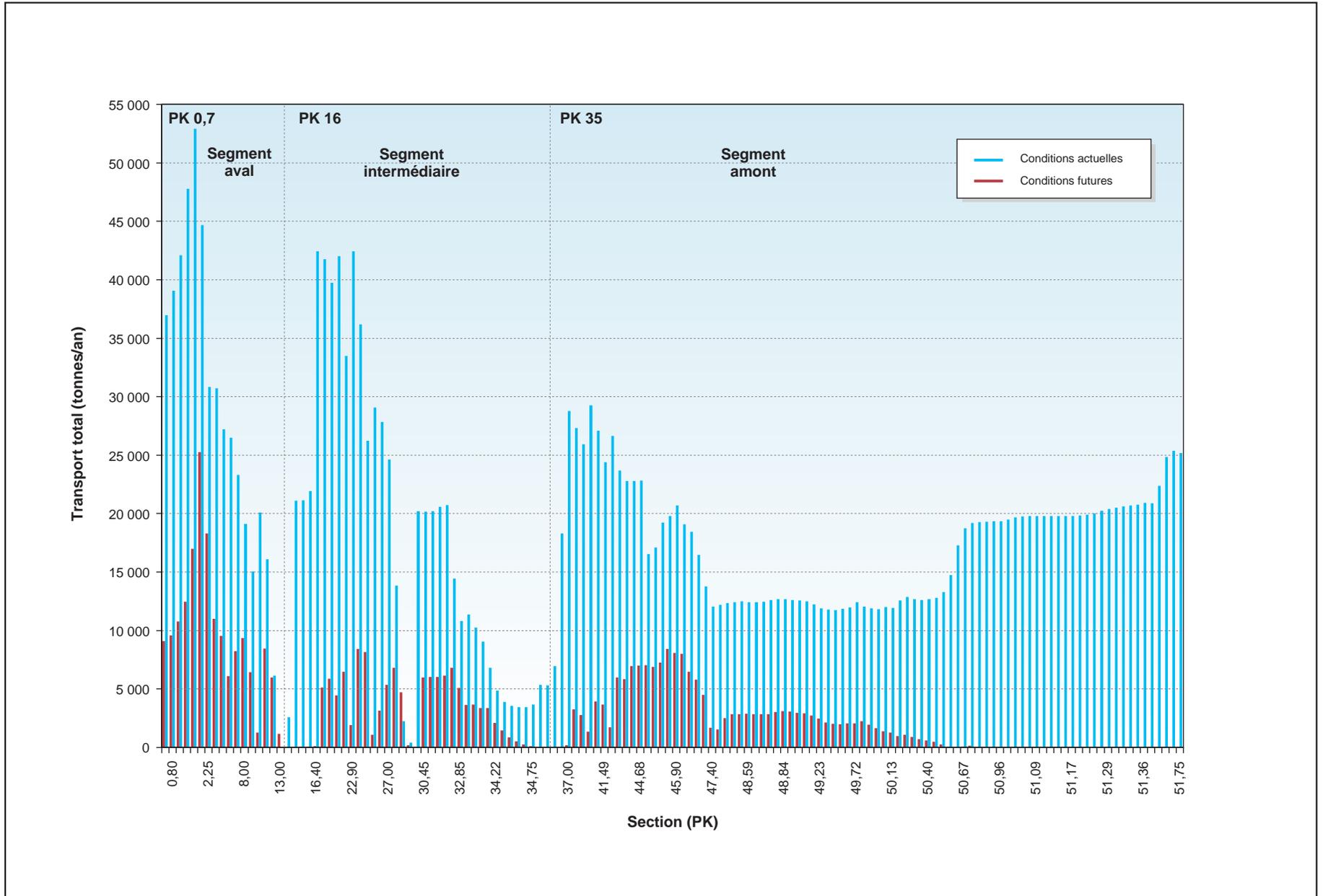


Figure 4-5 Transport total ($\phi > 0,125$ mm) au droit des sections de la Romaine en conditions actuelles et futures



L'analyse comparative par segment de la charge sédimentaire entre les conditions actuelles et futures permet une meilleure compréhension des modifications anticipées de la dynamique sédimentaire.

La figure 4-6 illustre schématiquement la charge sédimentaire par segment en conditions actuelles et futures, alors que le tableau 4-9 en présente les valeurs. Rappelons que POLY-GÉO (2006) a estimé la charge sédimentaire entre 24 500 et 28 500 t/an (tableau 4-7) au PK 3,8, ce qui est comparable avec celle calculée à partir du modèle hydrosédimentaire de 36 200 t/an.

Tableau 4-9. Charge sédimentaire annuelle ($\phi > 0,125$ mm) par segment, en aval de la centrale de la Romaine-1.

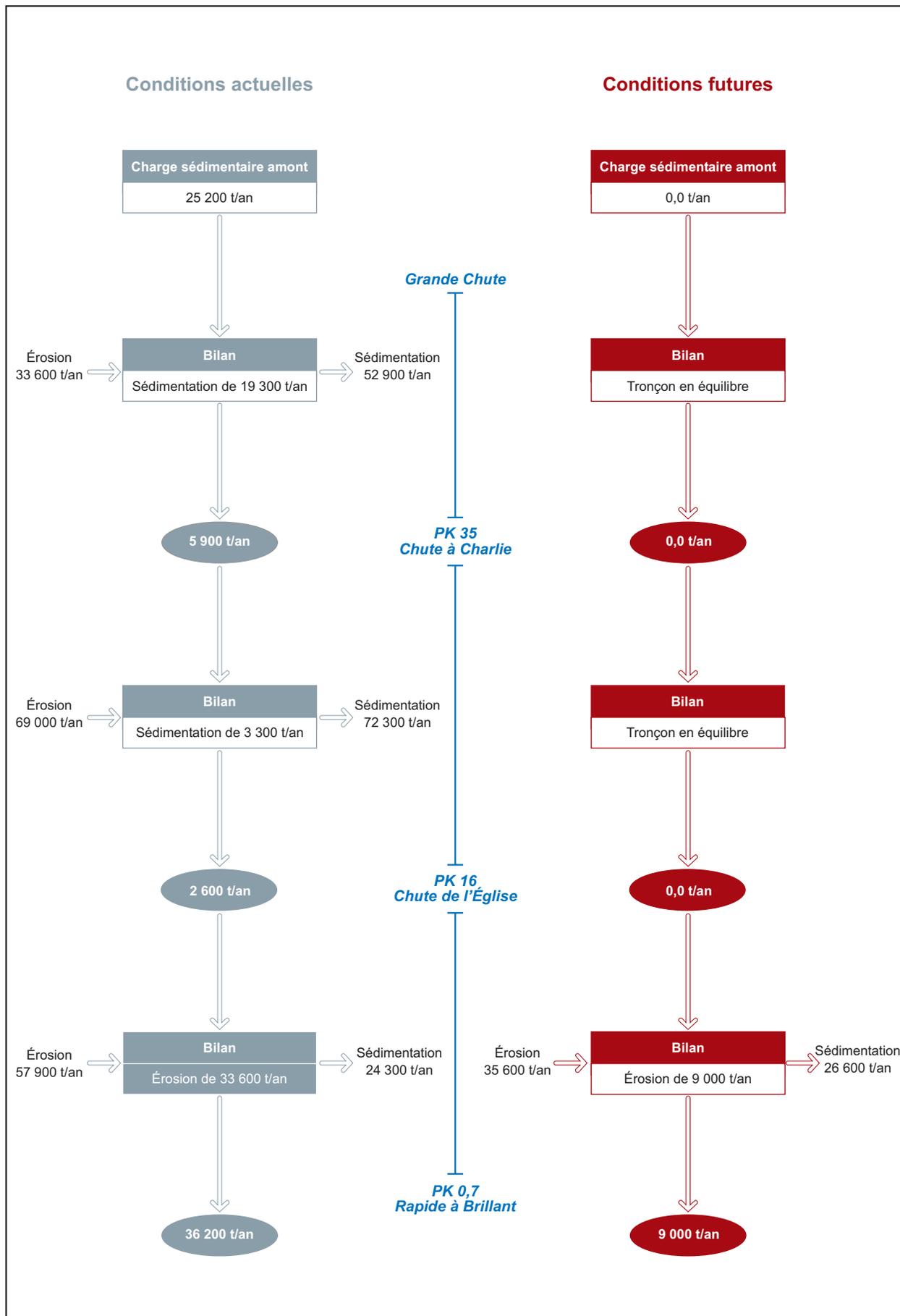
Segment	Charge sédimentaire (t/an)	
	Conditions actuelles	Conditions futures
Amont (PK 52,5 à PK 35)	Sédimentation : 19 300	En équilibre
Intermédiaire (PK 35 à PK 16)	Sédimentation : 3 300	En équilibre
Aval (PK 16 à PK 0,7)	Érosion : 33 600	Érosion : 9 000
Embouchure (PK 0,7)	Transport : 36 200	Transport : 9 000

En conditions actuelles, le segment amont constitue une zone de sédimentation importante. Tel que mentionné précédemment, en conditions futures, les eaux provenant du réservoir de la centrale de la Romaine-1 sont beaucoup moins chargées en sédiments qu'en conditions actuelles. La rivière aura alors tendance à reconstituer sa charge sédimentaire, ce qui explique l'érosion prévue dans ce secteur.

Dans le segment intermédiaire, en conditions actuelles, un faible volume de sédiments est déposé annuellement (3 300 t/an). Ce segment est déjà près de l'équilibre. En conditions futures, les simulations à long terme montrent un équilibre pour ce tronçon de rivière. Cette légère différence de comportement est sans doute due au fait que l'équilibre sédimentaire n'est pas encore tout à fait atteint et que la rivière aura tendance à éroder un peu plus qu'en conditions actuelles.

En conditions actuelles, le segment aval est déjà assujéti à une érosion importante de 33 600 t/an, essentiellement concentrée durant la période de crue printanière. Puisque les crues seront laminées en phase d'exploitation, il est anticipé qu'il y aura une baisse significative du volume érodé. En conditions futures, le volume érodé sera donc de 9 000 t/an, ce qui représente une diminution de 73 %. Plusieurs sections demeureront propices à la sédimentation, faisant en sorte que le bilan net de ce segment sera affecté. En effet, le volume érodé passera de 33 600 t/an à 9 000 t/an en conditions futures. Pour ce qui est de la charge sédimentaire transportée vers l'estuaire, elle passera de 36 200 t/an à 9 000 t/an, ce qui représente une diminution de 75 %.

Figure 4-6 Charge sédimentaire annuelle ($\phi > 0,125$ mm) en aval de la centrale de la Romaine-1 en conditions actuelles et futures



4.4.2.2 Interprétation des résultats du modèle hydrosédimentaire ($\varphi > 0,125$ mm)

Les simulations des conditions actuelles à long terme (44 ans) montrent, sur l'ensemble du tronçon en aval de la centrale de la Romaine-1, une tendance à l'érosion du lit et des berges de la rivière. L'interprétation des photos aériennes des dernières décennies ne permet pas de conclure à une telle tendance. Les berges et les dépôts de sable semblent relativement stables au fil des ans. Le modèle aurait donc tendance à surestimer l'érosion à long terme.

Cette érosion est en partie due au fait qu'une seule couche de sédiments a été imposée au modèle, étant donné qu'aucune information n'était disponible sur la distribution verticale de la granulométrie. Autrement dit, rien n'était imposé au modèle concernant la profondeur des matériaux érodables. Pour le modèle, ces matériaux étaient donc toujours disponibles si les conditions hydrauliques permettaient leur érosion.

Par ailleurs, une source significative de sédiments ne pouvait être imposée au modèle. Il s'agit des apports provenant des tributaires et du ruissellement de surface. Le volume de ces apports est estimé annuellement à 5 905 tonnes (POLY-GEO, 2006). Cette source de sédiments a une influence sur le bilan global à long terme du domaine modélisé et peut avoir un effet local lorsqu'une frayère est située à la sortie d'un tributaire, comme celles des PK 34,5 et 46.

Enfin, les apports sédimentaires provenant des glissements de terrain n'ont pas été considérés dans le modèle hydrosédimentaire, car ces derniers ne devraient pas influencer significativement le bilan sédimentaire à long terme.

Malgré cette tendance à surestimer l'érosion, il n'en demeure pas moins que le modèle a pu être calibré pour la charge sédimentaire à partir des mesures effectuées en 2003 et 2004. Cependant, il faut être prudent dans l'interprétation des résultats à l'échelle locale. Par exemple, au droit d'une section, il peut y avoir une incertitude plus grande sur les hauteurs érodées à long terme. En plus des points discutés précédemment, des conditions hydrodynamiques locales et particulières à un site donné peuvent influencer la dynamique sédimentaire. Il faut donc y voir plutôt une tendance potentielle à long terme, puisque les limites des modèles et les données disponibles ne permettent pas de quantifier l'érosion localement avec une certitude raisonnable. Les campagnes de terrain réalisées aux trois sites de fraie ont toutefois permis de bien caractériser les conditions locales.

4.4.3 Bilan sédimentaire des sables fins ($\varphi \leq 0,125$ mm)

En conditions actuelles, l'érosion et le transport des sables fins se produisent principalement durant les crues pour la rivière Romaine. Les débits pour transporter

ces sédiments étant faibles (section 4.4.4.3), leur sédimentation survient uniquement l'hiver.

En conditions futures, les volumes de sables fins fournis par érosion devraient demeurer globalement les mêmes. Par contre, l'érosion sera répartie tout au long de la période d'eau libre (de la mi-mai à la mi-octobre) et non plus en période de crue principalement, comme c'est le cas en conditions actuelles.

Toutefois, étant donné que les débits en hiver seront beaucoup plus élevés qu'en conditions actuelles, il n'y aura plus de période de sédimentation. Les débits seront toujours assez élevés (supérieurs à 200 m³/s) pour que la rivière puisse transporter les sables fins. Cette modification à la dynamique de ces sédiments a un impact sur la qualité des frayères durant la période de développement des embryons de saumon et ce sujet est abordé spécifiquement pour chacune des frayères au chapitre 5.

4.4.4 Capacité de mobilisation du pavement des frayères

4.4.4.1 Contrainte de frottement critique sur les frayères

Basée sur les équations de Julien (1998), la contrainte de frottement critique pour chacune des trois frayères est présentée au tableau 4-10. Étant donné que le substrat composant les frayères à saumon est non uniforme, le diamètre moyen (D50) est utilisé pour la détermination des contraintes.

Tableau 4-10. Contrainte de frottement critique pour les frayères à saumon.

τ_c (N/m ²) ^b	Frayère (PK)	D50 (mm) ^a	D*	θ (degré)	τ_{*c} (-)
28,52	34,5	35	885,36	40	0,050
13,66	46	18	455,33	38	0,047
42,21	49	50	1264,80	41	0,052

a Les valeurs de D50 sont tirées de GENIVAR (2006).

b Selon Julien (1998).

4.4.4.2 Contrainte de frottement τ_0 sur les frayères

Afin de vérifier si les conditions hydrauliques au droit des frayères à saumon permettent de mobiliser le substrat, la contrainte de frottement pour différentes périodes de retour de débits a été déterminée.

Frayère du PK 34,5

Sur la frayère du PK 34,5 (tableau 4-11 et figure 4-7), les conditions hydrauliques font en sorte que la contrainte de frottement demeure toujours bien en deçà de la contrainte de frottement critique, même pour un débit décennal ($\tau_c = 28,52 \text{ N/m}^2$ versus $\tau_0 = 9,0 \text{ N/m}^2$). De plus, le diamètre maximum des particules pouvant être mises en mouvement lors d'événements hydrologiques fréquents est de 9 mm.

Frayère du PK 46

Sur la frayère du PK 46 (tableau 4-11 et figure 4-8), les conditions hydrauliques font en sorte que la contrainte de frottement est relativement constante avec l'augmentation des débits et est bien en deçà de la contrainte de frottement critique ($\tau_c = 13,66 \text{ N/m}^2$ versus $\tau_0 = 1,4 \text{ N/m}^2$). De plus, le diamètre maximum des particules pouvant être mises en mouvement est de 2 mm.

Frayère du PK 49

Au droit de la frayère du PK 49 (tableau 4-11 et figure 4-9), le gradient hydraulique plus élevé fait en sorte que les contraintes de frottement sont du même ordre de grandeur que les contraintes de frottement critiques, mais demeurent inférieures.

De plus, le diamètre maximum des particules pouvant être mises en mouvement varie entre 40 et 47 mm en fonction de la crue, mesures légèrement inférieures au D50 qui est de 50 mm.

Tableau 4-11. Contrainte de frottement sur les principales frayères à saumon de la rivière Romaine pour différentes périodes de retour.

Récurrence Q (m ³ /s) (année)	a	PK 34,5			PK 46			PK 49		
		τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_o (m/m)	τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_o (m/m)	τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_o (m/m)
2	1 523	5,4	8	0,00010	1,4	2	0,000025	32,2	40	0,00058
5	1 883	6,3	9	0,00010	1,3	2	0,000023	34,3	42	0,00057
10	2 077	6,7	9	0,00011	1,3	2	0,000022	35,3	43	0,00054
40	2 381	7,3	10	0,00011	1,4	2	0,000021	36,6	45	0,00051
100	2 549	7,5	10	0,00011	1,4	2	0,000021	37,3	44	0,00049
1 000	2 906	8,3	12	0,00011	1,4	2	0,000020	38,6	46	0,00046
10 000	3 208	9,0	12	0,00011	1,4	2	0,000019	39,8	47	0,00045

a Les débits sont issus des stations MEQ 073801 (PK 16) et MEQ 073802 (PK 266) du Centre d'expertise hydrique du Québec.

Figure 4-7 Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 34,5

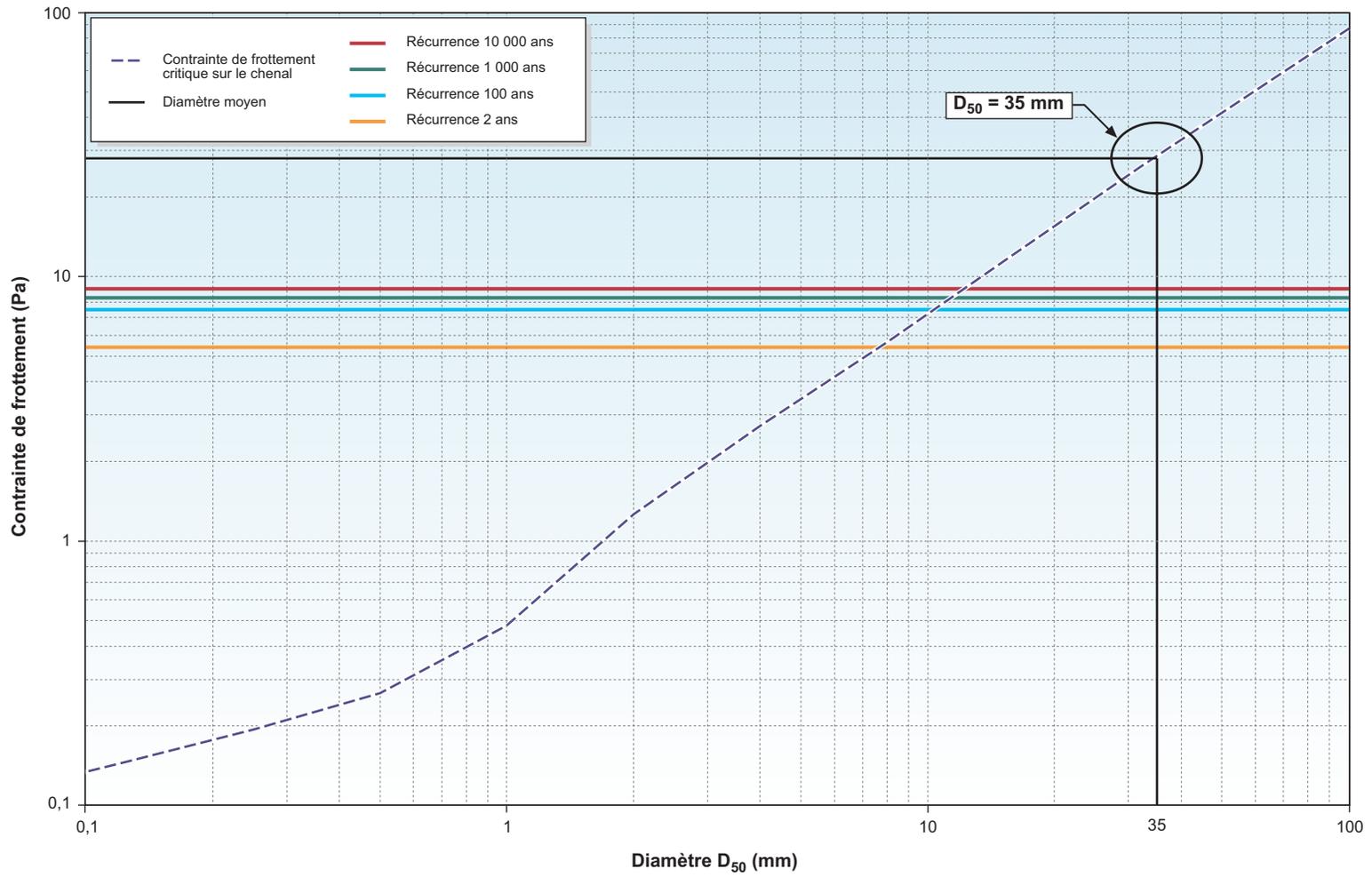


Figure 4-8 **Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 46**

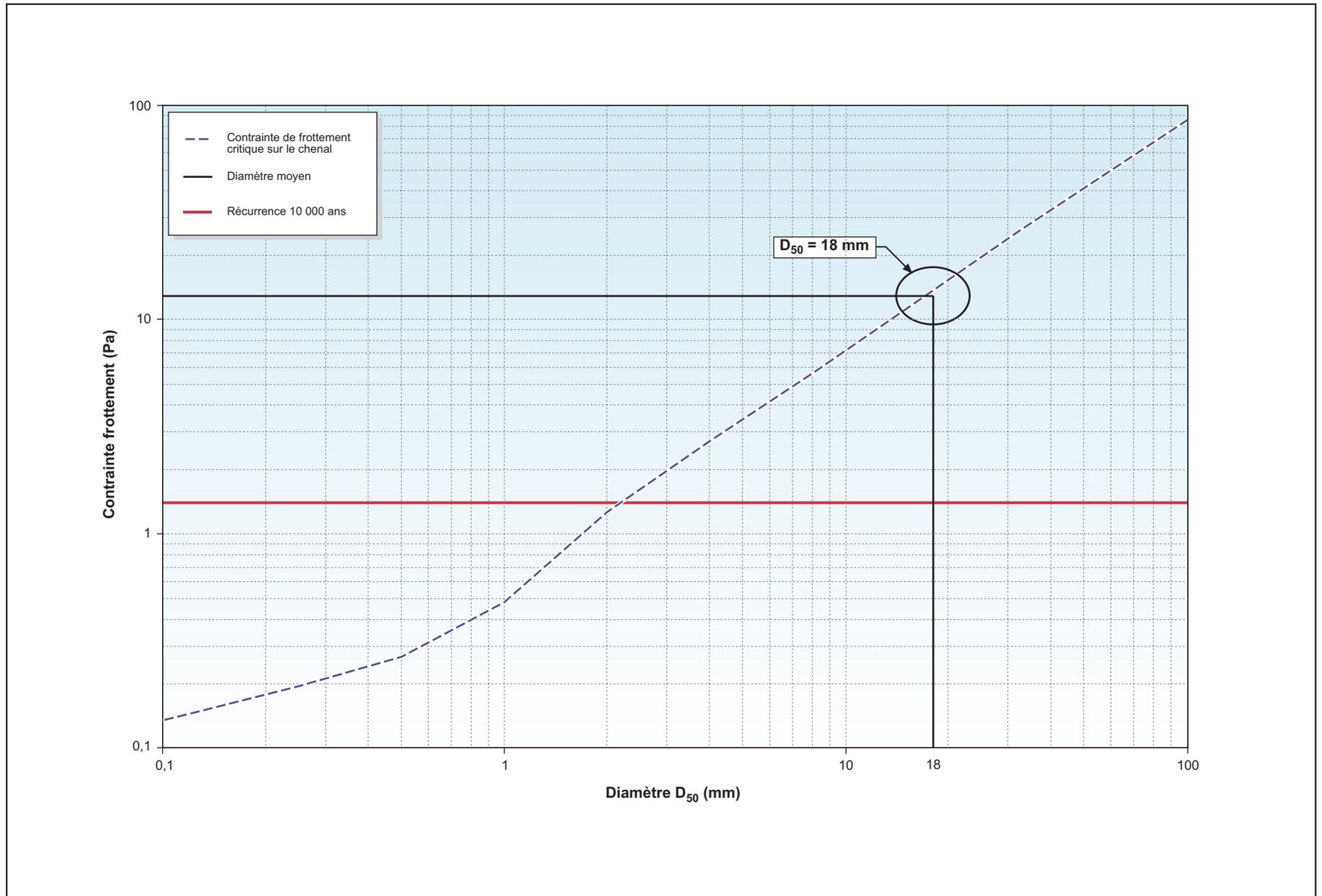
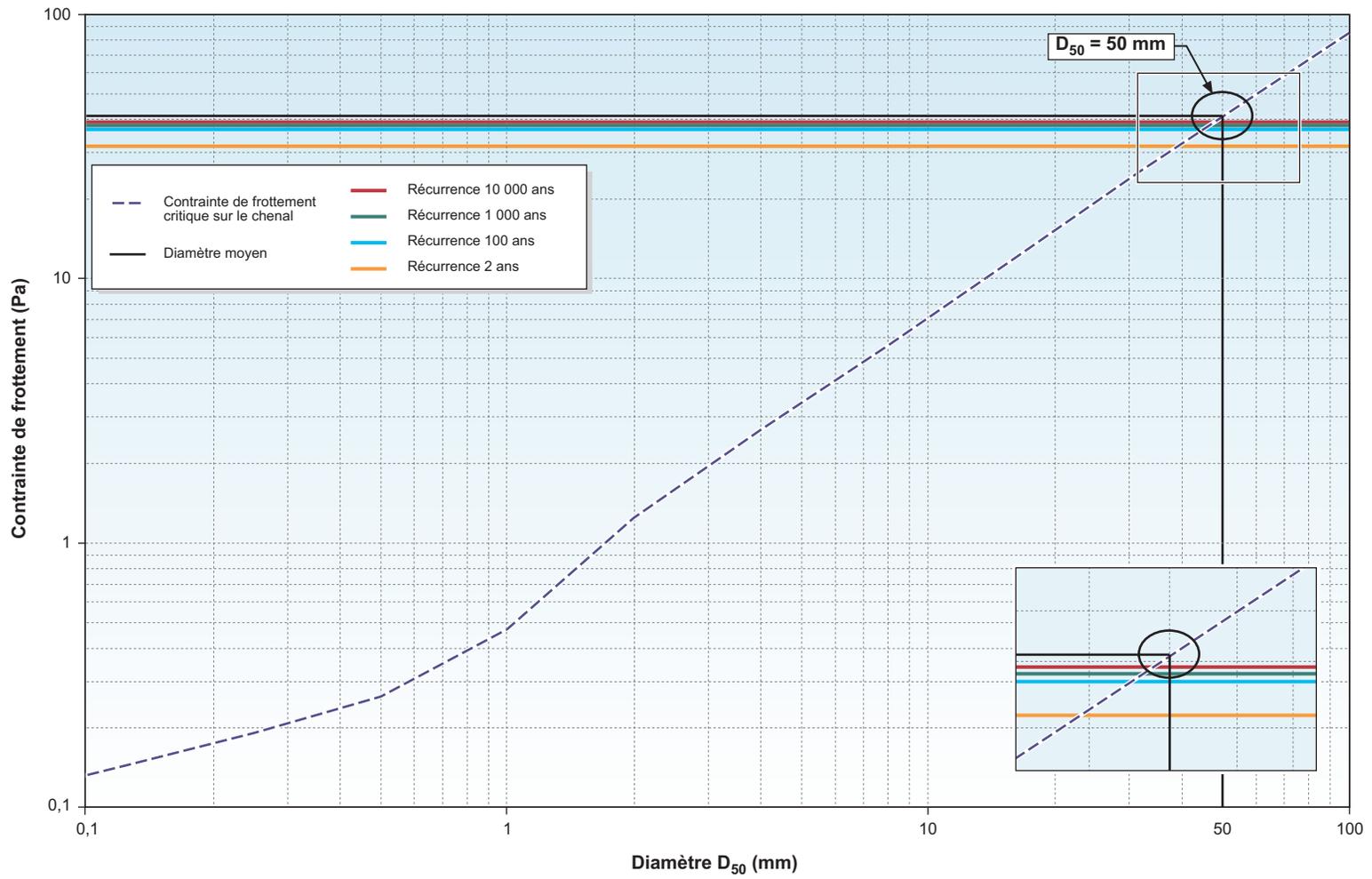


Figure 4-9 Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 49



4.4.4.3 Débit minimum pour la mise en mouvement des sables fins ($\phi < 0,125$ mm)

Le débit minimum requis (tableau 4-12), pour chaque frayère, afin que la rivière ait la capacité de mettre en mouvement les sables fins est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tableau 4-12. Débit minimum requis pour la mise en mouvement des sables fins.

Frayère (PK)	Débit minimum requis ^a (m^3/s)
34,5	< 100
46	< 100
49	< 100

a Basé sur un D50 de 0,089 mm et une contrainte de frottement critique de $0,12 \text{ N/m}^2$.

4.4.4.4 Synthèse

Les résultats montrent que la rivière Romaine n'a pas la capacité (compétence) de mobiliser le pavement des frayères à saumon atlantique, et ce, même pour les événements hydrologiques extrêmes.

Les débits minimum requis pour mobiliser les sables fins sont très faibles (tableau 4-12) et ces derniers pourront donc être pris en charge par la rivière tout au long de l'année en conditions futures.

Notons que ces analyses sont basées sur des conditions moyennes d'écoulement au droit d'une section. Il peut cependant y avoir des conditions hydrodynamiques locales qui peuvent créer des contraintes suffisantes pour mobiliser le pavement, comme l'influence d'un tributaire. À cet égard, les sections 5.3.2.3 et 5.4.2.3 analysent le rôle potentiel des tributaires pour les frayères situées aux PK 34,5 et PK 46.

Observations recueillies lors de la campagne de terrain de 2005-2006

Les observations faites lors de la campagne de mesures sur les frayères à saumon confirment les analyses théoriques concernant la capacité de mobilisation du pavement.

En effet, l'infiltration des sédiments fins dans les nids artificiels s'est effectuée tout au long de la période d'incubation, même lors de la crue de printemps ($1\,328 \text{ m}^3/\text{s}$), laquelle n'a pas permis de mobiliser le pavement sur les trois frayères. Ce résultat montre que la rivière Romaine n'a pas la compétence de mobiliser le pavement des trois frayères pour une crue de récurrence moyenne (2 ans).

Une autre observation appuyant l'hypothèse selon laquelle la rivière Romaine possède une faible capacité à transporter les matériaux granulaires (gravier, cailloux et galets) en aval du PK 52,5 est la forme des deltas à l'embouchure des deux tributaires des frayères du PK 34,5 et du PK 46. En effet, ceux-ci sont orientés vers le centre de la rivière et ne présentent aucune déformation causée par l'écoulement des eaux dans le cours principal de la rivière (cartes 3-1 et 3-2). Si la Romaine avait une capacité de transport suffisante, ces deltas seraient vraisemblablement plus petits et plus étirés vers l'aval en raison de l'érosion causée par la rivière.

5. Dynamique sédimentaire au droit des frayères en conditions futures

5.1 Objectif spécifique

En se basant sur les résultats des chapitres précédents, l'objectif de ce chapitre est de décrire la dynamique sédimentaire anticipée au droit des trois principales frayères à saumon en conditions futures.

5.2 Principaux paramètres affectant le bilan sédimentaire

En phase d'exploitation des aménagements du complexe de la Romaine, le transport sédimentaire sera affecté principalement par les modifications au régime hydrologique et par la diminution des apports sédimentaires en provenance de l'amont de la centrale de la Romaine-1.

D'un point de vue hydrologique, le complexe de la Romaine aura comme effet de laminier significativement les crues et de régulariser le débit sur une base annuelle. Étant donné que le transport sédimentaire est observé essentiellement en période de crue, la régularisation du débit aura une modification sur la dynamique sédimentaire. Par contre, des déversements d'intensité variable sont prévus en moyenne une année sur deux (GENIVAR, 2006). Notons que des déversements se produisent lorsque le niveau maximum d'exploitation du réservoir est atteint, alors que le débit turbiné est à son maximum.

L'hydrogramme hivernal subira aussi de grandes modifications. Actuellement, la récession des débits débute au mois de décembre avec des valeurs moyennes de 200 m³/s pour atteindre des valeurs d'environ 75 m³/s au début d'avril. Durant cette période de faibles débits, il y a présence d'une couverture de glace sur pratiquement toute la rivière en aval de la future centrale de la Romaine-1. Le couvert de glace a pour effet d'augmenter la résistance à l'écoulement (rugosité) et engendre une surélévation du plan d'eau (augmentation de la profondeur) et une diminution des vitesses. En conditions actuelles, les faibles vitesses durant la période hivernale sont favorables à la sédimentation des sables et des sables fins. En phase d'exploitation, toutefois, le débit variera typiquement entre 200 et 400 m³/s, soit les débits correspondant à un ou deux groupes turbines-alternateurs en production. De plus, sur approximativement 10 km en aval de la centrale de la Romaine-1, soit entre le

PK 51,5 et le PK 41,5, la couverture de glace sera absente. Ces conditions ne seront plus favorables à la sédimentation des sables et des sables fins.

En ce qui concerne la charge sédimentaire provenant de l'amont de la centrale de la Romaine-1, elle est estimée en conditions actuelles à 25 200 t/an. Néanmoins, pour établir le bilan sédimentaire à long terme, cette charge a été fixée comme nulle étant donné la présence des réservoirs de la Romaine 1 et de la Romaine 2 qui favoriseront la rétention des sables transportés par la rivière.

5.3 Frayère du PK 34,5

5.3.1 Description générale du site

La frayère du PK 34,5 se trouve à environ 500 m en aval de la chute à Charlie et est la plus utilisée par le saumon. Elle est située dans le talweg de la rivière à une profondeur d'eau atteignant près de 4 m au débit moyen, ce qui est atypique d'une frayère à saumon.

Cette frayère est située à l'embouchure d'un tributaire se jetant en rive droite. Le substrat y est constitué de 19 % de sable, 33 % de gravier, 26 % de cailloux et 22 % de galets. Le D50 est de 35 mm.

5.3.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures

Les simulations montrent, à long terme, une tendance à l'érosion dans la zone de fraie. Avec la faible compétence de la rivière Romaine pour mobiliser le pavement, il advient que seuls les sables pourraient théoriquement être érodés.

5.3.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2$ mm)

Pour les sables, la rivière a, tant en conditions actuelles que futures, le potentiel d'éroder ce type de sédiments. Pour les sédiments plus grossiers que le sable, la rivière n'a pas la capacité de les transporter. De plus, aucune source en amont ne pourrait expliquer leur présence.

Tout indique que le substrat de cette frayère provient des vestiges laissés lors de la dernière déglaciation (Hardy, 2006). Le substrat de la frayère est donc resté en place au fil des siècles malgré des événements hydrologiques importants ayant pu survenir. Il n'y pas eu d'apport de matériaux grossiers provenant de l'amont. Ces observations portent à croire que seuls les sables pourraient potentiellement être érodés en conditions futures à cet endroit, puisque les crues seront beaucoup moins fréquentes et d'intensité moindre.

5.3.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm)

Tel que mentionné précédemment, le régime hydrologique en conditions futures fera en sorte qu'il n'y aura plus de périodes favorables à la sédimentation des sables fins ($\varphi \leq 0,125$ mm), ce qui aura un impact marqué sur la dynamique hydrosédimentaire de cette frayère. En effet, l'infiltration des sédiments $\varphi \leq 0,125$ mm observés en conditions actuelles (voir section 3.3.2.2), qui détériore la qualité de la frayère, est en bonne partie due au fait que les sédiments fins peuvent se déposer durant la période hivernale. Une fois ces sédiments déposés, le processus d'infiltration est grandement amplifié puisqu'il y a une plus grande quantité de sédiments fins disponible. Il est donc anticipé qu'avec le régime hydrologique futur, l'infiltration sera significativement diminuée, limitant ainsi la détérioration de la qualité de la frayère à la suite de la fraie.

5.3.2.3 Influence du tributaire

L'influence du tributaire sur la dynamique hydrosédimentaire de la frayère du PK 34,5 devrait être la même qu'en conditions actuelles. D'abord, il est important de rappeler que la frayère est située en eau profonde et qu'elle ne se trouve pas sur le delta du tributaire. De plus, dans la Romaine, les crues les plus importantes surviennent au printemps lors de la fonte des neiges et c'est à ce moment que la plus grande part du transport total est observée. Le réchauffement des températures, qui provoque la fonte des neiges, se fait progressivement dans l'ensemble du bassin versant. Par conséquent, il n'y a pas un déphasage significatif dans le temps entre la crue du tributaire et celle de la Romaine. Ainsi, actuellement, lors de la crue de printemps, la charge sédimentaire provenant du tributaire est transportée en bonne partie par la Romaine puisqu'elle est elle aussi en crue. En conditions futures, le débit dans la Romaine à cette période sera d'environ $485 \text{ m}^3/\text{s}$ et même plus élevé lors des années de déversements. Même à $400 \text{ m}^3/\text{s}$, la Romaine a la capacité de transporter les sables fins et les sables arrivant du tributaire, ce qui ne modifiera donc pas l'influence du tributaire sur la dynamique hydrosédimentaire de la frayère.

5.3.2.4 Glace

Tout comme en conditions actuelles, un couvert de glace sera présent au-dessus de la frayère et il n'y aura pas d'accumulation de frasil. Par contre, le rehaussement de la face inférieure du couvert de glace à la fin de l'hiver sera d'environ 1,3 m par rapport aux conditions actuelles (Groupe-conseil Lasalle, 2006). Étant donné que la frayère est située à une bonne profondeur, le comportement des glaces n'aura pas d'influence sur la dynamique de l'état du substrat de cette dernière.

5.3.2.5 Synthèse

La dynamique sédimentaire de la frayère du PK 34,5 sera très peu influencée en conditions futures. Une diminution de la quantité de sable pourrait survenir par

érosion et il n'y aura plus de sédimentation qui détériore la qualité de la frayère durant la période d'incubation des embryons de saumon. Il n'y aura pas non plus de modification significative de l'influence du tributaire sur la dynamique sédimentaire de cette frayère. Par ailleurs, rappelons que la température de l'eau durant la période hivernale sera légèrement plus chaude entre les PK 30 et 52, ce qui aura pour effet de modifier la période de développement des embryons qui sera plus courte (GENIVAR, 2006).

5.4 Frayère du PK 46

5.4.1 Description générale du site

Tout comme la frayère du PK 34,5, la frayère du PK 46 est localisée en rive droite de la rivière Romaine, également à l'embouchure d'un tributaire. La frayère est située à même et en périphérie du delta du tributaire, en bordure du talweg de la Romaine. Le substrat de la frayère est composé de 17 % de sable, de 62 % de gravier, de 20 % de cailloux et de 1 % de galets. Le D50 est de 18 mm.

5.4.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures

La dynamique hydrosédimentaire de la frayère du PK 46 est comparable en plusieurs points à celle du PK 34,5, bien qu'elle soit caractérisée par une profondeur moindre et ses matériaux constituants seraient aussi des vestiges de la dernière déglaciation (section 5.3.2.1). À long terme, une tendance à l'érosion est anticipée dans la zone de fraie. Avec la faible compétence de la rivière Romaine pour mobiliser le pavement, on anticipe que seuls les sables pourraient théoriquement être érodés.

5.4.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2$ mm)

L'érosion prévue en conditions futures peut être expliquée par le fait que cette frayère est située à quelques kilomètres seulement de la centrale de la Romaine-1, que les eaux seront alors beaucoup moins chargées en sédiments et que la rivière aura tendance à reconstituer sa charge sédimentaire (section 4.4.2.1). Le fait que les matériaux plus gros que le sable soient des vestiges de la dernière déglaciation porte à conclure que seuls les sables pourraient potentiellement être érodés en phase d'exploitation, puisque les crues seront beaucoup moins fréquentes et d'intensité moindre.

5.4.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125$ mm)

La dynamique sédimentaire anticipée des sédiments fins de la frayère du PK 46 est la même que pour la frayère du PK 34,5. Elle est expliquée en détail à la section 5.3.2.2. En somme, il n'y aura plus de sédimentation de sédiments fins durant l'hiver et, par conséquent, l'infiltration sera significativement diminuée, réduisant ainsi la détérioration de la qualité de la frayère après la saison de reproduction du saumon.

5.4.2.3 Influence du tributaire

La frayère du PK 46 débute à l'extrémité du delta du tributaire et se trouve en partie dans le chenal principal de l'écoulement de la Romaine. À l'étiage estival, une bonne partie du delta est exondée (carte 3-2) et on constate que le talweg du tributaire pénètre dans la Romaine avec une tendance à remonter vers l'amont. Ceci indique que le delta doit être composé de matériaux relativement grossiers puisqu'il a résisté au fil des ans aux crues de la Romaine. Les matériaux plus fins formant le delta semblent se déposer juste en aval du secteur exondé sur la carte 3-2. En aval du delta, la berge offre une pente plus forte et les vitesses sont plus élevées.

En supposant que les apports sédimentaires des tributaires du PK 34,5 et du PK 46 sont comparables, l'analyse développée à la section 5.3.2.3 est tout à fait applicable au site de la frayère du PK 46. En résumé, l'influence du tributaire sur la dynamique hydrosédimentaire de la frayère en conditions futures devrait être la même qu'en conditions actuelles.

5.4.2.4 Glace

Dans le secteur de la frayère du PK 46, la couverture de glace sera partielle en conditions futures (Groupe-conseil Lasalle, 2006), contrairement aux conditions actuelles. Il peut donc y avoir de la glace de rive au-dessus de la frayère, puisque cette dernière est située en partie dans le talweg de la rivière. Par contre, le rehaussement de la face inférieure du couvert de glace à la fin de l'hiver sera d'environ 0,8 m par rapport aux conditions actuelles (Groupe-conseil Lasalle, 2006).

Ce rehaussement du couvert de glace risque d'augmenter le taux de survie des embryons. En effet, deux campagnes de mesures indiquent que la glace peut atteindre le substrat dans la zone de fraie en conditions actuelles. Rappelons que tout indique que des appareils d'échantillonnage ont été arrachés par les glaces lors de la campagne de mesures 2005-2006 réalisée lors de la présente étude (annexe 4). En mars 2005, l'épaisseur de glace variait entre 0,70 m et 0,76 m en rive droite (Hydro-Québec, 2005a). La présence d'une glace de fond peut être néfaste à la survie des embryons, car elle bloque en partie l'écoulement intergranulaire qui assure les apports en oxygène dissous nécessaire au développement de ces derniers. Ainsi, un rehaussement du couvert de glace en conditions futures diminue les risques de formation de glace de fond.

5.4.2.5 Synthèse

La dynamique sédimentaire de la frayère du PK 46 sera très peu modifiée en conditions futures. Une diminution de la quantité de sable pourrait survenir par érosion et il n'y aura plus de sédimentation de particules fines qui détériorent la qualité de la frayère durant le développement des embryons. Il n'y aura pas de modification significative de l'influence du tributaire sur la dynamique sédimentaire de la frayère et le rehaussement du dessous du couvert de glace favorisera la survie des embryons. Enfin, rappelons que la période de développement de ces derniers sera écourtée en conditions futures, puisque la température de l'eau durant la période hivernale sera légèrement plus chaude entre les PK 30 et 52 (GENIVAR, 2006).

5.5 Frayère du PK 49

5.5.1 Description générale du site

La frayère du PK 49 est située sur une tête de seuil dans un bras secondaire formé par une île dans la rivière Romaine. Le substrat y est plus grossier que sur les deux autres frayères. Il est constitué principalement de 59 % de sable, 40 % de gravier, de 10 % de cailloux et de 30 % de galets. Le D50 est de 50 mm. Notons aussi la présence de blocs et de blocs métriques (15 %) entre les différents emplacements utilisés pour la fraie, dont le seuil naturel à l'entrée du bras secondaire.

Sur la frayère, qui est située à une élévation plus importante par rapport au talweg du bras principal, les vitesses d'écoulement et les profondeurs sont peu élevées. En période d'étiage sévère, la frayère est parfois exondée. Les inventaires réalisés jusqu'à maintenant indiquent que la frayère n'est utilisée qu'une année sur deux par le saumon (GENIVAR, 2005).

5.5.2 Dynamique hydrosédimentaire anticipée en conditions futures

Les résultats des simulations montrent qu'il y aura, à long terme, une faible érosion dans la zone de fraie. Bien que les eaux dans ce secteur en conditions futures seront beaucoup moins chargées en sédiments par rapport aux conditions actuelles, il est très peu probable qu'une érosion significative se produise sur cette frayère. En effet, la présence de blocs et de blocs métriques limitera l'érosion. GSTARS étant un modèle unidimensionnel, la granulométrie imposée doit être la même sur toute la section d'écoulement. Pour obtenir une modélisation la plus représentative possible des zones de fraie, la granulométrie décrite au tableau 4-1 a été imposée et ne considère ni les blocs, ni le seuil naturel qui protègent les zones de fraie. Par conséquent, le modèle érode le peu de sable et une partie des graviers de cette

frayère. Or, ces derniers sont en quelque sorte protégés par les matériaux plus grossiers et l'érosion potentielle sera nécessairement faible en conditions futures.

5.5.2.1 Sable ($0,125 < \varphi < 2 \text{ mm}$)

Les apports en sable seront presque nuls en conditions futures. Il n'y en aura pratiquement pas dans les eaux de la Romaine et, contrairement aux deux autres frayères, il n'y a pas de tributaire se déversant à proximité de la frayère. Notons qu'un très faible pourcentage de sable (5 %) compose le substrat de la frayère. Le régime hydrologique futur n'affectera pas la dynamique sédimentaire des sables de cette frayère.

5.5.2.2 Sable fin ($\varphi \leq 0,125 \text{ mm}$)

La dynamique sédimentaire anticipée des sédiments fins est la même que pour les frayères du PK 34,5 et du PK 46. En résumé, il n'y aura plus de sédimentation de particules fines durant l'hiver et, par conséquent, l'infiltration sera significativement diminuée, ce qui améliorera la survie des embryons enfouis dans le substrat de la frayère durant leur développement.

5.5.2.3 Glaces

Contrairement aux conditions actuelles, il n'y aura pas de couvert de glace sur cette frayère en conditions futures (Groupe-conseil Lasalle, 2006). L'épaisseur de glace mesurée dans ce bras très peu profond à la fin de l'hiver 2005 variait entre 0,7 et 0,8 m (Hydro-Québec, 2005a). En conditions actuelles, les glaces peuvent donc atteindre le substrat de la frayère, ce qui n'est pas favorable à la survie des œufs. L'absence de couvert de glace pourrait donc améliorer la survie des œufs de saumon de cette frayère (voir section 5.4.2.4 pour détails).

5.5.2.4 Synthèse

En somme, la dynamique sédimentaire de la frayère du PK 49 sera très peu influencée en conditions futures. Étant donné que le substrat de cette frayère est très grossier, aucune érosion n'est anticipée. Il n'y aura plus de sédimentation de particules fines ni de formation de couvert de glace, ce qui favorisera une meilleure survie des embryons de saumon enfouis dans le substrat de cette frayère. Enfin, rappelons que la période de développement des embryons sera un peu plus courte en conditions futures, puisque la température de l'eau durant la période hivernale sera légèrement plus chaude entre les PK 30 et 52 (GENIVAR, 2006).

6. Discussion générale

Les crues artificielles (ou crues d'entretien) sont une solution de plus en plus souvent envisagée pour maintenir la qualité du substrat des frayères de salmonidés dans les rivières régularisées (CCRHP, 2000; Reiser et coll., 1987; Wilcock et coll., 1996b). En imitant les crues naturelles, elles préviennent les problèmes d'ensablement et d'infiltration et permettent ainsi de réduire la mortalité des œufs en incubation durant la saison hivernale.

Il existe différentes méthodes pour déterminer les caractéristiques que doivent posséder de telles crues. Cependant, à notre connaissance, mis à part Reiser et coll. (1989), aucun auteur ne mentionne l'importance de déterminer tout d'abord s'il est requis ou non de procéder à des crues d'entretien avant d'en déterminer les caractéristiques. Les programmes de crues d'entretien sont souvent établis avant même d'avoir préalablement évalué leur nécessité selon la rivière et selon le projet envisagé.

Pour évaluer la nécessité de faire des crues d'entretien, Reiser et coll. (1989) proposent quelques méthodes d'analyse. Ces dernières impliquent la caractérisation du substrat, du transport sédimentaire et de la géomorphologie fluviale.

Dans le cadre de la présente étude, toutes ces méthodes ont été utilisées dans l'optique de déterminer si un programme de crues d'entretien était nécessaire en conditions futures dans la Romaine. Or, les résultats obtenus montrent que ce n'est pas le cas. La synthèse des résultats menant à cette conclusion est présentée à la section suivante (6.1).

6.1 Synthèse des résultats menant à la conclusion de ne pas procéder à des crues d'entretien sur la Romaine

Les résultats des campagnes d'échantillonnage réalisées en 2005-2006 indiquent que les processus de sédimentation et d'infiltration des particules fines sont survenus pendant toute la période de développement des embryons. Aucune mobilisation du pavement ne s'est produite sur toute la durée de l'étude, même lors de la crue printanière de 2006 qui correspond à peu près à une crue moyenne de récurrence entre 1,5 et 2 ans. Donc, contrairement à ce qui est généralement observé dans d'autres rivières à saumon (Levasseur et coll. 2006a), les crues de la Romaine ne permettent pas de mobiliser le pavement des frayères et de nettoyer leur lit.

Un autre résultat qui abonde dans ce sens est l'ampleur considérable des débits requis pour mobiliser le pavement des frayères, lorsque ce dernier est évalué théoriquement par les équations de contrainte tractrice. En effet, à la section 4.4.4.2, il a été démontré que des débits supérieurs à une période de retour de 10 000 ans ($3\,205\text{ m}^3/\text{s}$) seraient requis pour mobiliser le pavement. Cette démonstration théorique, combinée aux observations de terrain, montre que la Romaine n'a pas la capacité d'assurer le nettoyage du substrat des frayères en conditions actuelles. C'est pourquoi la mise en place d'un programme de crues d'entretien n'est pas requise.

Par ailleurs, l'analyse des modifications hydrosédimentaires en conditions futures renforce également cette conclusion. En conditions actuelles, on a constaté que l'hiver est la seule période où se produit la sédimentation des particules fines sur le lit de la rivière. Ces dépôts sont remis en suspension au tout début de la crue printanière, tel qu'observé en 2004 par Environnement Illimité (Environnement Illimité, 2005). En conditions futures, les conditions de débits ne permettront plus le dépôt des sédiments fins puisque la rivière aura la capacité de les transporter tout au long de l'année. Tel que mentionné à la section 4.4.3, l'arrêt de la sédimentation des particules fines durant l'hiver limitera considérablement le processus d'infiltration qui est à l'origine de la détérioration de la qualité des frayères observée durant la période d'incubation des œufs de saumon.

De plus, en conditions futures, les apports en sable provenant de l'amont du barrage de la Romaine-1 seront à toutes fins utiles coupés. Le modèle hydrosédimentaire montre que cette diminution des apports en sable, combinée au laminage des crues, fait en sorte qu'il y aura une tendance à l'érosion des sables sur les frayères des PK 34,5 et 46. Dans le substrat de la frayère du PK 49, il y a très peu de sable (5 %) et il est anticipé que cette tendance se maintiendra en conditions futures.

Enfin, le renouvellement des graviers et des cailloux, qui constituent le substrat essentiel d'une frayère à saumon, est généralement assuré lors d'événements de crue. Dans la Romaine, il a déjà été mentionné que le pavement des frayères est constitué de matériaux reliques datant de la dernière déglaciation et qu'il n'y a donc plus de renouvellement de ces matériaux par les crues. D'une part, la rivière n'a pas la capacité de les transporter et d'autre part, ces matériaux ne sont pas présents sur les berges ou le lit de la rivière en aval de la Grande Chute (PK 52,5). Un programme de crues d'entretien ne permettrait pas de modifier cette condition actuelle.

En définitive, les analyses et les observations faites dans la présente étude mènent à la conclusion qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des crues d'entretien dans la rivière Romaine aux fins de nettoyage des frayères à saumon. Toutefois, les méthodes généralement utilisées pour décrire les caractéristiques des débits d'entretien ont tout de même été examinées. La section suivante (6.2) décrit brièvement chacune de ces méthodes et présente ce qu'il en résulterait si elles étaient appliquées à la présente situation.

6.2 Examen des méthodes généralement utilisées pour déterminer les caractéristiques des débits d'entretien

Plusieurs méthodes ont été mises au point afin de déterminer les caractéristiques des débits d'entretien. Elles peuvent être subdivisées en trois types, soit les méthodes basées sur l'analyse hydrologique, sur la morphologie du cours d'eau et sur la mécanique du transport sédimentaire.

6.2.1 Méthodes basées sur l'analyse hydrologique

De manière générale, la forme d'une section de rivière est déterminée par une série d'événements hydrologiques. En général, les débits pleins bords sont ceux qui sont le plus en mesure de maintenir et de transformer la forme du lit d'une rivière. Ces débits sont aussi considérés comme étant les plus efficaces du point de vue du transport sédimentaire (Simons et coll., 1981). S'ils sont déversés pour une certaine durée, un transport sédimentaire adéquat aura lieu et permettra d'entretenir les formes initiales de la rivière tout en préservant une bonne qualité du substrat. Selon Reiser et coll. (1989), le débit pleins bords correspond approximativement à une crue de récurrence 1,5 an pour les rivières composées d'un lit de gravier. C'est aussi ce qui ressort d'une étude menée sur 47 rivières de l'Ontario où les débits pleins bords sont associés à une récurrence variant entre 1,5 et 1,7 année (Annable, 1994; OMNR, 2004).

D'autres méthodes basées sur le débit moyen annuel (QMA) ont également été utilisées. La méthode de Tennant, la plus utilisée dans l'Ouest américain (Reiser et coll., 1987), consiste à utiliser 2 fois le QMA comme débit d'entretien. Wiley et coll. (1995) recommandent d'utiliser 2,8 fois le QMA comme débit d'entretien pour la rivière Bighorn, au Wyoming, tandis que Wesche (1987) préconise un débit équivalent à 2,3 fois le QMA pour la rivière Little Snake, également au Wyoming. Enfin, Wesche et coll. (1991) suggèrent 12 fois le QMA comme débit d'entretien pour différentes rivières de montagne.

Or, pour le cas de la rivière Romaine, il a été démontré que le substrat des frayères s'est détérioré durant la période de développement embryonnaire 2005-2006 et que le pavé n'a pas été mobilisé par une crue de $1\,328\text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à une crue de 1,5 à 2 ans, ce qui équivaut à 4 fois le QMA. La recommandation d'un débit de cette récurrence dans la Romaine n'est donc pas justifiable, puisque ce débit ne pourrait permettre le nettoyage du substrat des frayères.

De plus, ces méthodes sont souvent très imprécises. Wesche et coll. (1983) ont noté une différence moyenne de 60 % pour les débits de crue d'entretien recommandés dans deux études réalisées sur la même rivière dans le Wyoming. Des différences de l'ordre de 600 à 900 % ont également été notées en comparant les méthodes de Estes (1984) et d'Orsborn (1982) avec la méthode de Tennant (1975).

6.2.2 Méthodes basées sur la morphologie du cours d'eau

Les méthodes basées sur la morphologie du cours d'eau sont réalisées généralement en parallèle aux études hydrologiques et sont plutôt liées à l'évaluation des paramètres de forme du lit du cours, en particulier la profondeur aux débits de pleins bords. Leopold et Maddock (1953), puis Parkers (1979), ont développé des relations de ce genre pour différentes régions des États-Unis. Parker (1979) a établi, sur la base d'une analyse de contrainte tractrice critique, que le lit des cours d'eau alluviaux était mobilisé à des profondeurs d'eau supérieures à 0,83 fois la profondeur au débit de pleins bords. Les relations issues de ces méthodes de détermination des débits d'entretien ne sont souvent applicables qu'à une seule région et leur efficacité doit aussi faire l'objet de suivis sur le terrain (Reiser et coll., 1989).

Dans le cas de la Romaine, la profondeur pleins bords correspond approximativement à un débit de crue d'une récurrence de 2 ans ($1\,523\text{ m}^3/\text{s}$). D'après la méthode de Parker (1979), la profondeur qui peut mobiliser le pavé du lit correspond à 83 % de la profondeur pleins bords associée, de ce fait, à un débit moindre que $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$. Or, rappelons que le pavé des frayères de la Romaine n'a pas été mobilisé pour une crue de cette envergure. Bref, cette méthode ne semble pas adéquate pour ce qui est de la rivière Romaine.

6.2.3 Méthodes basées sur la mécanique du transport sédimentaire

Les méthodes basées sur la mécanique du transport sédimentaire sont plus élaborées et nécessitent une plus grande quantité de relevés sur le terrain. La grande variabilité de l'hydrologie des rivières et la difficulté de récolter des données

de terrain ont mené au développement de plusieurs modèles empiriques dont les prédictions sont parfois très différentes. Le concept de seuil d'initiation du transport, selon lequel un certain débit minimum est nécessaire pour mettre en mouvement les sédiments, est largement utilisé. Ce concept est abordé principalement à l'aide des paramètres hydrauliques, comme la vitesse critique et la contrainte de frottement critique (Reiser et coll., 1989). D'autres méthodes sont élaborées à partir d'équations du transport sédimentaire, comme celle de Meyer-Peter et Muller (1948) et celle de Parker et coll. (1982). D'après Reiser et coll. (1989), ces méthodes sont les plus fiables pour déterminer le débit d'une crue d'entretien. D'ailleurs, il est à noter que ces modèles sont ceux utilisés par le logiciel de simulation GSTARS qui a servi à la modélisation du transport sédimentaire dans la présente étude.

D'après le calcul des forces de frottement critique au droit des frayères, un débit de récurrence supérieur à 10 000 ans ($3\,208\text{ m}^3/\text{s}$) est requis pour mobiliser le pavement de la rivière Romaine. Ce calcul va dans le même sens que les résultats de la présente étude, présentés à la section 6.1, indiquant que la rivière Romaine n'a pas la compétence de mobiliser le pavement du lit des frayères.

6.2.4 Interprétation des résultats issus de l'utilisation des différentes méthodes

Certains résultats issus de l'utilisation des différentes méthodes, généralement utilisées pour déterminer les caractéristiques des débits d'entretien, confirment la conclusion de notre étude, selon laquelle on n'a pas besoin de crues d'entretien. Par ailleurs, d'autres résultats indiquent que certaines de ces méthodes ne sont pas applicables au cas particulier de la Romaine.

En effet, ces méthodes ont été développées et utilisées pour des rivières très différentes de la rivière Romaine. Plusieurs de ces méthodes sont issues d'études ayant été menées sur des rivières graveleuses à forte pente et caractérisées par des conditions hydrosédimentaires qui ne sont pas comparables à celles qui prévalent sur la Romaine.

Dans sa partie aval (du PK 51,5 à l'embouchure), où sont situées les principales frayères, la rivière Romaine est très large, la pente et les vitesses sont faibles et plusieurs bancs de sable sont présents. De plus, au droit des frayères, le substrat est majoritairement constitué de matériaux reliques datant de la dernière glaciation (Hardy, 2006), composés de graviers, de cailloux et de galets. Ces matériaux ne peuvent pas être renouvelés lors des crues, car le cours d'eau n'a pas la compétence pour le faire. Par conséquent, il appert qu'en aval du PK 51,5, la

Romaine est atypique, puisqu'elle se distingue à plusieurs égards de la plupart des rivières à saumon au Québec. En effet, ces dernières sont principalement des rivières graveleuses, dont la pente hydraulique est relativement forte, ce qui favorise des vitesses d'écoulement élevées.

Ces caractéristiques, qui sont propres à la Romaine et qui la différencient de la plupart des rivières à saumon typiques, permettent de mieux comprendre un des principaux résultats obtenus au cours de la présente étude et qui semble aller à l'encontre de nombreuses observations citées dans la littérature scientifique. En effet, de façon générale, dans la plupart des rivières, le pavement est mobilisé lors d'événements hydrologiques importants (Carling, 1987; Diplas et Parker, 1992), tandis que sur la Romaine, tout indique qu'aucune mobilisation du pavement ne se produit, même lors de la crue printanière (récurrence de 1,5 à 2 ans). La Romaine n'a donc pas la capacité d'assurer le nettoyage du substrat des frayères en conditions actuelles.

7. Conclusion

Cette étude démontre qu'après la fraie, en conditions actuelles, la quantité de sédiments fins ($\varphi \leq 0,125$ mm) pouvant affecter la survie des œufs augmente dans le substrat des deux principales frayères à saumon de la rivière Romaine (PK 34,5 et PK 46). Cette modification du substrat serait principalement associée aux événements de transport en charge de fond et aux processus d'infiltration durant la majeure partie de l'année, à l'exception de la période hivernale qui est plutôt caractérisée par la mise en place de processus de sédimentation.

En conditions actuelles, les crues de la rivière Romaine ne participent pas au maintien de la qualité du substrat et au nettoyage de ses frayères à saumon comme il est généralement observé sur d'autres rivières du Québec. La Romaine n'a pas la capacité de mobiliser le pavement de son lit au droit des frayères. Ainsi, tout indique que le substrat de ces dernières est principalement nettoyé par les géniteurs lors de la fraie.

Il appert également que le substrat des frayères correspond à des pavements reliques datant de la dernière déglaciation. Les graviers et les cailloux qui s'y retrouvent ne sont pas transportés par les crues de la Romaine ou de ses tributaires, la rivière n'ayant pas la compétence pour le faire. Ces matériaux ne sont donc pas renouvelés par les conditions hydrologiques actuelles.

En conditions futures, les conditions hydrosédimentaires devraient favoriser le maintien de la qualité du substrat de fraie. En effet, le régime hydrologique fera en sorte que la rivière aura en tout temps la capacité de transporter les sédiments fins. Il n'y aura plus de période favorable à leur sédimentation comme c'est le cas actuellement durant la récession hivernale du débit, puisque les débits d'exploitation seront supérieurs aux débits critiques de sédimentation des particules fines.

En ce qui concerne les sables, les analyses montrent que la dynamique sédimentaire dans le secteur des frayères sera très peu modifiée et il y aura même une tendance à l'érosion de ces derniers. Cette tendance, combinée à l'absence ou au rehaussement du couvert de glace en hiver, donnent à penser que les conditions de survie des embryons seront favorisées en conditions futures.

L'ensemble des observations et des analyses effectuées au cours de l'étude indique qu'il n'est pas nécessaire de procéder à la mise en place d'un programme de crues d'entretien pour maintenir la qualité du substrat des frayères à saumon de la rivière Romaine.

8. Références bibliographiques

- ANDREWS, E.D., NANKERVIS, J.M. 1995. *Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers*. In: J.E. Costa, A.J. Miller, K.W.
- ANNABLE, W.K. 1994. *Morphological relations and rural watercourses in Southeastern Ontario for use in natural channel design*. Master thesis, University of Guelph, School of Engineering Guelph, Ontario, Canada.
- ANNEAR, T. 2002. *Instream Flows for riverine resource stewardship*. Instream Flow Council, 410 p.
- ARTHINGTON, A.H., BRIZGA, S.O., PUSEY, B.J., MCCOSKER, R.O., BUNN, S.E., LONERAGAN, N., BROWNS, I.O., YEATES, M. 1998. *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques*. Review of Methods. Arthington, A. H. and Zalucki, J. M. Canberra (Australie). 141 pp.
- BELTAOS, S., CALKINS, D.J., GATTO, L.W., PROWSE, T.D., REEDYK, S., SCRIMGEOUR, G.J., WILKINS, S.P. 1993. Physical effects of river ice. Dans : Prowse, T.D. et Gridley, N.C. (eds.) *Environmental aspects of river ice*. Chapitre 2, pp. 31-60.
- BESCHTA, R.L. et JACKSON, W.L. 1979. The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (36) : 204-210.
- BRAVARD, J.P., PETIT, F., 1997. *Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial*. Armand Colin Éditeur, 222 pages.
- CARLING, P.A. 1987. *Bed stability in gravel streams, with reference to stream regulation and ecology*. Pp. 321-347 in: K.S. Richards (ed), *River channels: environment and process*. Basil Blackwell, Oxford, U.K
- CCRHP. 2000. *Sand and gravel management and fish habitat protection in British Columbia salmon and steelhead streams*. Background paper no. 3, partie 9. <http://www.fish.bc.ca/html/fish2220.htm>
- CHURCH, M.A., MCLEAN, D.G., WOLCOTT, J.F. 1987. *River bed gravels: sampling and analysis*. Dans : Thorne, C.R., Bathurst, J.C. et Hey, R.D. (eds.) *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons Ltd. pp. 43-89.

- DIPLAS, P., G. PARKER. 1985. *Pollution of gravel spawning grounds due to fine sediments*. Project Report 240. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. University of Minneapolis. Minneapolis.
- DIPLAS, P., PARKER, G. 1992. Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. Dans : Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R. et Tacconi, P. (eds.) *Dynamics of gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, U.K.
- EINSTEIN, H.A. 1950. *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin No. 1026.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2004. *HYDAT*. Version 2.04. mise à jour du 28 janvier 2004.
- ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 2004. *Aménagements hydroélectriques de la rivière Romaine – Études préliminaires : mesure de la charge sédimentaire*. Rapport présenté à la direction Environnement et services techniques, Ingénierie, approvisionnement et construction d'Hydro-Québec par ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 43 p. et annexes.
- ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 2005. *Complexe de la Romaine – Études sédimentologiques et océanographiques de la rivière Romaine et de son delta*. Rapport de mission 2004 version préliminaire présentée à la direction principale – Expertise – Unité environnement, Hydro-Québec, par ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 115 p. et annexes.
- ESTES, C. C. 1984. Evaluation of Methods for Recommending Instream Flows to Support Spawning by Salmon. M.S. thesis, Washington State University, Pullman, Washington, 156 pp.
- FROSTICK, L.E., LUCAS, P.M., REID, I. 1984. *The infiltration of fine matrices into coarse-grained alluvial sediment and its implications for stratigraphical interpretation*. Journal of the Geological Society, London (141) : 955-965.
- GENIVAR. 2002. *Aménagement hydroélectrique de la Romaine-1 – Étude de la population de saumon atlantique de la rivière Romaine en 2001*. Rapport présenté à la direction Environnement et Services technique d'Hydro-Québec par le Groupe conseil GENIVAR. 119 p. et 10 annexes.
- GENIVAR. 2004a. *Complexe Romaine – Aménagement intégral de la rivière Romaine. Étude préliminaire sur les débits réservés et la faune ichtyenne*. Rapport du Groupe conseil GENIVAR à la direction Environnement et Services techniques d'Hydro-Québec. 134 p. et annexes.

- GENIVAR. 2004b. *Rivière Romaine. Modélisation hydrodynamique 1D entre les PK 0 et 192*. Rapport du Groupe conseil GENIVAR inc. à Hydro-Québec Production, Direction Aménagement de production, Hydraulique et Géotechnique. 95 p. et annexes.
- GENIVAR. 2005. *Complexe de la rivière Romaine – Faune ichthyenne : rapport d'inventaire 2004*. Rapport préliminaire de GENIVAR Groupe conseil inc. à la Direction de l'Environnement et Services techniques, Hydro-Québec Équipement. 222 p. et annexes.
- GENIVAR. 2006. *Complexe de la rivière Romaine – Détermination du régime de débits réservés pendant l'exploitation. Rapport sectoriel*. Rapport de GENIVAR Société en commandite pour Hydro-Québec, unité Équipement, Direction de l'Environnement et services techniques. Préfinal.
- GROUPE-CONSEIL LASALLE. 2006. *Projet du complexe de la Romaine. Étude du régime hydraulique en présence de glace*. Mandat réalisé pour Hydro-Québec, conception des aménagements de production, hydraulique et géotechnique. R.1617, juillet 2006.
- HARDY, F. 2006. Communication téléphonique avec François Hardy de POLY-GÉO.
- HAUSLE, D. A., COBLE, D.W. 1976. Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Trans. Am. Fish. Soc.* 105 (1): p. 57-63.
- HR WALLINGFORD. 1990. *Sediment transport, the Ackers and White theory revised*. Report SSR237, HR Wallingford, England.
- HYDRO-QUÉBEC. 2005a. *Rivière Romaine. Étude des glaces (février et mars 2005)*. Hydro-Québec Équipement, Unité géomatique, relevés techniques et gestion des données. Projet no. 0344. Avril 2005.
- HYDRO-QUÉBEC. 2006. *Aménagement de la rivière Romaine. Avant-projet. Études hydrologiques et énergétiques. Rapport sectoriel*. Préparé par Marc Barbet et coll., Montréal, Hydro-Québec.
- JULIEN, H.P., BERGERON, N.E. 2006. Effect of fine sediment infiltration on Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryo survival. *Hydrobiologia* (563) : 61-71.
- JULIEN, P.Y. 1998. *Erosion and sedimentation*. Cambridge university press. 280 p.
- KONDOLF, G. M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. Department of Landscape Architecture and Environment. *Environmental Management*, vol. 21 (4) : p. 533-551.

- KONDOLF, G.M., WILCOCK, P.R. 1996. *The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives*. *Water Resources Research* 32 : 2589-2599.
- KONDOLF, M. 2000. *Assessing salmonid spawning gravel quality*. *Transactions of the American Fisheries Society* (129) : 262-281.
- LEOPOLD, L.B., MADDOCK, T. 1953. *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 282-B.
- LEVASSEUR, M., BERGERON, N., LAPOINTE, M., BÉRUBÉ, F. 2006a. Effects of silt and very fine sand dynamics in Atlantic salmon (*Salmo salar*) redds on embryo hatching success. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (63):1450-1459.
- LEVASSEUR, M., BÉRUBÉ, F., BERGERON, N. 2006b. A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds. *Earth Surface Processes and Landforms* (31): 526-530.
- LISLE, T.E. 1989. Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research* (25) : 1303-1319.
- MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. 1948. *Formula for bed-load transport*. Proceedings of the international Association for Hydraulic Research, 2nd Meeting, Stockholm.
- MILHOUS, R. T. 1990. *Calculation of flushing flows for gravel and cobble bed rivers*. In *Hydraulic Engineering*, vol 1. Proceedings of the 1990 National Conference, edited by H.H. Chang and J.C. Hill, p. 598-603, American Society of Civil Engineering, New York.
- ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESOURCES, 2004. *The Waterpower Science Strategy: Understanding Stream Processes and the Effects of Altered Flow Regimes on Riverine Ecosystems*. Waterpower Project. Ontario Ministry of Natural Resources, version 1.0.
- ORSBORN, J.F. 1982. *Estimating spawning habitat using watershed and channel characteristics, in Acquisition and Utilization of Aquatic Habitat inventory Information*, Armantrout, N., Ed., Western Division, American Fisheries Society, 154.
- PARKER, G. 1979. *Hydraulic geometry of active gravel rivers*. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 105(HY9), 1185.
- PARKER, G., KLINGEMAN, P.C., MCLEAN, D.G. 1982. *Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams*. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 108, no. HY4, p. 544-571.

- PETERSON, R.H. 1978. *Physical characteristics of Atlantic salmon spawning gravels in some New Brunswick streams*. St-Andrews (NB), Fisheries and Oceans Canada. 28 pages.
- POLY-GÉO. 2002. *Aménagement hydroélectrique Romaine 1. Étude de la géomorphologie*. Rapport préliminaire présenté à Foramec et Hydro-Québec. 62 p. et annexes.
- POLY-GÉO. 2006. *Étude de la dynamique sédimentaire, Complexe de la Romaine*. Rapport présenté à Hydro-Québec Équipement. 121 p. et annexes.
- PROWSE, T.D. 1994. Environmental significance of ice to stream flow in cold regions. *Freshwater Biology* (32) : 241-259.
- PROWSE, T.D., CULP, J.M. 2003. *Ice breakup: a neglected factor in river ecology*. *Can. J. Civ Eng.* 30: 128-144.
- REISER, D.W., RAMEY, M.P., WESCHE, T.A. 1989. *Flushing Flows*. Chapter 4. In : Gore, J. A. and Petts, G. (Ed.), *Alternatives in regulated river management*, Boca Raton, Florida. 91-135.
- REISER, D.W., RAMSEY, M.P., LAMBERT, T.R. 1987. *Considerations in assessing flushing flow needs in regulated stream systems*. In : Craig J.F. and Kemper, J. B. (Ed.), *Regulated streams : Advances in ecology*, 45-57.
- SCHIEFER, K. 1975. *Atlantic salmon management study of the Romaine river*. A report for Quebec Iron and Titanium Corporation, Sorel. Québec. Beak Consultants Ltd. 16 p.
- SEAR, D.A. 1993. Fine sediment infiltration into gravel spawning beds within a regulated river experiencing floods: ecological implications for salmonids. *Regulated Rivers : Research and Management* (8) : 373-390.
- SHIELDS, A. 1936. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und Turbulenz forschung auf die Geschiebewegung*. Berlin: Mitteilungen der Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. N° 26.
- SHOONER, G. 1975. *Rivière Romaine. Mission de reconnaissance du 5 au 7 septembre 1975*. Rapport présenté à la Direction du service Environnement, Hydro-Québec. 17 p.
- SIMONS, D.B. LI, R. M., LAGASSE, P. et R.T. MILHOUS, 1981. *Proceeding: Workshop on Downstreams River Channel changes resulting from diversions of reservoir Construction*. U.S. Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-81/48.
- TENNANT, D.L. 1975. *Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources*. U.S. Fish and Wildlife Service Rep., Billings, MT.

- WESCHE, T. A., REISER, R. W., WICHERS, D. J. 1980. *Fishery resources and instream flow recommendations for streams to be impacted by Cheyenne's proposed phase II developments*. Completion report submitted to Wyoming Game and Fish Department, Wyoming Water Resources Research Institute.
- WESCHE, T.A., 1991. Flushing Flow Requirements of Mountain Stream Channels. Final report submitted to Wyoming Water Research Center University of Wyoming, Laramie, Wyoming. WWRE-91-18. 195 p.
- WESCHE, T.A., HASFURTHER, V., SKINNER, Q., HUBERT, W. 1983. *Development of methodology to determine flushing flow requirements for channel maintenance purposes*. Unpublished Manuscript, Wyoming Water Research Center, University of Wyoming.
- WESCHE, T.A., V.R. HASFURTHER, W.A. HUBERT et Q.D. SKINNER. 1987. *Assessment of Flushing Flow Recommendations in a Sleep, Rough, Regulated Stream. Symposium Proceeding, WWRC-87-23*.
- WILCOCK, P. R., A. F. BARTA, C. C. SHEA, G. M. KONDOLF, MATTHEWS, W. V. G., PITLICK J. 1996a. Observations of flow and sediment entrainment on a large gravel-bed river. *Water Resources Research* 32: p. 2897-2909.
- WILCOCK, P. R., G. M. KONDOLF, MATTHEWS, W. V. G., BARTA, A. F. 1996b. Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Water Resources Research* 32: p. 2911-2921.
- WILEY, D.O., WESCHE, T.A., HUBERT W.A. 1995. *Development and Evaluation of Flushing Flow Recommendation for the Bighorn River*. Phase I Report. WWRC-95-02.
- WILLIAMS, G. P., WOLMAN, M. G. 1984. *Downstream effects of dams on alluvial rivers*. In: Geological Survey Professional paper 286 U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 83 p.
- WU, F. C., CHOU, Y. J. 2003. Simulation of gravel-sand bed response to flushing flows using a two-fraction entrainment approach: model development and flume experiment. *Water Resources Research* 39 (8): p. 1211.
- YANG, C.T., SIMÕES, F.J.M. 2002. *User's manual For GSTARS 3.0*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.

ANNEXE 1

Lexique

ANNEXE 1. Lexique.

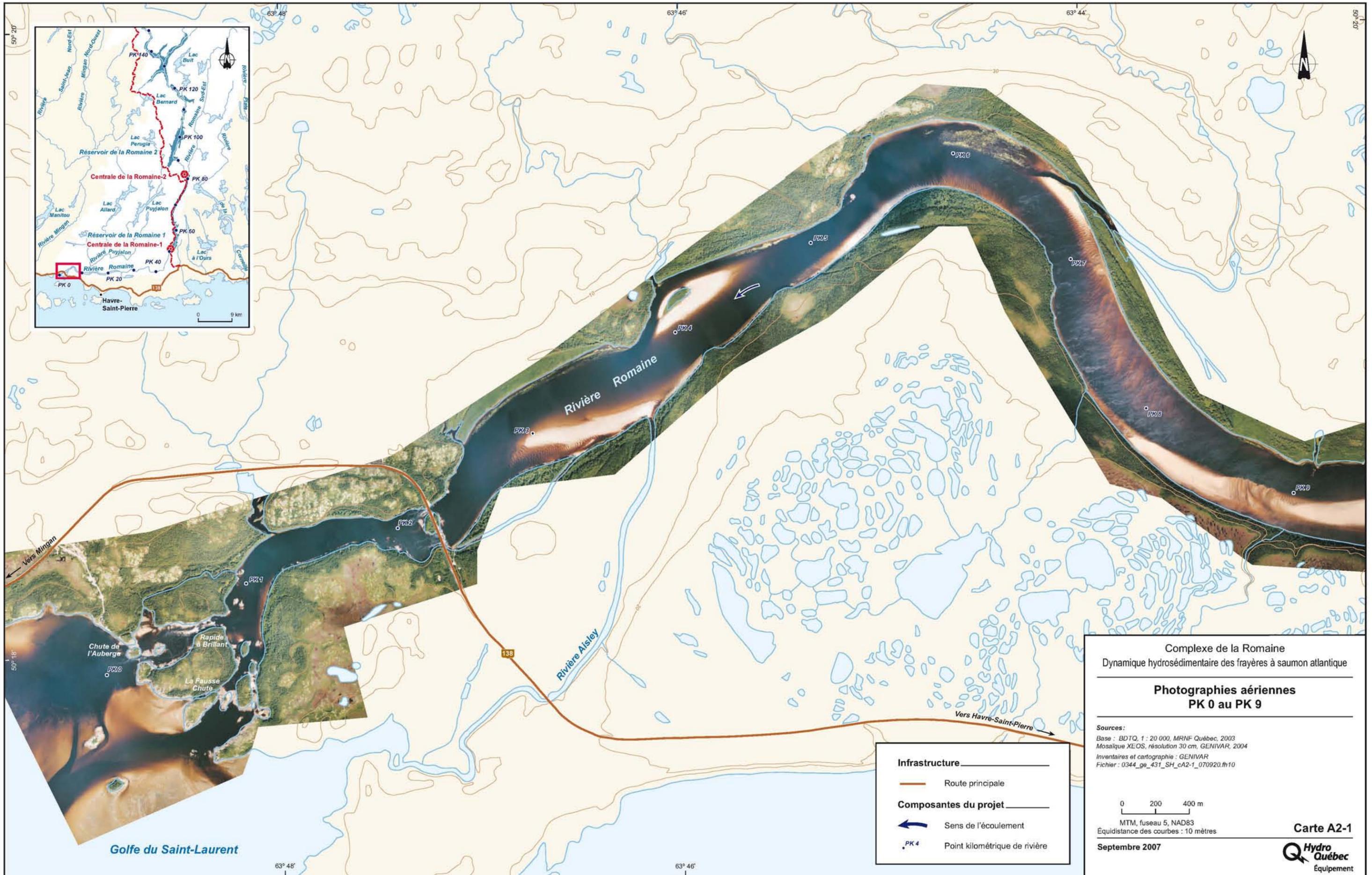
Bilan sédimentaire :	Différence entre la charge sédimentaire de la station amont (PK 53,5) et celle de la station aval (PK 3,8)
Bilan de reconstitution :	Charge sédimentaire calculée à partir de la relation de débit liquide versus débit solide
Charge de fond (CF) :	Quantité exprimée en tonnes de sédiments transportés en charge de fond
Charge sédimentaire :	Charge de fond et matière en suspension exprimées en tonnes transportées par l'eau
Contrainte de frottement :	Contrainte ou composante de la contrainte s'exerçant tangentiellement à un plan donné
D50 :	Diamètre dont 50 % de la masse totale est plus petit
D90 :	Diamètre dont 90 % de la masse totale est plus petit
Débit liquide :	Volume d'eau qui s'écoule à travers une section, par unité de temps
Débit solide :	Charge de fond et matière en suspension (exprimées en tonnes) reliées au débit liquide, soit à la station amont (PK 53,5), soit à la station aval (PK 3,8)
Équilibre sédimentaire :	Tronçon de rivière où les processus d'érosion et de sédimentation s'équivalent, donc une charge sédimentaire nulle
Infiltration :	Processus de pénétration de sédiments fins dans les interstices du lit de la rivière
Interstice :	Espace vide entre les particules constituant le substrat
Matière en suspension (MES) :	Quantité exprimée en tonnes de sédiments transportés en suspension
Pavement :	Couche de surface du lit de la rivière qui est composée de matériaux grossiers et caractérisée par des interstices larges et nombreux partiellement remplis par des sédiments plus fins

Annexe 1 (fin). Lexique.

Sable fin :	Particule dont le diamètre est inférieur à 0,125 mm (inclut silt, limon et argile)
Sable :	Particule dont le diamètre est entre 0,125 et 2 mm (inclut sable moyen et sable grossier)
Sédiment fin :	Particule dont le diamètre est inférieur à 2 mm
Sédimentation :	Chute des particules sur le lit de la rivière, par gravité, lorsque les vitesses de l'écoulement ne permettent plus de maintenir les particules en transport, que ce soit en suspension ou en charge de fond.
Sous-pavement :	Couche située sous le pavement qui est composée de matériaux plus petits que ceux constituant le pavement
Substrat :	Tout matériau, de toute taille, constituant le lit d'une rivière
Transport en charge de fond :	Sédiment qui se déplace en glissant, roulant ou sautant et qui reste en contact étroit avec le lit de la rivière
Transport en suspension :	Sédiment qui est emporté par l'écoulement et qui entre rarement en contact avec le lit de la rivière
Transport intragravier :	Déplacement des sédiments fins à l'intérieur du lit par l'écoulement intragravier
Transport total :	Transport qui inclut le transport en charge de fond et le transport en suspension
Turbidité :	Caractéristique d'une eau dont la transparence est atténuée en raison de la présence de particules fines en suspension, d'origine naturelle ou en raison des agents polluants

ANNEXE 2

Photographies aériennes à haute
résolution XEOS^{MC} de la zone d'étude



Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Photographies aériennes
PK 0 au PK 9

Sources :
Base : BDTQ, 1 : 20 000, MRNF Québec, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_431_SH_cA2-1_070920.fr10

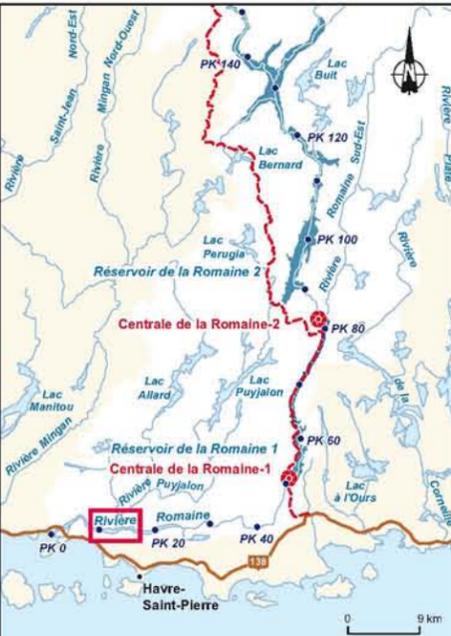
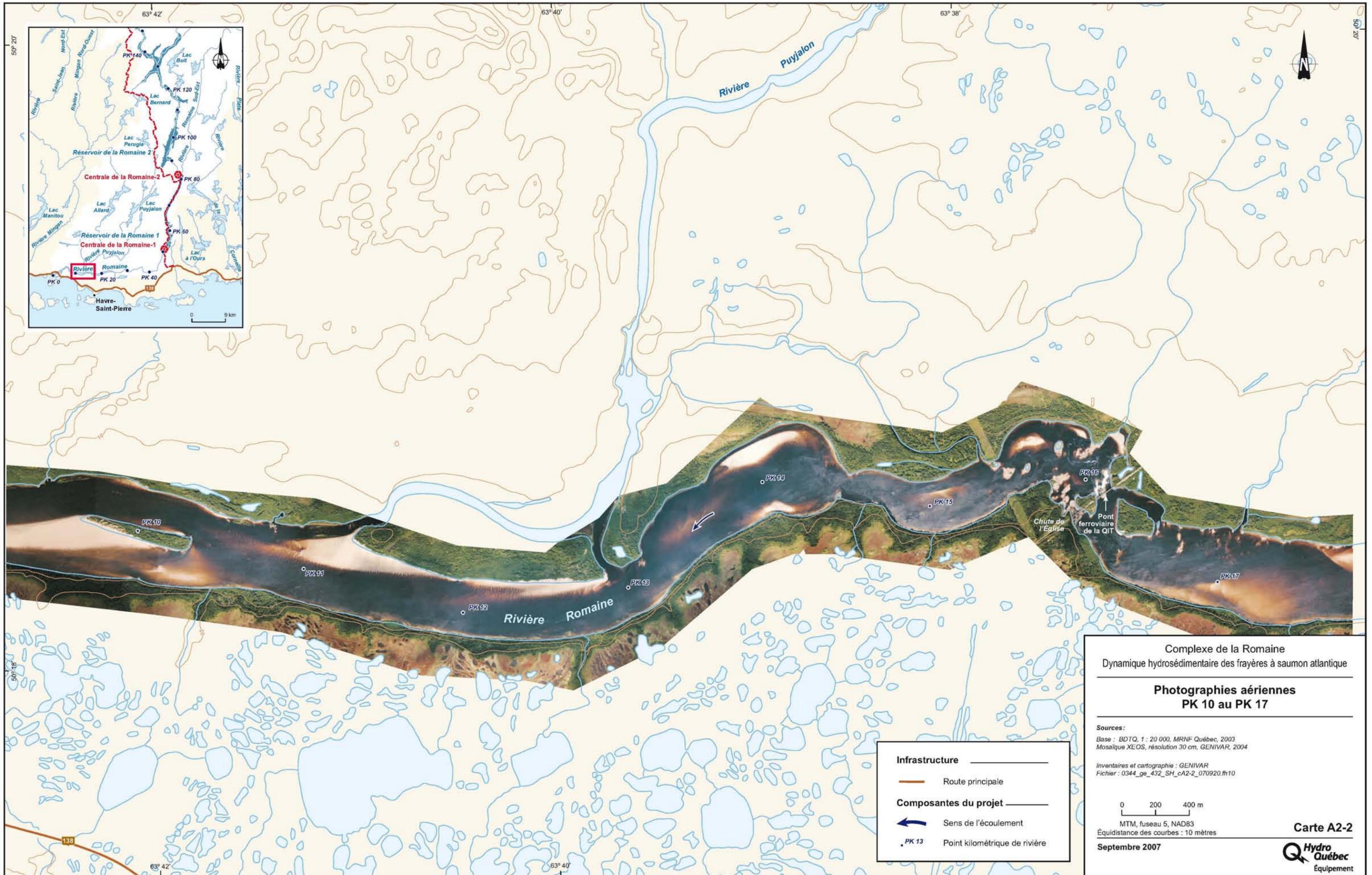
0 200 400 m
MTM, fuseau 5, NAD83
Équidistance des courbes : 10 mètres

Carte A2-1
Hydro Québec
Équipement

Septembre 2007

- Infrastructure**
- Route principale
- Composantes du projet**
- Sens de l'écoulement
 - Point kilométrique de rivière

Golfe du Saint-Laurent



- Infrastructure**
- Route principale
- Composantes du projet**
- Sens de l'écoulement
 - PK 13 Point kilométrique de rivière

Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Photographies aériennes
PK 10 au PK 17

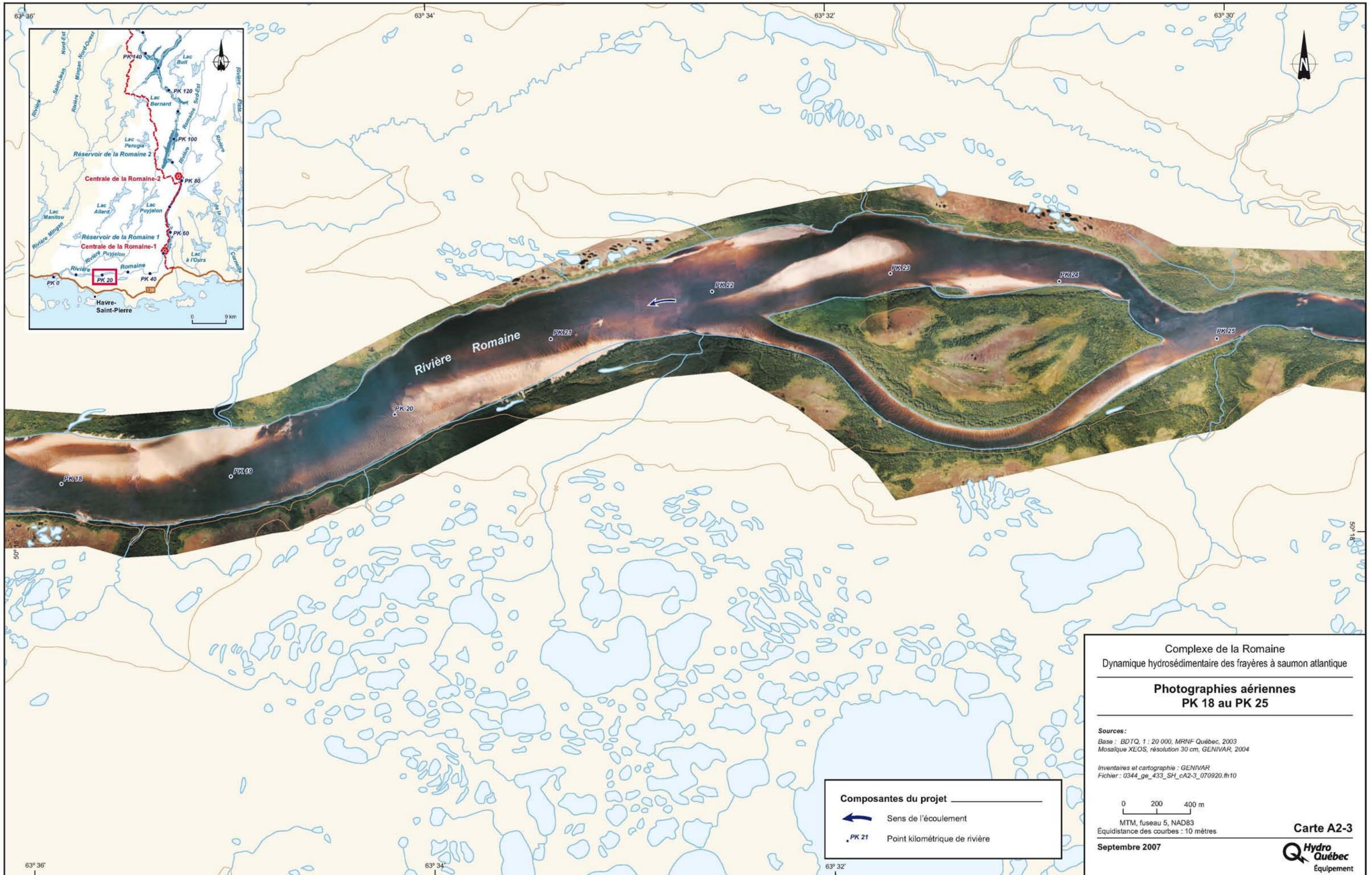
Sources:
Base : BDTO, 1 : 20 000, MRNF Québec, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004

Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_432_SH_cA2-2_070920.th10

0 200 400 m
MTM, fuseau 5, NAD83
Équidistance des courbes : 10 mètres

Carte A2-2

Septembre 2007



Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Photographies aériennes
PK 18 au PK 25

Sources:
Base : BDTQ, 1 : 20 000, MRNF Québec, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004

Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_433_SH_cA2-3_070920.fr10

0 200 400 m

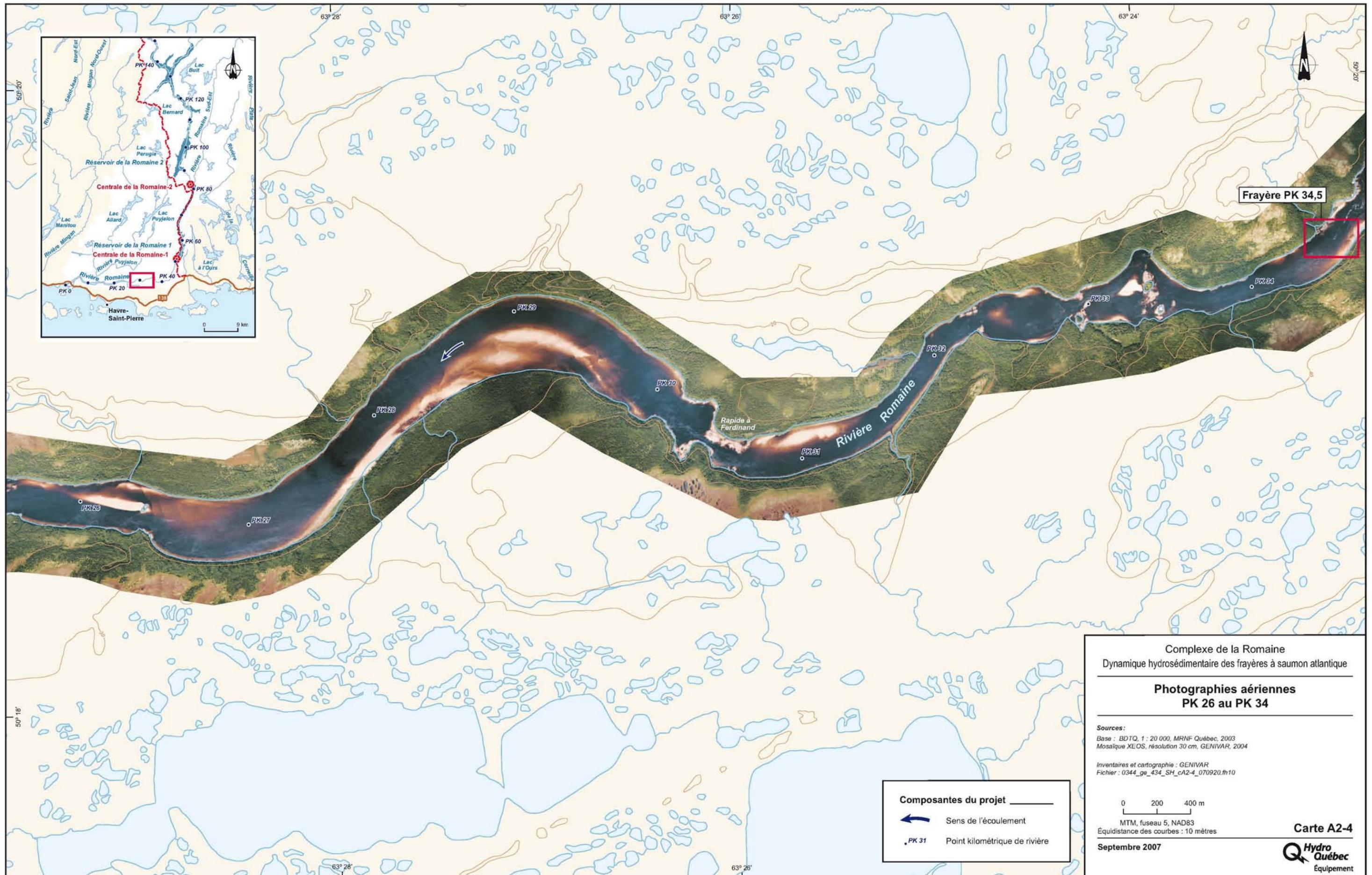
MTM, fuseau 5, NAD83
Équidistance des courbes : 10 mètres

Carte A2-3
Hydro Québec
Équipement

Septembre 2007

Composantes du projet

- Sens de l'écoulement
- PK 21 Point kilométrique de rivière



Frayère PK 34,5

Composantes du projet

-  Sens de l'écoulement
-  Point kilométrique de rivière

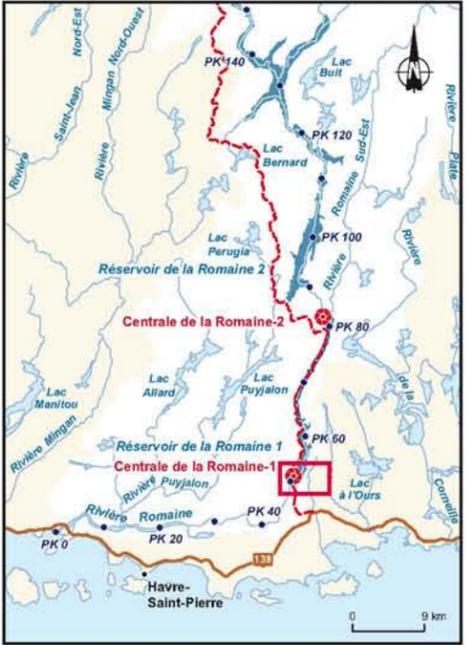
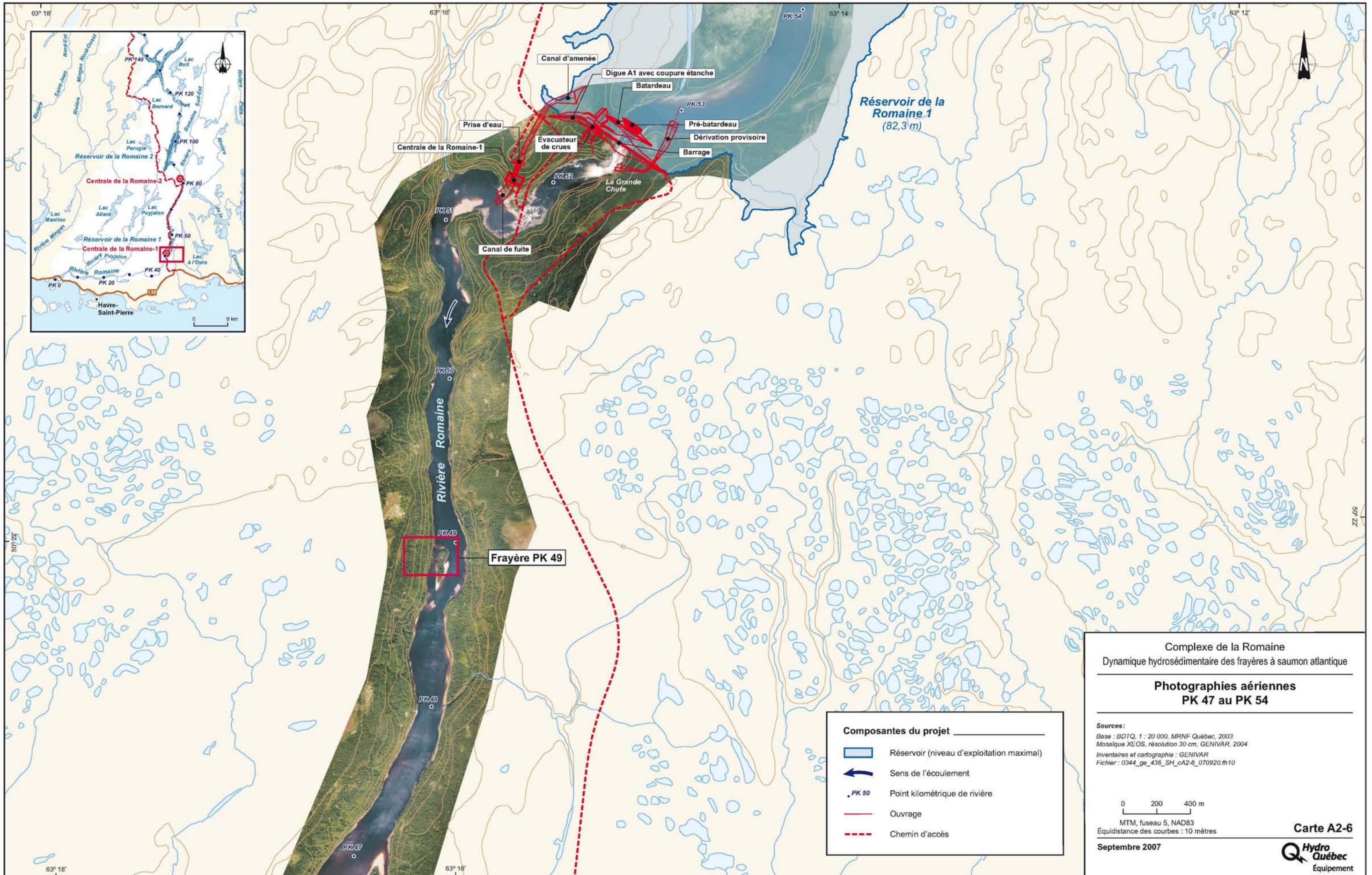
Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

**Photographies aériennes
PK 26 au PK 34**

Sources:
Base : BDTQ, 1 : 20 000, MRNF Québec, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_434_SH_cA2-4_070920.fr10

0 200 400 m
MTM, fuseau 5, NAD83
Équidistance des courbes : 10 mètres

Septembre 2007



Composantes du projet

-  Réservoir (niveau d'exploitation maximal)
-  Sens de l'écoulement
-  PK 50 Point kilométrique de rivière
-  Ouvrage
-  Chemin d'accès

Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Photographies aériennes
PK 47 au PK 54

Sources:
Base : BDTQ, 1 : 20 000, MRNF Québec, 2003
Mosaïque XEOS, résolution 30 cm, GENIVAR, 2004
Inventaires et cartographie : GENIVAR
Fichier : 0344_ge_436_SH_cA2-6_070920.fr10

0 200 400 m
MTM, fuseau 5, NAD83
Équidistance des courbes : 10 mètres

Carte A2-6

Équipement

Septembre 2007

ANNEXE 3

Description des appareils d'échantillonnage des frayères

ANNEXE 3. Description des appareils d'échantillonnage des frayères.

Le cube d'infiltration

Le cube d'infiltration, qui a été développé par Levasseur et coll. (2006), découle d'une modification du concept d'échantillonnage présenté par Lisle et Eads (1991). L'échantillonneur est constitué de deux éléments, soit une armature rectangulaire en métal (33 x 33 x 20 cm) caractérisée par un fond grillagé et sans parois (photo 1) et un sac de caoutchouc souple (profondeur de 40 cm) attaché à un cadre en métal (38 x 40 cm). Deux câbles en acier servant d'amarre sont attachés à ce cadre.

Afin d'installer le cube d'infiltration, une dépression d'environ 30 cm de profondeur et de 75 cm de largeur est d'abord creusée dans le lit de la rivière, en déplaçant vers l'aval les sédiments à l'aide d'une pelle. Le cube est ensuite installé dans la dépression et recouvert à l'aide de la pelle par la mobilisation des sédiments situés en amont de cette dépression, à la manière d'un saumon femelle qui termine son nid. Cette procédure permet à une partie des sédiments fins d'être prise en charge par l'écoulement et transportée vers l'aval, créant ainsi un nid relativement exempt de sédiments fins. Suite à l'installation, chaque cube d'infiltration est enseveli à l'intérieur d'une unité morpho-sédimentologique similaire à un nid naturel de saumon caractérisé par une dépression en amont et un monticule en aval. En termes de granulométrie du substrat, le nid artificiel est composé de particules grossières avec peu de sédiments très fins favorisant la présence d'interstices plus larges comparativement à ceux caractérisant le substrat en périphérie des nids.

Pour retirer le cube d'infiltration du substrat, il s'agit de tirer sur les deux câbles à l'aide d'un treuil installé à un trépied (photo 2). Ainsi, le cadre de métal qui est guidé par le cube entraîne le sac vers la surface. L'échantillon de substrat récolté, d'environ 60 kg, est ensuite tamisé. La portion grossière (18 mm et plus) des matériaux de l'échantillon est tamisée et pesée sur le terrain et un sous-échantillon de la classe des sédiments plus petits que 18 mm est prélevé aux fins d'analyse en laboratoire. Cette dernière, effectuée sur les sédiments qui doivent être secs, permet d'analyser avec précision la répartition de chacune des différentes classes de sédiments fins contenus dans l'échantillon original.

Les avantages de cette nouvelle méthode sont nombreux. D'abord, elle permet de récolter facilement et rapidement des échantillons du substrat, même sous couvert de glace, tout en évitant de perdre les sédiments fins. À ce jour, très peu de techniques permettent d'échantillonner le substrat en période hivernale et cette période est primordiale en ce qu'elle affecte la majorité de la période d'incubation de plusieurs espèces de poisson dont fait partie le saumon atlantique. Un autre avantage de cette nouvelle méthode, est qu'elle permet de reproduire le plus fidèlement possible la morphologie et la composition granulométrique d'un nid naturel de saumon, tout en laissant libre cours aux processus d'écoulement et de transport de sédiments intergranulaire qui se produisent dans un nid naturel tout au long de la période d'incubation.

ANNEXE 3 (suite). Description des appareils d'échantillonnage des frayères.

La trappe à sédiments

Deux modèles différents de trappes à sédiments ont été fabriqués. Le premier modèle est construit à partir d'un tuyau de conduite pluviale dont l'intérieur est lisse. Un matériau de plastique souple, mais très résistant, est fixé à la base de la trappe pour servir de fond et ce même matériel est aussi utilisé comme couvercle temporaire. Deux tailles différentes de ce type de trappe ont été conçues (photo 3). Pour l'échantillonnage de la période hivernale, lorsque le transport des sédiments est minimal, de petites trappes de 5,5 litres ont été enfouies dans le substrat des frayères étudiées, tandis que pour l'échantillonnage des crues d'automne, lorsque le transport de sédiments est plus important, de plus grosses trappes de 7,0 litres ont été utilisées.

Afin d'être en mesure d'échantillonner adéquatement le transport en charge de fond qui est à son maximum pendant la crue de printemps, des contenants de 5 gallons ont été modifiés pour fabriquer des trappes à plus grand volume d'échantillonnage, soit de 16,0 litres (photo 4). Il est à mentionner que l'ouverture du contenant modifié est de la même taille que celle des trappes décrites précédemment afin d'assurer le même type d'échantillonnage. Seul le volume entre les deux modèles de trappes est différent.

La chaîne d'érosion

La chaîne d'érosion, qui est utilisée afin de caractériser la chronologie des événements d'érosion et de sédimentation des sédiments, est une technique largement utilisée et relativement simple. Le principe consiste à insérer verticalement dans le substrat une chaîne d'environ 50 cm de longueur (maille d'environ 2,5 cm de long) en s'assurant que les derniers maillons (environ une dizaine) ne soient pas enfouis et restent à plat sur le lit. Ces derniers sont les maillons témoin qui servent de point de repère dans le but de déterminer les événements d'érosion et de sédimentation qui ont lieu entre les différentes campagnes d'échantillonnage. Ainsi, lors d'une deuxième visite au terrain, plus de maillons à plat sur le lit que le nombre au départ seront associés à un événement d'érosion, tandis que moins de maillons seront plutôt reliés à un événement de sédimentation.

Le turbidimètre

Les turbidimètres qui ont été installés sur chacune des frayères, à une distance d'environ 30 cm du lit de la rivière, sont des sondes de Global Water inc. de modèle WQ710. Leur mode de fonctionnement est le suivant :

Un faisceau de lumière infrarouge est émis dans l'écoulement par la sonde. Les particules en suspension présentes dans l'eau rétrodiffusent cette lumière qui est alors captée par un photodétecteur intégré dans la sonde. L'intensité du signal lumineux capté par le photodétecteur correspond à un courant électrique (mA) qui est directement proportionnel à la turbidité de l'eau. Une courbe de calibration de chaque appareil permet ensuite de transformer les valeurs de courant (mA) en valeurs de turbidité (UNT).

ANNEXE 3 (fin). Description des appareils d'échantillonnage des frayères.

Lors de la période d'incubation 2005-2006, chaque turbidimètre était relié à un système d'acquisition de données de type Hobo de Onset Computer Corporation afin d'enregistrer les données. Les appareils étaient programmés de façon à enregistrer deux lectures par jour, soit une vers midi et une autre vers minuit. Un panneau solaire permettait de faire fonctionner les turbidimètres et chacun d'entre eux était couplé à une batterie 12 volts qui permettait de prendre la relève advenant le bris ou l'insuffisance du panneau solaire.

Références

LEVASSEUR, M., BÉRUBÉ, F., BERGERON, N. 2006. A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds. *Earth Surface Processes and Landforms* (31): 526-530.

LISLE, T.E., EADS, R.E. 1991. Methods to measure sedimentation of spawning gravels. *US Forest Service Resources*. Note ; PSW-411, 8 pages.



PHOTO 1 Cube d'infiltration.

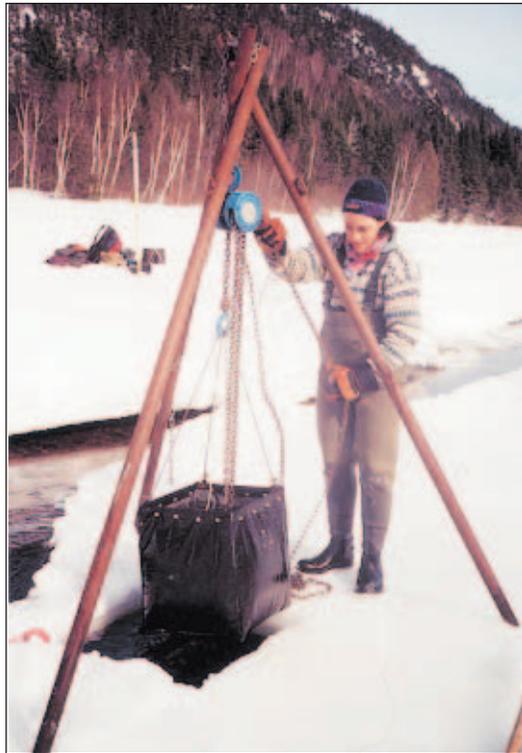


PHOTO 2 Extraction d'un cube d'infiltration en période hivernale.



PHOTO 3 Trappes à sédiments pour les périodes d'échantillonnage de l'automne et de l'hiver.



PHOTO 4 Trappes à sédiments pour la période d'échantillonnage du printemps.

ANNEXE 4

Récupération des appareils d'échantillonnage des frayères

ANNEXE 4. Récupération des appareils d'échantillonnage des frayères.

Cubes et trappes

L'ensemble des cubes et des trappes des frayères des PK 34,5 et 49 a été récupéré, soit 21 cubes et 21 trappes, tandis que pour la frayère du PK 46, 5 cubes et 7 trappes n'ont pas été retrouvés. Les zones homogènes 3, 4 et 5 de cette frayère sont les zones concernées. Les détails des appareils manquants sont présentés au tableau A4-1 pour chaque campagne d'échantillonnage.

Tableau A4-1. Cubes d'infiltration et trappes à sédiments non retrouvés lors des campagnes de récupération des échantillons de la frayère du PK 46.

	Février		Mars		Août	
	Cube	Trappe	Cube	Trappe	Cube	Trappe
Zone 3			n/d	n/d	n/d	n/d
Zone 4		n/d	n/d	n/d		
Zone 5	n/d	n/d		n/d	n/d	n/d
Zone 11						
Zone 12						

n/d L'échantillon n'est pas disponible parce qu'il n'a pas été trouvé.

Les observations notées au terrain lors des campagnes d'échantillonnage et les caractéristiques particulières de la frayère du PK 46 permettent d'expliquer cette situation. D'abord, comme mentionné à la section 2.2 du rapport, cette frayère est située sur le delta d'un tributaire dont les conditions sédimentologiques et hydrauliques sont différentes de celles prévalant sur les deux autres frayères.

La majorité des cubes et des trappes manquants lors des campagnes de mars et d'août 2006 étaient déjà introuvables lors de la campagne de février. L'hydrogramme (figure 3-6) témoigne de la mise en place du couvert de glace à la mi-décembre qui a été suivi d'un redoux, caractérisé par une crue de 354 m³/s. D'après les informations fournies dans le rapport du régime hydraulique en présence de glace (Groupe-Conseil LaSalle, 2006), il est fréquent que la glace atteigne le lit de la rivière à cet endroit, puisque les profondeurs sont très faibles. Lors du redoux, la hausse du niveau d'eau a probablement provoqué le soulèvement du couvert de glace et certains appareils ont dû être arrachés par la glace et transportés plus loin en aval. Les zones 11 et 12 n'ont pas été affectées, puisqu'elles sont localisées en bordure du delta, à proximité du talweg de la Romaine. Le couvert de glace n'atteint probablement pas le substrat à cet endroit étant donné que la profondeur est plus importante.

Une autre observation notée lors de la campagne du mois d'août 2005 permet de constater que les trappes à sédiments étaient déjà saturées suite à la crue de printemps au droit des trois frayères. De ce fait, il est nécessaire d'interpréter avec précaution le contenu de ces trappes, puisqu'il est difficile d'évaluer à quel moment elles ont cessé d'échantillonner du matériel en charge de fond. De plus, étant donné que le transport de sédiments est sélectif, que les particules plus petites sont mises en transport avant les particules grossières, que la quantité

ANNEXE 4 (fin). Récupération des appareils d'échantillonnage des frayères.

de sédiments fins est importante dans cette rivière, il est probable que les trappes aient été saturées rapidement de sédiments fins dès le début de la crue de printemps en 2006. Deux résultats supportent cette hypothèse. D'abord, les valeurs du D90 des trappes récoltées en août, à la suite de la crue de printemps, sont plus faibles que celles des trappes récoltées en février (figure 3-4), et ce, malgré le fait que le débit maximum atteint lors de la crue de printemps était beaucoup plus important que les débits atteints lors de la période automnale. D'autre part, les résultats illustrés à la figure 3-3 montrent que les trappes de la période automnale ont capté des sédiments plus grossiers que les trappes de la période printanière.

Chaînes d'érosion

En ce qui concerne les chaînes d'érosion, plusieurs d'entre elles n'ont pas été retrouvées lors des campagnes d'échantillonnage (tableau A4-2), principalement en février et en mars 2006. D'après les notes prises au terrain, les conditions d'échantillonnage plutôt difficiles lors de ces deux campagnes expliqueraient les difficultés rencontrées afin de localiser les chaînes, sous couvert de glace, à l'aide d'une caméra sous-marine. Pour cette raison, les résultats incomplets issus de la lecture des chaînes ne sont pas présentés dans ce rapport.

Tableau A4-2. Chaînes d'érosion non retrouvées lors des différentes campagnes de terrain sur les frayères étudiées.

Frayère		Campagnes			
		Septembre 05	Février 06	Mars 06	Août 06
PK 34,5	Chaîne 1		n/d	n/d	n/d
	Chaîne 2		n/d		
PK 46	Chaîne 1		n/d	n/d	
	Chaîne 2		n/d	n/d	
PK 49	Chaîne 1		n/d	n/d	n/d

n/d L'échantillon n'est pas disponible parce qu'il n'a pas été trouvé.

Turbidimètres

Enfin, quelques difficultés mineures d'échantillonnage sont survenues avec les turbidimètres. D'une part, l'appareil localisé au PK 49 a cessé de fonctionner à quelques reprises et pendant de courtes périodes de temps sur l'ensemble de la période d'échantillonnage. Le panneau solaire ne devait pas toujours suffire pour fournir l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de l'appareil, étant donné sa localisation par rapport au soleil. D'autre part, les valeurs récoltées par le turbidimètre de la frayère du PK 46 de la mi-janvier à la mi-février sont erronées puisque lors de la campagne d'échantillonnage de février, le turbidimètre n'était plus installé adéquatement. La crue de 354 m³/s lors du redoux est probablement à la source de ce problème. Enfin, le turbidimètre localisé au PK 34 a cessé d'enregistrer environ un mois avant la fin de l'échantillonnage, dû à un problème d'alimentation.

ANNEXE 5

Données brutes de l'échantillonnage au droit des frayères

Annexe 5 Données brutes de l'échantillonnage au droit des frayères.

No. séquentiel	Campagne d'échantillonnage	No. zone homogène	Frayère	Appareil d'échantillonnage	Remarques	Analyse granulométrique au terrain (kg)							Analyse granulométrique au laboratoire (g)								
						+ de 128	90 à 128	64 à 90	45 à 64	36 à 45	18 à 36	- de 18	+ de 8	4 à 8	2 à 4	1 à 2	0,5 à 1	0,25 à 0,5	0,125 à 0,25 mm	0,063 à 0,125 mm	- de 0,063mm
						mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	sept05	1	PK 49	cube		7,60	8,00	5,90	4,30	0,70	4,80	8,50	1581,1	208,5	79,4	18,7	12,7	14,1	7	2,3	2,1
2	fév06	1	PK 49	cube		0,00	4,55	7,05	2,35	0,70	10,70	30,60	2527,7	124,4	81,8	34,9	30,4	51,5	33,6	18,7	15,3
3	mars06	1	PK 49	cube		11,78	17,50	2,45	2,00	1,00	6,05	17,89	1910,8	121,8	88	49,7	51,3	138,3	110,9	45,4	29,1
4	aout06	1	PK 49	cube		0,00	4,07	14,05	4,24	2,55	9,36	40,36	2529,5	651,8	383,9	150,3	134,3	177,6	102,8	36,6	21,4
5	fév06	1	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,82	160,8	310,7	558,7	555,5	282,2	182,7	277,1	221,2	57,6
6	mars06	1	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	7,2	6,4	22,2	58,6	87,3	82,2	40,1	40,6	13,6
7	aout06	1	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,26	107,1	59,7	40,3	34,7	95,5	626,3	1297	225,9	102,8
8	sept05	2	PK 49	cube		6,80	8,20	8,70	2,70	0,90	6,90	20,75	1965	317,6	186	61,7	42,9	32,4	23,8	14,5	1,6
9	fév06	2	PK 49	cube	Erreur granulo labo	5,65	8,35	1,25	3,60	1,20	5,90	20,50	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
10	mars06	2	PK 49	cube		5,23	5,60	7,25	6,15	1,88	6,40	18,16	2224,7	182,8	83,3	63,3	54,8	76,6	80,6	55,2	34,8
11	aout06	2	PK 49	cube		0,00	8,67	6,25	1,14	1,05	8,46	42,56	3591,7	207,2	166,1	102,4	87,2	196,5	118,9	25,3	21,5
12	fév06	2	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	10,90	160,4	135,2	244,7	498,8	646,2	819,6	304,9	72,2	27,7
13	mars06	2	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,00	49,1	15	9,6	8,2	9,4	10,8	17,5	13,7	8
14	aout06	2	PK 49	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	25,66	193,9	65,4	73,2	70	120,2	540,6	1217,7	190,1	90
15	sept05	3	PK 46	cube		0,00	0,00	0,90	6,60	4,80	17,70	30,30	901,1	388,5	439,7	179,5	98,5	127,2	51,5	3,3	0,3
16	fév06	3	PK 46	cube		0,00	0,00	1,40	4,25	4,00	14,45	41,95	1580,6	732,4	711,8	226,3	123,4	149,9	61,8	5,7	1,1
17	fév06	3	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	11,48	299,4	493,5	869,1	438,5	273,3	411,5	191,3	8,3	3,5
18	mars06	3	PK 46	cube	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
19	mars06	3	PK 46	trappe	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
20	aout06	3	PK 46	cube	Hors service	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
21	aout06	3	PK 46	trappe	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
22	sept05	4	PK 46	cube		0,00	0,00	2,30	6,60	5,50	17,90	28,80	860,4	338,3	318,6	198,5	206,3	127	39,1	5,3	0,4
23	fév06	4	PK 46	cube		0,00	0,00	0,00	5,40	5,50	18,35	40,98	1167,3	663,1	670,2	218,7	124,4	111	61,4	20	5,5
24	fév06	4	PK 46	trappe	Introuvable	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
25	mars06	4	PK 46	cube	Hors service	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
26	mars06	4	PK 46	trappe	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
27	aout06	4	PK 46	cube		0,00	0,00	0,00	6,24	3,75	12,36	44,71	1429,5	829	943,8	378,6	246,8	210	151,4	36,3	11,9
28	aout06	4	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	24,36	78,5	229,2	808	661,7	334,4	311,5	117,6	13,1	5,9
29	sept05	5	PK 46	cube		0,00	0,00	0,00	2,10	2,90	25,90	30,00	1073,7	317,7	232,8	78,7	57,8	74,1	41,7	4,7	0,1
30	fév06	5	PK 46	cube	Introuvable en février	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
31	fév06	5	PK 46	trappe	Introuvable en février	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
32	mars06	5	PK 46	cube		0,00	0,00	0,00	2,65	4,48	19,25	31,64	1514,2	566,3	440,6	142,8	87,8	117,8	60,3	14,4	8
33	mars06	5	PK 46	trappe	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
34	aout06	5	PK 46	cube	Hors service	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
35	aout06	5	PK 46	trappe	Introuvable en février et en mars	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
36	sept05	6	PK 34,5	cube		0,00	0,00	9,30	16,00	8,15	12,20	12,80	670,9	209,3	194,8	202,3	398	304,6	84,1	6,5	0,2
37	fév06	6	PK 34,5	cube		0,00	1,80	3,60	15,00	6,05	19,25	27,78	748,8	153	125,7	161,1	733,8	875,3	272,5	22	6,2
38	fév06	6	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,71	0,28	0,02	7,06	30,2	10,9	15	81,6	291,3	1466,4	196,8	23,5	13,5
39	mars06	6	PK 34,5	cube		0,00	0,00	3,40	15,15	6,13	14,40	23,41	989	206,5	147,4	177,9	529,8	460,5	142,6	10,3	9,1
40	mars06	6	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0	0	0,7	2,4	31,6	39,6	6,7	0,6	0,2
41	sept05	7	PK 34,5	cube		0,00	0,00	17,50	9,30	6,00	9,70	21,40	664	121,2	102,4	149,2	438,7	375,8	95,8	7,7	0,3
42	fév06	7	PK 34,5	cube		0,00	0,95	3,60	14,90	6,95	14,00	21,20	1058,2	252	192,5	155,8	299,9	437,8	183	12	6,3
43	fév06	7	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,17	0	0	3,4	45,2	591,5	1986,3	179,9	16,9	9,2
44	mars06	7	PK 34,5	cube		0,00	1,15	4,60	13,85	10,83	17,70	26,85	894,5	157	91,3	89,2	308,7	834,8	286,6	20,8	16,2
45	mars06	7	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1,42	176	67,4	47,9	298,7	272,5	280,3	67,7	2,8	3,9
46	aout06	7	PK 34,5	cube		0,00	5,57	14,45	12,04	4,75	8,36	23,36	1011,8	244,3	214,3	222,8	592,7	892,7	336,7	32,5	20,7
47	aout06	7	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,26	1,1	3,6	6,6	97,8	753,9	1158,6	112,4	26,1	26,9
48			PK 34,5	chaîne																	
49			PK 46	chaîne																	
50			PK 46	chaîne																	
51	aout06	6	PK 34,5	cube		0,00	5,17	16,35	14,19	4,45	7,26	20,26	740,5	168,5	173	181,3	461,6	987,5	342,3	28,9	18,9
52	aout06	6	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,54	0,35	1,86	30,16	199,6	55,5	68,7	317,3	977,1	1304,8	125,2	70,9	63,5
53			PK 49	chaîne																	
54	aout06	8	PK 34,5	cube		0,00	0,00	13,95	12,74	4,05	11,66	21,96	1052,4	405,9	304,4	290,6	698,3	954,7	341,9	31,4	23
55	aout06	8	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,36	2,1	3,2	20,8	179,2	939,3	1029,6	322,7	209,6	90,9
56	sept05	8	PK 34,5	cube		0,00	1,80	11,60	14,80	4,80	8,90	9,00	1107,6	255,9	211	200,2	308,3	225,7	63,7	5,2	0,1
57	mars06	8	PK 34,5	cube		0,00	0,00	10,20	14,05	5,98	13,80	21,02	1118,2	259,9	224,6	183	371,8	458,8	195,9	10,8	10,8
58	mars06	8	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	7,6	0,8	1	40,7	162,5	94,1	10,4	0,7	1,6
59	fév06	8	PK 34,5	cube		0,00	0,00	5,25	7,20	6,35	18,55	25,15	1519,5	364,3	306,6	254,9	475	532,6	151,8	10,8	4,6
60	fév06	8	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,01	8,11	0	2,6	3,1	16,1	242	1806,3	190,8	23,2	15,4
61	sept05	2	PK 49	cubeSupp		0,00	3,20	8,70	1,70	1,90	9,80	32,30	1036,6	305,3	333,9	232,7	232,5	171,2	58,9	5,5	1,1
62	sept05	1	PK 49	cubeSupp		0,00	4,00	11,50	4,10	1,30	7,00	28,60	1071,7	432,8	420,4	172	117	88,8	19,3	2,1	0,9
63	sept05	9	PK 34,5	cube		0,00	0,00	0,90	17,50	8,80	21,60	16,70	1078,8	238,1	140,7	63,7	251,1	270,1	57,4	7	0,2

Annexe 5 Données brutes de l'échantillonnage au droit des frayères.

No. séquentiel	Campagne d'échantillonnage	No. zone homogène	Frayère	Appareil d'échantillonnage	Remarques	Analyse granulométrique au terrain (kg)							Analyse granulométrique au laboratoire (g)								
						+ de 128	90 à 128	64 à 90	45 à 64	36 à 45	18 à 36	- de 18	+ de 8	4 à 8	2 à 4	1 à 2	0,5 à 1	0,25 à 0,5	0,125 à 0,063	0,063 à 0,025	- de 0,025
						mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
64	fév06	9	PK 34,5	cube		0,00	0,00	6,35	10,00	5,45	17,15	26,60	1180,5	302,5	219,1	121,6	381,5	444,6	103,9	9,1	3,2
65	fév06	9	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,83	5,6	0,9	7	69,5	662,5	1281,7	158,7	21,4	10,2
66	mars06	9	PK 34,5	cube		0,00	0,00	2,90	16,25	7,73	15,65	17,92	977,5	196,7	107,8	56,1	340,2	598,5	118,4	9,9	12
67	mars06	9	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0	0	0	0	0,4	3,8	1,5	0,2	0,1
68	aout06	9	PK 34,5	cube		0,00	1,27	13,15	7,34	9,55	7,46	24,86	1397,7	361,2	243,7	155,6	536,3	817,5	159,4	14,2	14,3
69	aout06	9	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	27,86	48,8	16,7	25,6	180,8	945,3	1685	67,8	30,9	46,2
70	sept05	10	PK 34,5	cube		0,00	0,00	1,00	6,20	5,50	18,60	24,30	942,1	350,9	273,7	128,2	225,3	219,4	68,3	3,8	0,1
71	fév06	10	PK 34,5	cube		0,00	0,00	0,75	6,05	6,30	22,03	31,70	1440,8	603,5	544,9	226	284,2	295,5	73	5,6	4
72	fév06	10	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,02	6	4	19,2	78	784,8	1332,9	212,5	17,8	17,8
73	mars06	10	PK 34,5	cube		0,00	0,00	0,54	11,20	0,76	18,00	34,09	794,6	206,7	132,8	106	489,8	667,8	164,8	10,1	7,6
74	mars06	10	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0	1,4	1,1	42,5	193,9	103,6	11,3	1,8	2,1
75	aout06	10	PK 34,5	cube		0,00	0,00	2,05	13,45	6,75	22,11	29,66	2448,5	616,4	451,3	251,8	857,5	1127,6	245,5	25,4	15
76	aout06	10	PK 34,5	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,96	65,1	46,9	39,1	156,4	939,9	1731,7	98,8	54,9	39,4
77			PK 34,5	chaîne																	
78	fév06	11	PK 46	cube		0,00	0,00	1,20	9,20	6,75	19,90	20,25	1251,4	332,4	361,8	193,5	282,3	473,4	107,4	10,6	10,1
79	fév06	11	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	8,56	202,2	63,8	140,3	424,5	737,8	579	45,1	9,7	3,1
80	mars06	11	PK 46	cube		0,00	0,00	0,00	5,50	5,88	23,68	33,10	1338,1	391,1	332,7	177	178,1	213,2	77,4	18	7,7
81	mars06	11	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0	0	0,4	19,2	72,8	116,7	135	38,8	10,7
82	sept05	11	PK 46	cube		0,00	0,00	1,20	13,60	7,70	24,20	18,80	1270,5	410	398,2	161,3	101,6	83	27,2	3,7	0,3
83	aout06	11	PK 46	cube		0,00	0,00	1,15	12,24	10,15	23,16	28,76	1371,9	343,6	356,4	237,7	475,2	1106,5	231,5	29,8	12,6
84	aout06	11	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,26	9,6	29	255,7	358,6	256,8	579,3	1226,3	142,2	67,1
85	sept05	12	PK 46	cube		0,00	0,00	1,60	8,50	7,10	19,00	21,80	1113,8	408,7	408,4	175,9	119,5	97,2	47,5	2,6	0,1
86	fév06	12	PK 46	cube		0,00	0,00	1,45	9,50	7,20	23,10	38,72	1460	527,5	496	185,1	175,6	297,7	150,9	39	7,4
87	fév06	12	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	9,20	56,6	88	311,5	396	1186,6	627,7	37,6	11,5	2,9
88	mars06	12	PK 46	cube		0,00	0,00	0,75	8,46	5,48	17,10	48,18	1372,1	473,6	418,7	191,9	181,4	204,4	99,7	17,5	10,5
89	mars06	12	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	6,2	4	7	5,2	8,4	18,1	21,3	5,5	2
90	aout06	12	PK 46	cube		0,00	0,00	0,55	7,54	6,05	20,36	50,36	1538,5	566,1	622,4	305,3	223,5	182,4	94,2	20	7,2
91	aout06	12	PK 46	trappe		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	32,56	92,4	208,8	575,6	686,7	736,5	569,7	192,4	59	30,7

ANNEXE 6

Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire
entre les PK 0,7 et 51,75

1.0 **Modèle GSTARS**

Les simulations de la dynamique sédimentaire du cours aval de la Romaine ont été réalisées à l'aide du modèle unidimensionnel GSTARS, version 3.0, développé par le U.S. Bureau of Reclamation (USBR).

Ce modèle a été conçu pour résoudre les problèmes complexes de transport solide dans les rivières pour lesquelles les données sont limitées. Une présentation sommaire du modèle GSTARS est incluse à l'annexe 7.

2.0 **Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire**

Le domaine modélisé du cours aval de la rivière Romaine s'étend du rapide à Brillant (PK 0,7), près de son embouchure avec le golfe du Saint-Laurent, jusqu'au PK 51,75, soit 250 m en amont de la sortie du canal de fuite de la centrale de la Romaine-1 (PK 51,5). Le domaine est présenté à l'annexe 2 sous forme de photographies aériennes à haute résolution.

La carte A6-1 illustre la localisation des sections bathymétriques utilisées pour mettre en œuvre le modèle hydrosédimentaire. Au total, 142 sections dont 113 sections relevées au terrain et 29 sections fictives (importées de HEC-RAS) ont été considérées afin d'obtenir un meilleur étalonnage du modèle. La densité des sections est plus élevée dans la zone des frayères à saumon. L'annexe 6a fournit plus de précision sur l'origine des sections relevées et fictives.

Sur les 142 sections utilisées, 85 sections originales proviennent du modèle HEC-RAS (GENIVAR, 2004b) pour les tronçons en aval du PK 48,7. En amont de ce PK et jusqu'au PK 51,75, les 58 sections révisées proviennent du modèle HEC-RAS d'Hydro-Québec (2005b).

2.1 Informations disponibles

2.1.1 Hydrologie

L'hydrologie de la rivière Romaine est caractéristique des rivières de la Côte-Nord. Son hydrogramme moyen annuel (figure 4-1 de la section 4.2.2) permet d'en faire ressortir les points saillants comme suit. La crue printanière débute à la dernière semaine d'avril et les débits augmentent progressivement jusqu'à la première semaine de juin. Ces débits de crue sont élevés et proviennent en grande partie du tronçon situé entre les PK 52,5 et PK 200. À cet endroit, le relief du bassin versant est montagneux et favorise les fortes crues. À titre indicatif, le rapport entre les débits moyens de juin et de mars est de 11,6.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

La décrue se produit en juin et le débit diminue progressivement durant tout l'été. L'étiage estival est observé habituellement durant les deux premières semaines de septembre. La crue automnale commence en moyenne vers le début du mois d'octobre et peut atteindre exceptionnellement des valeurs de débit parfois aussi fortes que la crue printanière (2 180 m³/s le 28 octobre 1959). Le débit diminue ensuite progressivement tout au cours de l'hiver. L'étiage hivernal survient en mars et est plus sévère que l'étiage estival.

Conditions actuelles

Les conditions actuelles sont simulées en se basant sur une série hydrologique de débits journaliers totalisant 44 années, mesurés de 1956 à 2001 au PK 16 de la rivière Romaine (données de la station n°073801 qui proviennent de la base de données HYDAT, Environnement Canada, 2004). L'hydrogramme moyen annuel de la série hydrologique en conditions actuelles est présenté à la figure 4-1 de la section 4.2.2.

Conditions futures

Pour les simulations en conditions futures, une série hydrologique basée sur les scénarios de gestion de la centrale Romaine-1 est utilisée (Hydro-Québec, 2006). En tenant compte des règles de gestion projetées pour le complexe de la Romaine, Hydro-Québec a bâti (base hebdomadaire) une série hydrologique en phase d'exploitation en se basant sur les débits de 1957 à 2003 (Hydro-Québec, 2006), soit une période de 46 ans. L'hydrogramme moyen annuel de la série hydrologique en conditions futures est présenté à la figure 4-1 de la section 4.2.2.

Notons que ces simulations tiennent compte des déversements prévus à l'évacuateur de crue de la centrale de la Romaine-1.

2.1.2 Matière en suspension et charge de fond

Quelques études ont déjà été réalisées sur le transport solide de la rivière Romaine. Long et coll. (1982) ont étudié le matériel particulaire en suspension et le matériel dissous des rivières Romaine et Saint-Jean, tandis que Laroche (1983) s'est intéressé à la dynamique hydraulique et sédimentaire de la zone de l'embouchure de la Romaine.

Dans le contexte de l'étude d'impact du complexe de la Romaine, des campagnes d'échantillonnage de la matière en suspension et de la charge de fond ont été réalisées en 2003 (Environnement Illimité, 2004) et en 2004 (Environnement Illimité, 2005). Les aspects géomorphologiques de la rivière Romaine ont aussi été étudiés (POLY-GÉO, 2006).

Les informations concernant la matière en suspension (MES) et la charge de fond (CF) utilisées dans la présente étude proviennent des deux campagnes de relevés effectuées en 2003 et 2004 (Environnement Illimité, 2005).

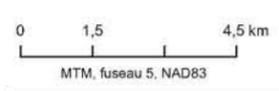


- Sections**
- ROM-4 Section relevée par Hydro-Québec (2001)
 - R01 Section relevée par Hydro-Québec (2005)
 - GEN 34 Section relevée par GENIVAR (2004)
 - Section fictive
 - Section interpolée à partir du logiciel Hec-Ras
 - Section interpolée à partir du modèle numérique de terrain d'Hydro-Québec
- Stations**
- Station hydrométrique
 - Station d'échantillonnage par Environnement Illimité
- Infrastructures**
- ✈ Aéroport
 - Voie ferrée
 - Route principale
 - Route secondaire
 - ▲ Poste et ligne de transport
- Composantes du projet**
- Réservoir (niveau d'exploitation maximal)
 - ← Sens d'écoulement
 - PK 55 Point kilométrique de rivière
 - Centrale hydroélectrique
 - Route de la Romaine
 - km 10,0 Borne kilométrique de route

Complexe de la Romaine
Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique

Plan de localisation des sections du modèle hydrosédimentaire

Sources :
 Base : BDTA, 1 : 250 000, 2002
 SDA, 1 : 20 000, 2004
 MRNF Québec
 Inventaires et cartographie : GENIVAR
 Fichier : 0344_ge_443_SH_cA6-1_070918.th10



Septembre 2007

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

En 2003, deux stations de mesures, situées aux PK 3,8 et 53,5, ont été échantillonnées durant la crue de printemps. En 2004, la station aval du PK 3,8 et une nouvelle station amont située au PK 162 ont été suivies durant une partie de la crue printanière. L'échantillonnage de la MES a été fait avec un échantillonneur (type DH 76) de volume intégrateur de la colonne d'eau en trois verticales à chaque station. La charge de fond a été échantillonnée avec un échantillonneur de type Helley-Smith. Pour chaque station, une dizaine de verticales, à largeur égale, ont été explorées en prélevant quatre échantillons du fond pour une même verticale. La durée d'échantillonnage pouvait varier d'une verticale à l'autre, mais une durée équivalente a été utilisée pour les quatre échantillons.

Les échantillons ont été traités pour déterminer les concentrations totales de MES et de CF (tableaux A6-1 et A6-2). Ces analyses (filtration, séchage et pesée) ne comportent cependant pas les proportions par classe de granulométrie. Les tableaux A6-3 et A6-4 fournissent une synthèse des campagnes 2003 et 2004.

Tableau A6-1. Résultats de la campagne de mesures quotidiennes de la matière en suspension et de la charge de fond menée en 2003.

Date	PK 3,8		PK 53,5	
	Matière en suspension (mg/l)	Charge de fond (t/j)	Matière en suspension (mg/l)	Charge de fond (t/j)
17 mai 2003	25	-	-	-
18 mai 2003	18	363	-	-
19 mai 2003	20	-	-	-
20 mai 2003	- ^a	-	12	129
21 mai 2003	-	-	15	54
22 mai 2003	18	261	-	-
23 mai 2003	14	758	9	305
24 mai 2003	-	-	8	339
25 mai 2003	8	312	5	184
26 mai 2003	-	-	5	273
27 mai 2003	6	439	4	87
28 mai 2003	6	163	5	92
29 mai 2003	4	148	-	-
30 mai 2003	4	181	4	260
31 mai 2003	5	82	4	60
1 ^{er} juin 2003	5	58	3	139
3 juin 2003	10	355	4	100
4 juin 2003	-	-	3	63
8 juin 2003	4	3	-	-
9 juin 2003	-	-	3	27

a Les tirets indiquent une absence de données recueillies.

Source : Environnement Illimité (2005).

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Tableau A6-2. Résultats de la campagne de mesures quotidiennes de la matière en suspension et de la charge de fond menée en 2004.

Date	PK 3,8	
	Matière en suspension (mg/l)	Charge de fond (t/j)
23 avril 2004	2	-
26 avril 2004	3	-
3 mai 2004	5	-
4 mai 2004	7	-
6 mai 2004	29	-
7 mai 2004	23	-
8 mai 2004	21	-
9 mai 2004	17	66
10 mai 2004	10	7
11 mai 2004	10	25
12 mai 2004	15	31
13 mai 2004	9	54
14 mai 2004	8	56
15 mai 2004	6	43
16 mai 2004	6	41
17 mai 2004	7	70
18 mai 2004	10	-
19 mai 2004	19	39
20 mai 2004	17	38
21 mai 2004	19	47
25 mai 2004	6	76
27 mai 2004	5	59
29 mai 2004	4	55
31 mai 2004	- ^a	174
2 juin 2004	4	223
4 juin 2004	-	263
7 juin 2004	5	186
10 juin 2004	4	12
13 juin 2004	4	290
20 juin 2004	3	429

a Les tirets indiquent une absence de données recueillies.

Source : Environnement Illimité (2005).

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Tableau A6-3. Synthèse des concentrations de la matière en suspension en 2003 et 2004.

PK	Année 2003			Année 2004		
	Moyenne (mg/l)	Minimum (mg/l)	Maximum (mg/l)	Moyenne (mg/l)	Minimum (mg/l)	Maximum (mg/l)
3,8	10,5	3,7	25,0	10,2	1,7	32,2
53,5	5,9	2,7	14,7	-	-	-
162,0	- ^a	-	-	4,5	0,0	12,0

a Les tirets indiquent qu'il n'y a pas eu de collecte de données.

Source : Environnement Illimité (2005).

Tableau A6-4. Synthèse des taux de transport solide par charge de fond en 2003 et 2004.

PK	Année 2003			Année 2004		
	Moyenne (t/j)	Minimum (t/j)	Maximum (t/j)	Moyenne (t/j)	Minimum (t/j)	Maximum (t/j)
3,8	232,0	3,0	615,0	106,0	7,4	457,0
53,5	122,0	27,0	339,0	-	-	-
162,0	- ^a	-	-	133,0	38,0	346,0

a Les tirets indiquent qu'il n'y a pas eu de collecte de données.

Source : Environnement Illimité (2005).

La charge sédimentaire des stations amont et aval pour l'année 2003 et 2004 a été établie (tableau A6-5). Pour ce faire, les absences de données durant la campagne de mesures ont été comblées par interpolation linéaire. Pour les périodes estivales et automnales, les valeurs de MES ont été estimées à 2,0 mg/l aux stations amont et aval, alors que pour la période hivernale, une concentration de 1,5 mg/l a été supposée. D'autres corrections ont été apportées aux mesures pour pallier aux problèmes d'échantillonnage (Environnement Illimité, 2005).

Tableau A6-5. Charge sédimentaire de la rivière Romaine en 2003 et 2004.

Année	Station amont			Station aval (PK 3,8)		
	Matière en suspension (t)	Charge de fond (t)	Total (t)	Matière en suspension (t)	Charge de fond (t)	Total (t)
2003	29 825 ^a	3 159 ^a	32 984 ^a	62 066	7 889	69 955
2004	26 745 ^b	5 740 ^à 7 512 ^b	32 485 ^à 34 257 ^b	42 839	8 196 à 11 834	51 035 à 54 673

a Données de la station au PK 53,5

b Données de la station au PK 162,0

Source : Environnement Illimité (2005).

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Environnement Illimité (2005) a estimé le rapport entre la charge de fond et la matière en suspension. En 2003, ce rapport était de 13 % à la station aval (PK 3,8) et de 11 % à la station amont (PK 53,5). En 2004, il a été évalué à 19 % et à 21 % respectivement pour la station aval (PK 3,8) et la station amont (PK 162,0). Pour ces deux années de mesures, les données indiquent que la charge de fond a représenté au maximum 21 % de la charge transportée en suspension.

2.1.3 Substrat

Au cours d'études antérieures portant sur l'habitat du saumon, GENIVAR (2002) a caractérisé le substrat des habitats du saumon en aval de la centrale de la Romaine-1. Au total, 188 stations ont été échantillonnées. La composition des matériaux du lit a été déterminée visuellement à l'intérieur des limites de l'aire de pêche ou de plongée. Les observations consistaient à évaluer la proportion des différentes classes granulométriques définies au tableau A6-6. La composition a été déterminée à partir du pourcentage de recouvrement de chaque classe de matériaux dans la station. Au nombre de six, les sites potentiels de fraie situés entre les PK 34,5 et 51,5 ont eux aussi été caractérisés en suivant la même procédure.

Tableau A6-6. Classes granulométriques de la description visuelle du substrat dans les parcelles d'échantillonnage.

Granulat	Abréviation	Diamètre (mm)
Roc	R	Roche-mère
Gros blocs	Bx	Plus de 1 000
Blocs	B	250 à 1 000
Galets	G	64 à 250
Cailloux	C	32 à 64
Gravier	V	4 à 32
Sable	S	0,125 à 4
Limon	L	Moins de 0,125

Source : Extrait de (GENIVAR, 2002)

En fonction des méthodes employées, cette caractérisation s'est traduite par le découpage de la rivière en tronçons ou segments dont la granulométrie du substrat et le faciès d'écoulement sont homogènes (GENIVAR, 2002).

De cette étude, il découle que le lit de la rivière Romaine est constitué principalement de sables. Les graviers constituent la classe qui domine après celle des sables. La présence de cailloux a été signalée à plusieurs endroits, notamment au niveau des aires de fraie.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

POLY-GÉO (2006) a de son côté caractérisé la plaine côtière (PK 0 à PK 52,5) en analysant la géomorphologie des rives et des terrains adjacents le long du tronçon étudié de la rivière Romaine qui s'est entaillée à travers des dépôts marins silto-argileux épais. Ces dépôts constituent près des trois quarts des matériaux encaissants. Près de la moitié des rives est constituée de sable, le reste étant composé à peu près en parts égales de sédiments fins et de roc. L'érosion affecte tout près de 17 % des rives et se manifeste par éboulements et glissements de terrain. Elle touche principalement les talus composés de sédiments argileux recouverts de sable et de tourbe.

Six zones composant la plaine côtière ont également été identifiées par POLY-GÉO (2006). Chacune des zones présente des caractéristiques relativement uniformes en ce qui concerne le profil longitudinal de la rivière et les différentes composantes géomorphologiques des talus et des berges (tableau A6-7).

Tableau A6-7. Zones situées dans la plaine côtière de la rivière Romaine.

Zone	PK	Matériaux composant les berges (%)				
		Roc	Cailloux et/ou blocs	Gravier ^a	Sable	Sédiments fins ^b
1	0,00 à 2,25	82			18	
2	2,25 à 16,00	14			57	29
3	16,00 à 30,00	12		3	46	39
4	30,00 à 35,00	36		1	31	32
5	35,00 à 47,00	27		9	49	15
6	47,00 à 52,50	49	12		39	

a Il s'agit d'un mélange de sable et de gravier.

b Sédiments fins constitués d'argiles et de silts.

Source : POLY-GÉO (2006).

Les matériaux de surface le long de la rivière sont constitués essentiellement de tourbe mince (moins de 2 m de profondeur) ou épaisse (2 à 6 m de profondeur) en rive gauche, de sable le long des pieds des talus, de sable et de gravier autour du PK 40, de roc au niveau des rapides et des chutes et de sédiments fins entre le PK 16 et le PK 35 (zones 3 et 4). Il y a absence de till et de concentration de blocs ou de cailloux dans ce tronçon.

La quantité de sédiments fins provenant de l'érosion des rives de la rivière Romaine ainsi que de ses principaux tributaires entre les PK 0 et PK 290 totalise 16 490 t/a (tableau A6-8). La majorité des sédiments provient de la plaine côtière (entre le PK 2,25 et le PK 30) et du piedmont (entre le PK 75,0 et le PK 90,5).

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Le bilan sédimentaire du cours aval de la Romaine, incluant la matière en suspension et la charge de fond, est résumé au tableau A6-9.

Tableau A6-8. Contribution des rives et des tributaires en érosion (silt et argile) de la rivière Romaine entre le PK 290 et le PK 0.

Tronçon (km)	Rivière Romaine		Tributaires		Total	
	(t/a)	(%)	(t/a)	(%)	(t/a)	(%)
290 – 162,5	1 100	7	800	5	1 900	12
162,5 – 53,5	2 600	16	50	0	2 650	16
53,5 – 0	11 900	72	40	0	11 940	72
Total	15 600		890		16 490	100

Source : POLY-GÉO (2006).

Tableau A6-9. Répartition de la charge sédimentaire annuelle de la rivière Romaine entre le PK 53,5 et le PK 3,8.

Point d'intérêt	Matière en suspension - Charge silto-argileuse (t)	Charge de fond – sable (t)	Total (t)
PK 53,5	4 550	3 200	7 750
Apports érosion des tributaires	40	5	45
Érosion des rives	11 900	5 900	17 800
Station aval : PK 3,8	> 16 500	8 000 à 12 000	24 500 à 28 500

Source : POLY-GÉO (2006).

En considérant les conclusions tirées de POLY-GÉO (2006) et connaissant la géométrie de la rivière en amont de la centrale de la Romaine-1, il est fort probable que la majorité de la matière transitant par le PK 53,5 soit constituée de sédiments très fins à moyens, soit de sable, de silt et d'argile. Le reste de la matière semble être piégé dans les fosses et les bassins.

2.2 Caractérisation du lit de la rivière Romaine

La caractérisation granulométrique du lit de la rivière Romaine a été faite en se basant sur les études de GENIVAR (2002) et de POLY-GÉO (2006).

En analysant les segments (GENIVAR, 2002) et les zones (POLY-GÉO, 2006) définis dans les deux études, une synthèse a été réalisée pour résumer et définir de nouveaux segments pour le modèle GSTARS. La composition granulométrique retenue pour la configuration du modèle est présentée au tableau A6-10. À noter que les 142 sections du modèle ne sont pas toutes présentées dans ce tableau. Celles qui manquent sont interpolées linéairement par GSTARS entre chaque PK.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Tableau A6-10. Caractéristiques du lit de la rivière Romaine utilisées dans le modèle GSTARS.

PK	Lieu	Pourcentage des classes granulométriques (%)					Blocs	Zone non érodable
		Sable fin (Argile et silt)	Sable	Gravier	Cailloux	Galets		
0,70	Rapide à Brillant	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
2,50		n/d	65	35	-	-	-	non
14,10		n/d	80	20	-	-	-	non
14,30		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
16,40	Chute de l'Église	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
18,00		n/d	70	15	15	-	-	non
30,00		n/d	70	15	15	-	-	non
30,20		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
30,75		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
32,00		n/d	70	15	15	-	-	non
33,00		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
34,20	Frayère du PK 34,5 ^a	n/d	19	33	26	22	-	non
34,80	Chute à Charlie	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
37,00		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
37,20		n/d	83	10	7	-	-	non
40,10		n/d	41	25	34	-	-	non
44,20		n/d	41	25	34	-	-	non
44,58		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
44,68		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
44,80		n/d	-	30	40	30	-	non
45,10		n/d	-	30	40	30	-	non
46,10	Frayère du PK 46 ^a	n/d	17	62	20	1	-	non
48,50	Frayère du PK 49 ^a	n/d	5	40	10	30	15	non
50,55		n/d	55	35	5	5	-	non
50,75		n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui
51,75	Centrale RO-1	n/d	-	-	-	-	100 ^b	oui

a Données provenant des campagnes (cubes d'infiltration) de terrain de la présente étude.

b Roc imposé.

n/d : Non déterminé.

Sources : GENIVAR (2002) et POLY-GÉO (2006)

Cette composition granulométrique provient d'une estimation visuelle qui n'équivaut pas à la méthode standard d'analyse granulométrique. Celle-ci consiste habituellement à récolter un échantillon du substrat et à déterminer sa composition granulométrique à la suite d'un tamisage en laboratoire.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

La matière silto-argileuse ($\varphi \leq 0,125$ mm), bien que présente, n'a pas été prise en considération pour l'aspect modélisation. Le manque de données d'analyses granulométriques et la méconnaissance des propriétés mécaniques et géotechniques des argiles et des silts de la rivière Romaine ne permettent pas d'en tenir compte lors des simulations.

Les résultats des campagnes de mesures menées en 2003 et en 2004 ne permettent pas de déduire la fraction silto-argileuse constituant la matière en suspension échantillonnée. Le phénomène d'érosion des argiles et des silts constituant les rives en aval de la chute de l'Église a bien été identifié par POLY-GÉO (2006) qui a estimé son taux d'érosion annuel à environ 12 000 tonnes.

Comme l'élévation de la roche-mère, ou autrement dit l'épaisseur du substrat, n'est pas connue, des limitations sur l'érosion du lit de la rivière ont été imposées uniquement au voisinage des chutes et des rapides où le substrat est constitué de roc ou de matériaux grossiers. À ces endroits, ces contraintes ont pour effet d'empêcher toute érosion de la rivière.

La masse volumique des sédiments utilisée est $2\,650 \text{ kg/m}^3$ (quartz). La porosité est de l'ordre de 40 %, ce qui donne une masse volumique sèche de $1\,590 \text{ kg/m}^3$.

2.3 Imposition des conditions de niveaux et de débits aux frontières

La condition frontière en aval de la rivière, que ce soit en conditions actuelles ou futures, est une relation niveau/débit imposée à la section du PK 0,7. La relation utilisée dans le modèle est représentée par l'équation 1 (GENIVAR, 2004b) suivante :

$$\text{Niveau} = 0,6598 \text{ Débit}^{0,3116} \quad (\text{équation 1})$$

Conditions actuelles

Les débits imposés pour les conditions frontières en amont sont ceux provenant de la station n° 073801 du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, 2006). Ces débits journaliers sont imposés à l'extrémité amont du modèle (section du PK 51,75).

Conditions futures

Les débits imposés pour les conditions frontières en amont sont ceux provenant d'Hydro-Québec. Les données simulées sont une moyenne hebdomadaire et ont été transposées sur une base journalière pour les besoins de la présente étude. Ces données sont aussi imposées à la section du PK 51,75.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

2.4 Imposition des conditions de transport solide à la frontière amont

Conditions actuelles

Une relation entre le débit liquide et le débit solide doit être imposée à la condition frontière amont.

Sur le plan quantitatif, l'analyse des résultats de la campagne de mesures réalisée en 2003 (Environnement Illimité, 2004) a permis d'élaborer une relation entre le débit liquide de la rivière et le débit solide total qu'elle transporte. Celui-ci est composé de la charge de fond (CF) et de la matière en suspension (MES) sans distinction entre les deux.

La relation entre le débit liquide Q_L et le débit solide Q_s a été définie dans GSTARS par un modèle de type puissance tel que :

$$Q_s = 0,000006 Q_L^{2,6} \quad (\text{équation 2})$$

Les paramètres 0,000006 et 2,6 de l'équation 2 ont été déterminés à partir de la concentration des sédiments mesurée à la station du PK 53,5 (tableau A6-1). Chaque mesure de quantité de sédiments est associée au débit moyen journalier (débit liquide) de la station n° 073801. Après la mise en relation du débit solide avec le débit liquide (figure A6-1), une courbe de tendance de type puissance a été ajustée.

La figure A6-2 compare le débit solide reconstitué à partir de l'équation 2 au débit solide mesuré. À noter que les débits solides reconstitués représentent bien les valeurs des débits solides mesurés.

Bien que la station de mesures du transport solide, échantillonnée en 2003, soit située en amont de la frontière amont du domaine étudié, les informations obtenues à ce site ont été intégralement transposées à la section du PK 51,75 du modèle.

Conditions futures

Pour établir le bilan sédimentaire à long terme en conditions futures, la charge sédimentaire provenant de l'amont de la centrale de la Romaine-1 a été fixée comme nulle étant donné la présence des réservoirs de la Romaine-1 et de la Romaine-2, qui favoriseront la sédimentation des sables transportés par la rivière.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

2.5 Régime thermique des eaux

Les équations de transport des sédiments sont dépendantes de plusieurs variables, dont la masse volumique et la viscosité cinématique de l'eau, deux paramètres qui varient en fonction de la température de l'eau. Cette dernière doit donc être prise en compte dans la modélisation.

Conditions actuelles

Les données de température ont été reconstituées à partir de mesures au PK 50 (figure A6-3). Ces données ont été fournies par Hydro-Québec (2006). À noter que les données utilisées dans le modèle hydrosédimentaire sont les températures moyennes journalières.

Conditions futures

En conditions futures, le régime thermique sera influencé par les modifications du régime hydrologique et par la présence des réservoirs. Hydro-Québec (2006) a évalué le régime thermique moyen de l'eau pour une année à la sortie de la centrale de la Romaine-1 au PK 51,5 (figure A6-3). Ces données sont utilisées dans le modèle hydrosédimentaire en conditions futures.

2.6 Régime des glaces

Le régime des glaces ne peut être considéré dans GSTARS. Par conséquent, les simulations sont réalisées comme étant à surface libre, sans couvert de glace.

2.7 Matière en suspension et charge de fond au PK 3,8

La station de mesures du transport solide au PK 3,8, échantillonnée en 2003, constitue une station intermédiaire de comptabilisation du transit solide. Une relation entre le débit liquide et le débit solide a été élaborée pour reconstituer les débits solides utilisés pour l'étalonnage et la validation du modèle hydrosédimentaire.

Les paramètres a et b de l'équation 2 ont été déterminés à partir des concentrations de sédiments mesurées au PK 3,8 (tableau A6-1). Chaque concentration de sédiments est associée au débit moyen journalier (débit liquide) de la station n° 073801. Après la mise en relation du débit solide avec le débit liquide, une courbe de type puissance a été ajustée (figure A6-4).

La figure A6-5 compare le débit solide reconstitué à partir de l'équation 2 au débit solide mesuré. À noter que les débits solides reconstitués représentent bien les valeurs des débits solides mesurés.

À partir de la relation débit solide versus débit liquide au PK 3,8, le transit total de la charge de sédiments reconstitué pour les années 2003 et 2004 a été extrapolé et est évalué respectivement pour ces deux années à 38 300 et à 37 800 tonnes.

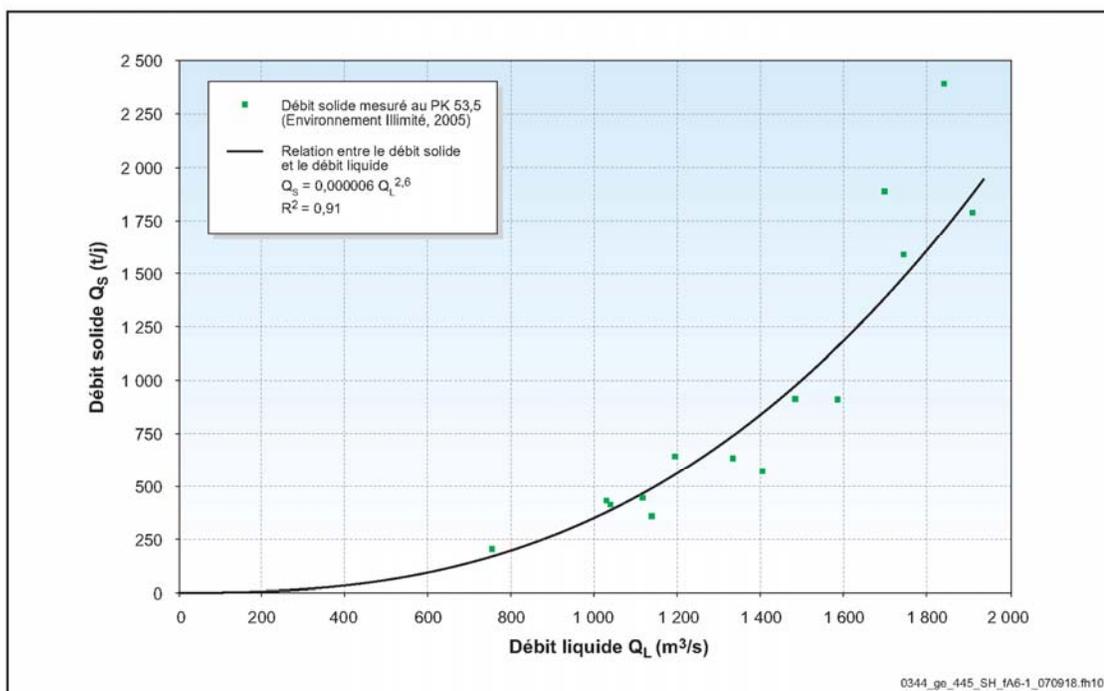


Figure A6-1. Relation entre le débit solide et le débit liquide au PK 53,5.

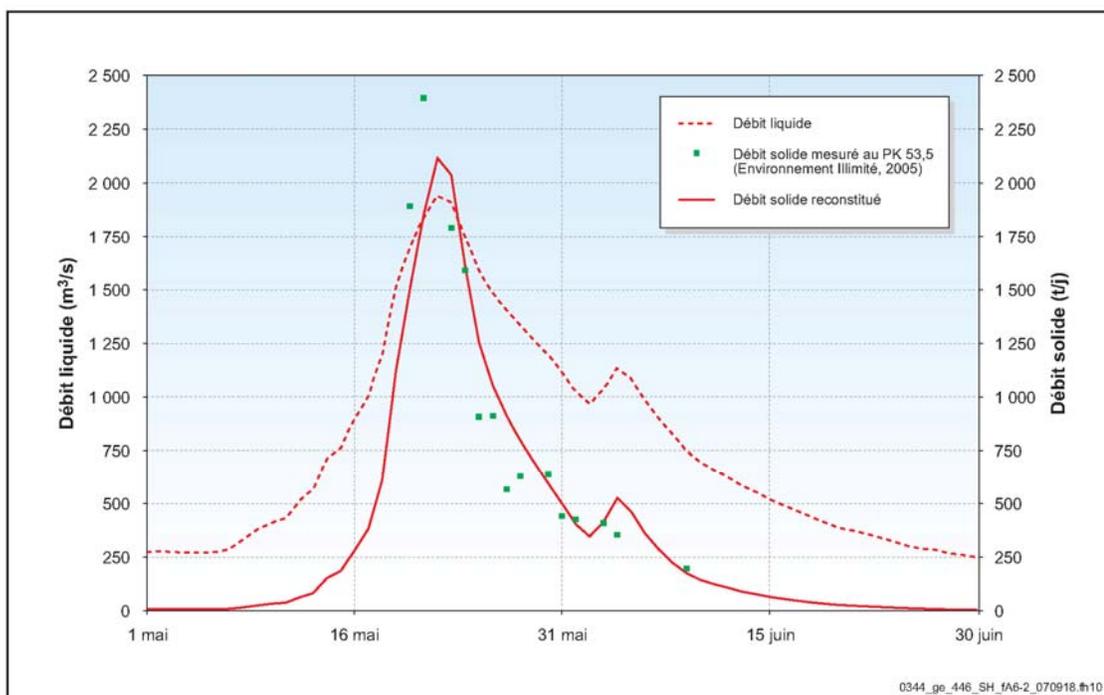
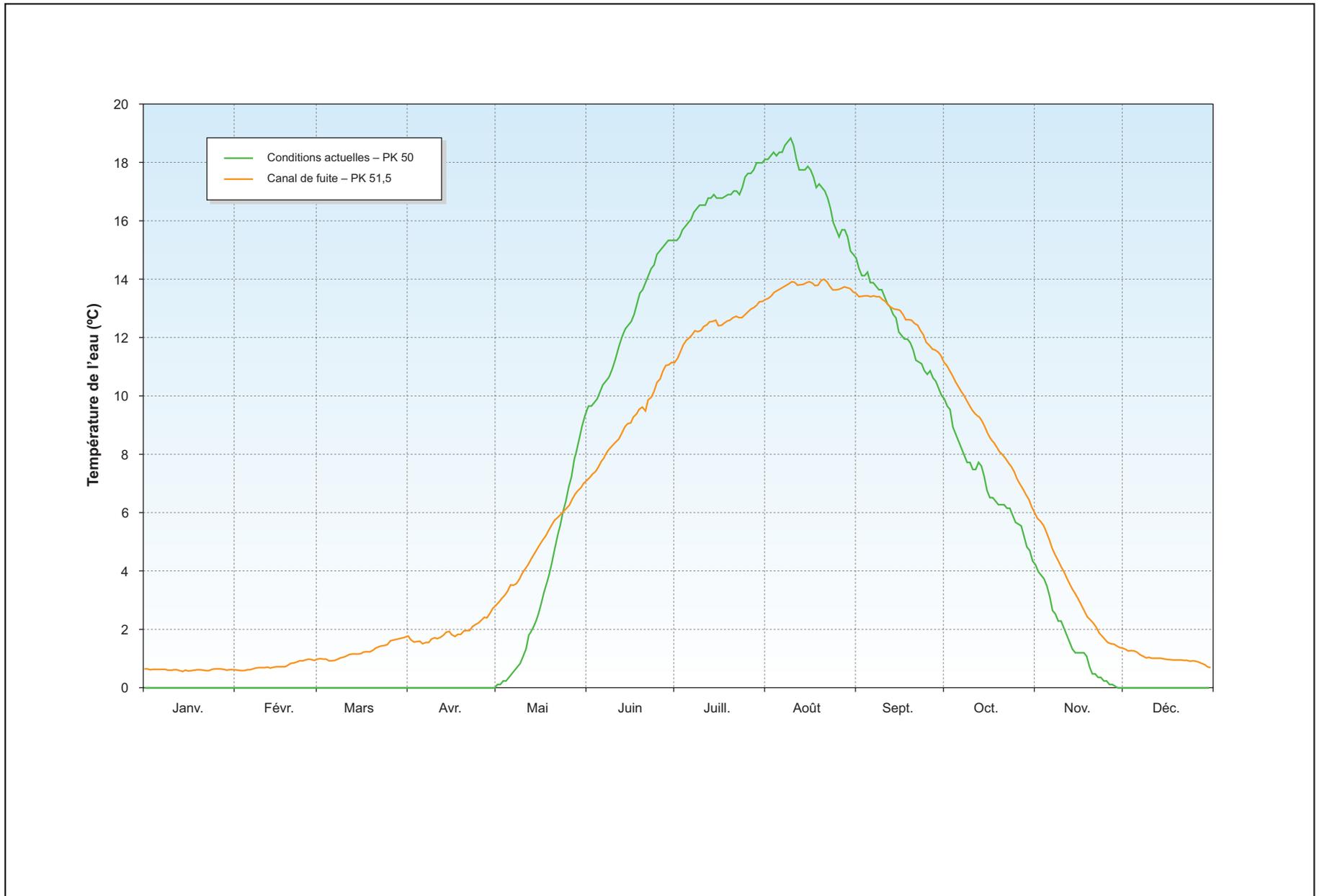


Figure A6-2. Comparaison des débits solides mesurés et reconstitués au PK 53,5 en 2003.

Figure A6-3 Température de l'eau au PK 51,5 de la Romaine (canal de fuite de la Romaine-1) – Conditions actuelles et futures



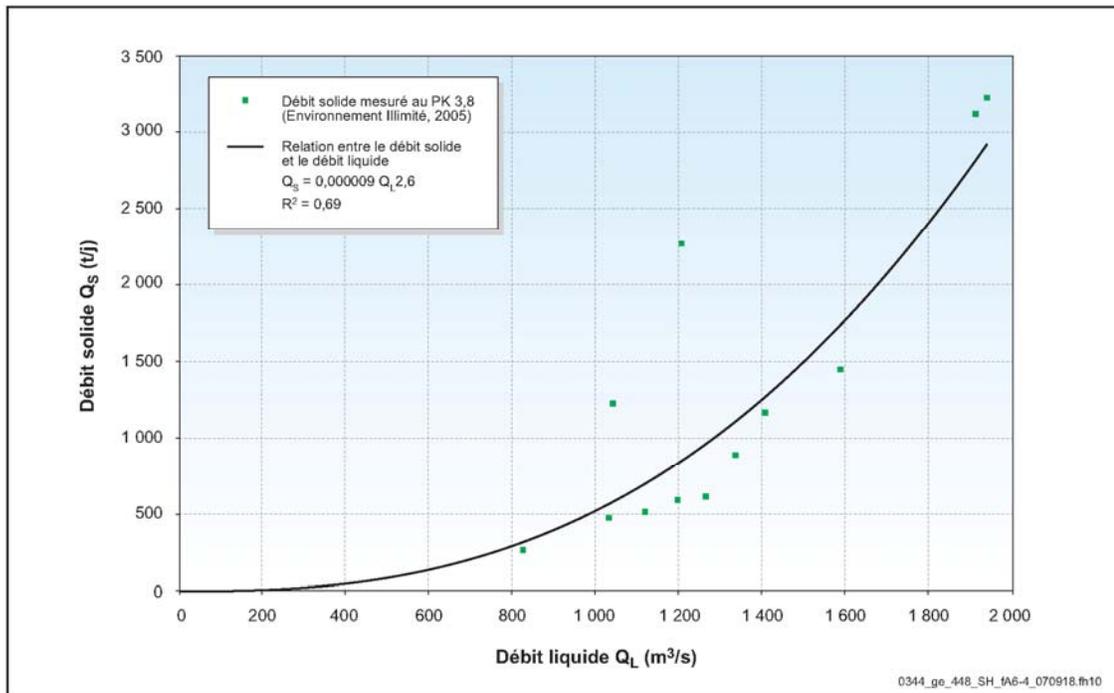


Figure A6-4. Relation entre le débit solide et le débit liquide au PK 3,8.

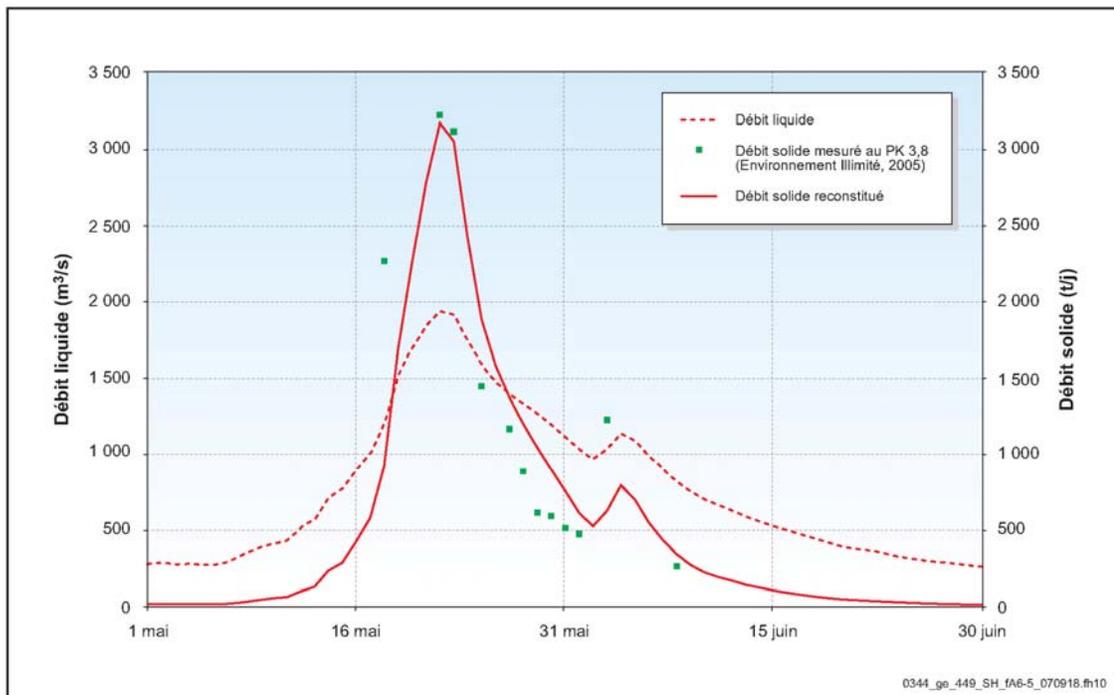


Figure A6-5. Comparaison des débits solides mesurés et reconstitués au PK 3,8 en 2003.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

2.8 Pas de temps

Le pas de temps retenu pour le calcul hydraulique est la journée. Ce choix est dicté essentiellement sur le fait que les débits disponibles sont journaliers et qu'il atténue les variations rapides de débits pouvant contrevenir aux hypothèses de base sur la permanence du régime d'écoulement.

Pour les calculs reliés à la dynamique sédimentaire, plusieurs simulations préliminaires ont été effectuées en faisant réduire progressivement le pas de temps d'une journée à une heure, ce qui a permis de voir que la stabilité du modèle est atteinte avec un pas d'une heure. Un pas de temps d'une heure est donc retenu pour toutes les simulations reliées à la dynamique sédimentaire.

2.9 Autres paramètres du calcul numérique

Le logiciel GSTARS permet de modéliser l'écoulement de l'eau et le transport de sédiments dans une rivière à partir d'un ou de plusieurs tubes de courant. À chaque pas de temps, lorsque les propriétés hydrauliques d'une section (vitesse, rayon hydraulique, etc.) sont connues, la section est divisée par le nombre de tubes choisi de façon à ce que chaque division possède la même débitance. Pour la présente étude, les analyses préliminaires ont démontré que l'utilisation d'un seul tube de courant fournissait la meilleure représentation du comportement hydrosédimentaire du cours aval de la Romaine. Par conséquent, un seul tube est utilisé tant pour les conditions actuelles que futures.

Une seule couche de substrat est considérée dans le modèle. Les données disponibles ne permettent pas de décrire plus en détail la composition verticale du lit et des berges du tronçon de la rivière étudiée. Cette couche est considérée comme la couche active où peuvent se produire l'érosion et la déposition.

3. **Étalonnage et validation**

3.1 Calage et validation des conditions hydrauliques

Les simulations hydrauliques sont effectuées dans le but d'étalonner le modèle hydrosédimentaire avec le modèle hydrodynamique tiré de GENIVAR (2004b).

Les conditions hydrauliques du modèle hydrosédimentaire de la rivière Romaine ont été calibrées et validées à partir de quatre simulations dont deux à débit moyen (400 et 500 m³/s) et deux autres à débit élevé (1 000 et 1 500 m³/s). Les apports intermédiaires des trois principaux sous-bassins versants sont aussi intégrés au modèle (tableau A6-11). À noter que les apports intermédiaires sont déterminés de façon proportionnelle à la superficie de chaque sous-bassin versant.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Tableau A6-11. Débits modélisés et apports des tributaires.

Bassin versant	Superficie (km ²)	PK (km)	Débit imposé ou apport intermédiaire (m ³ /s)			
Bassin versant : à la centrale Romaine-1	12 960	51,75	400	500	1 000	1 500
Sous-bassin 1 : de la centrale Romaine-1 à la chute de l'Église	183	16,40	5,6	7,1	14,1	21,2
Sous-bassin 2 : de la chute de l'Église à l'aval de la rivière Puyjalon	1 227	12,00	37,9	47,3	94,7	142,0
Sous-bassin 3 : de l'aval de la rivière Puyjalon à l'embouchure	103	5,82	3,2	4,0	7,9	11,9

Les figures A6-6 et A6-7 comparent les lignes d'eau du modèle hydrosédimentaire et celles de GENIVAR (2004b). Les résultats obtenus sont tout à fait comparables. En effet, les écarts d'élévations maximums entre les lignes d'eau sont d'environ 20 cm.

3.2 Étalonnage

Dans le but de choisir l'équation de transport la plus appropriée pour le domaine d'étude, dix simulations ont été effectuées avec les données hydrologiques de 2003. Pour chacune des simulations, l'une des 10 équations disponibles dans GSTARS a été utilisée. Le tableau A6-12 présente la charge sédimentaire, c'est-à-dire le volume de sédiments transportés au droit du PK 3,8 pour chaque simulation.

Tableau A6-12. Charge sédimentaire au PK 3,8 de l'année 2003 pour les équations étudiées.

Équation	Type d'équation ¹	Volume (tonnes)
DuBoys (1879)	TC	198 00
Meyer-Peter and Müller (1948)	TC	103 500
Laursen (1958)	TT	11 500
Laursen modifiée par Madden (1993)	TT	11 300
Engelund et Hansen (1972)	TT	107 600
Ackers et White (1973)	TT	45 400
Ackers et White (HR Wallingford, 1990)	TT	41 000
Yang (1973) et Yang (1984)	TT	51 700
Yang (1979) et Yang (1984)	TT	35 800
Yang et coll. (1996)	TT	25 000

¹ TC : Transport par charge de fond.

TT : Transport total (charge de fond et matière en suspension).

Figure A6-6 **Étalonnage hydraulique du modèle hydrosédimentaire à débit moyen entre le PK 0,7 et le PK 51,75**

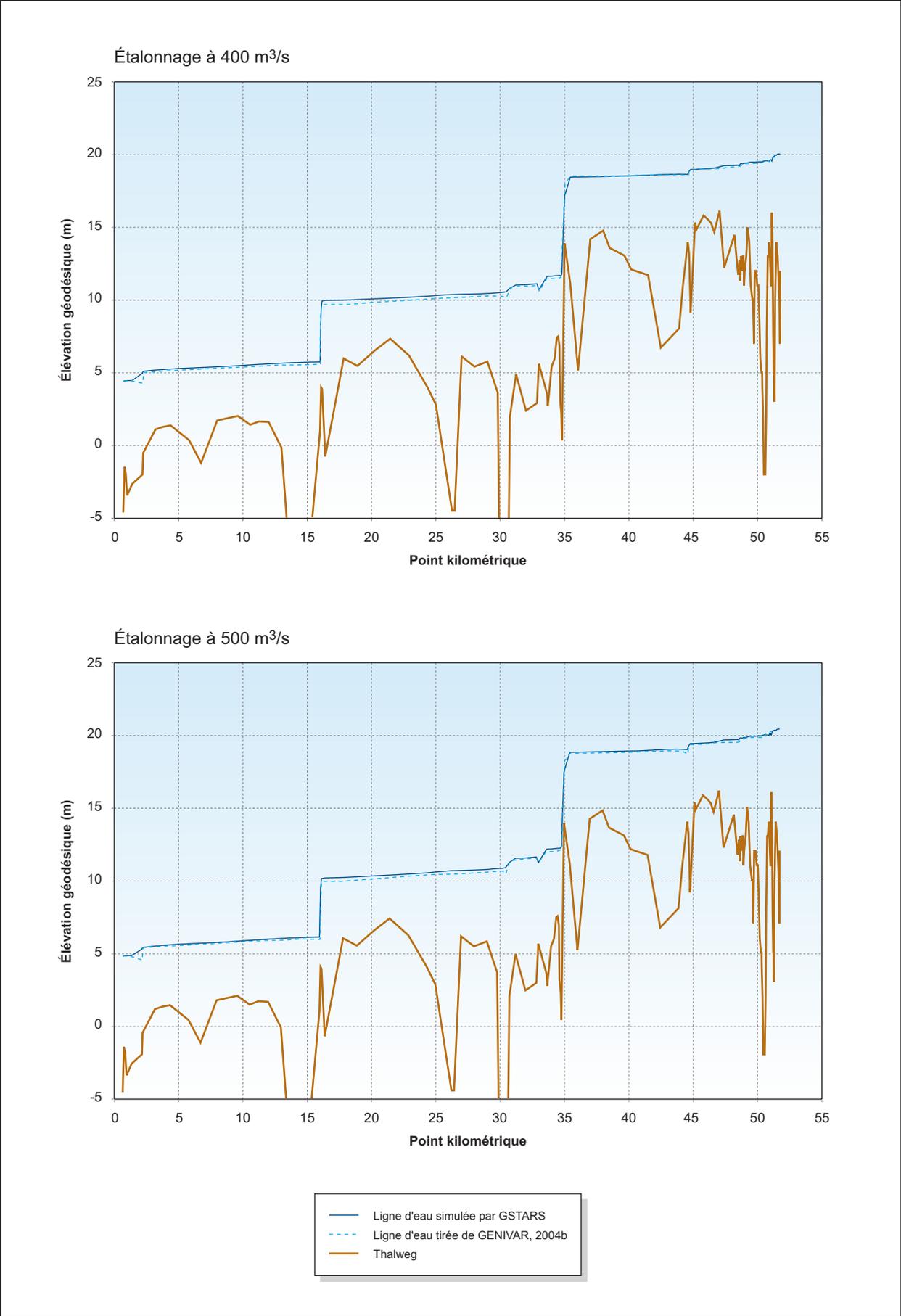
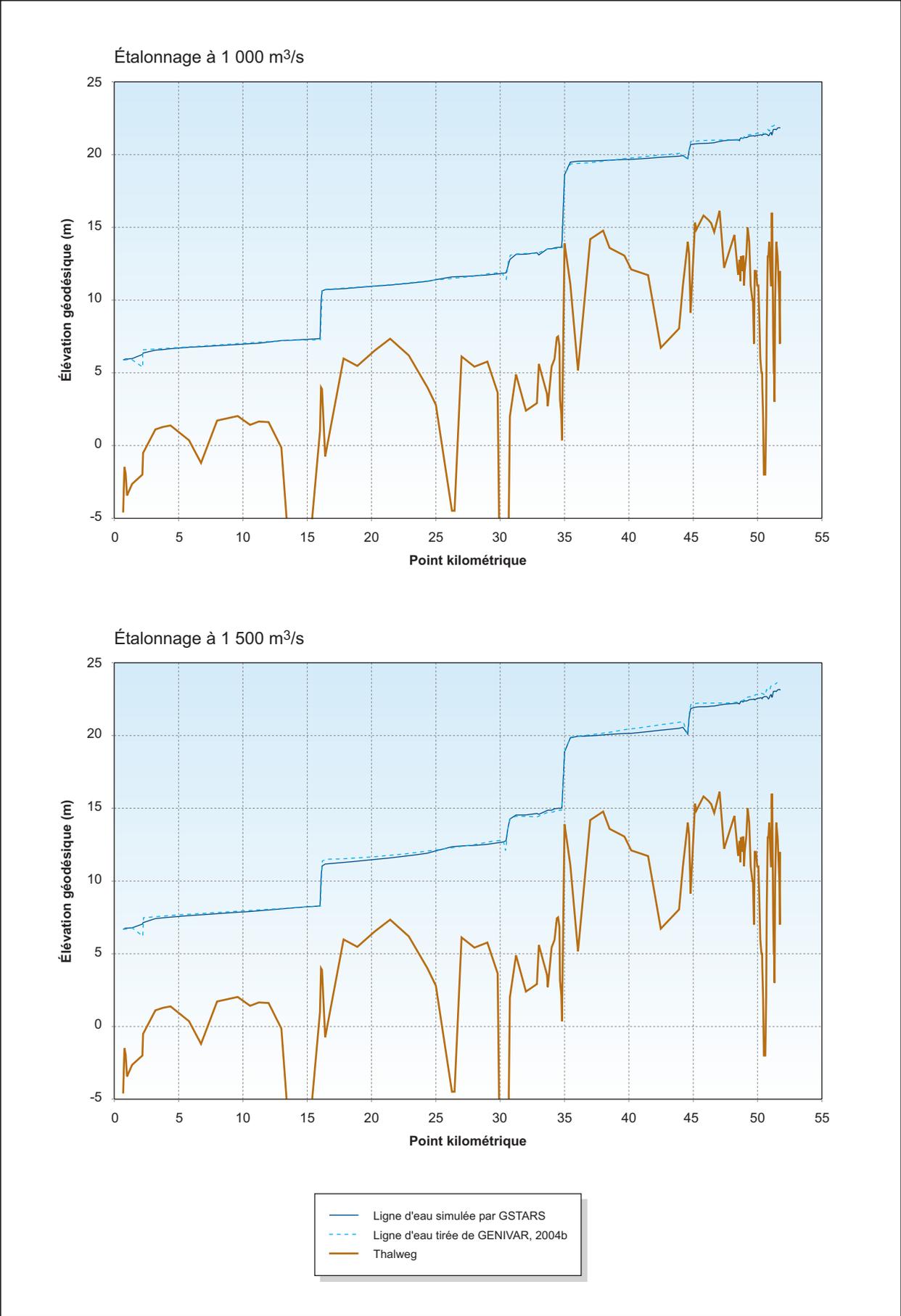


Figure A6-7 **Étalonnage hydraulique du modèle hydrosédimentaire à débit élevé entre le PK 0,7 et le PK 51,75**



ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Comme les modèles de DuBoys (1879) et de Meyer-Peter et Muller (1948) sont uniquement adaptés au transport par charge de fond, ils ont été éliminés de l'étude. Parmi les autres modèles, les résultats indiquent que les modèles de Ackers et White (HR Wallingford, 1990), Yang (1979, 1984) et de Ackers et White (1973) sont les plus adéquats par rapport au transit total reconstitué.

Le modèle de Ackers et White (HR Wallingford, 1990), le plus utilisé dans la littérature scientifique, a été retenu pour modéliser le transport solide. Aux fins de comparaison avec les résultats de la simulation (41 000 tonnes), rappelons que la charge sédimentaire obtenue par reconstitution au PK 3,8 est de 38 300 tonnes (section 2.7 de l'annexe 6). Environnement Illimité (2004) a estimé la charge sédimentaire au PK 3,8 à environ 70 000 tonnes.

Le tableau A6-12 présente le bilan sédimentaire, soit la différence entre la charge sédimentaire à l'amont au PK 53,5 et celle à l'aval au PK 3,8. Les bilans sédimentaires s'élèvent à 12 800 et à 15 500 tonnes respectivement pour la reconstitution et la simulation de l'année 2003. Le bilan sédimentaire d'Environnement Illimité (2004) est de l'ordre de 36 971 tonnes.

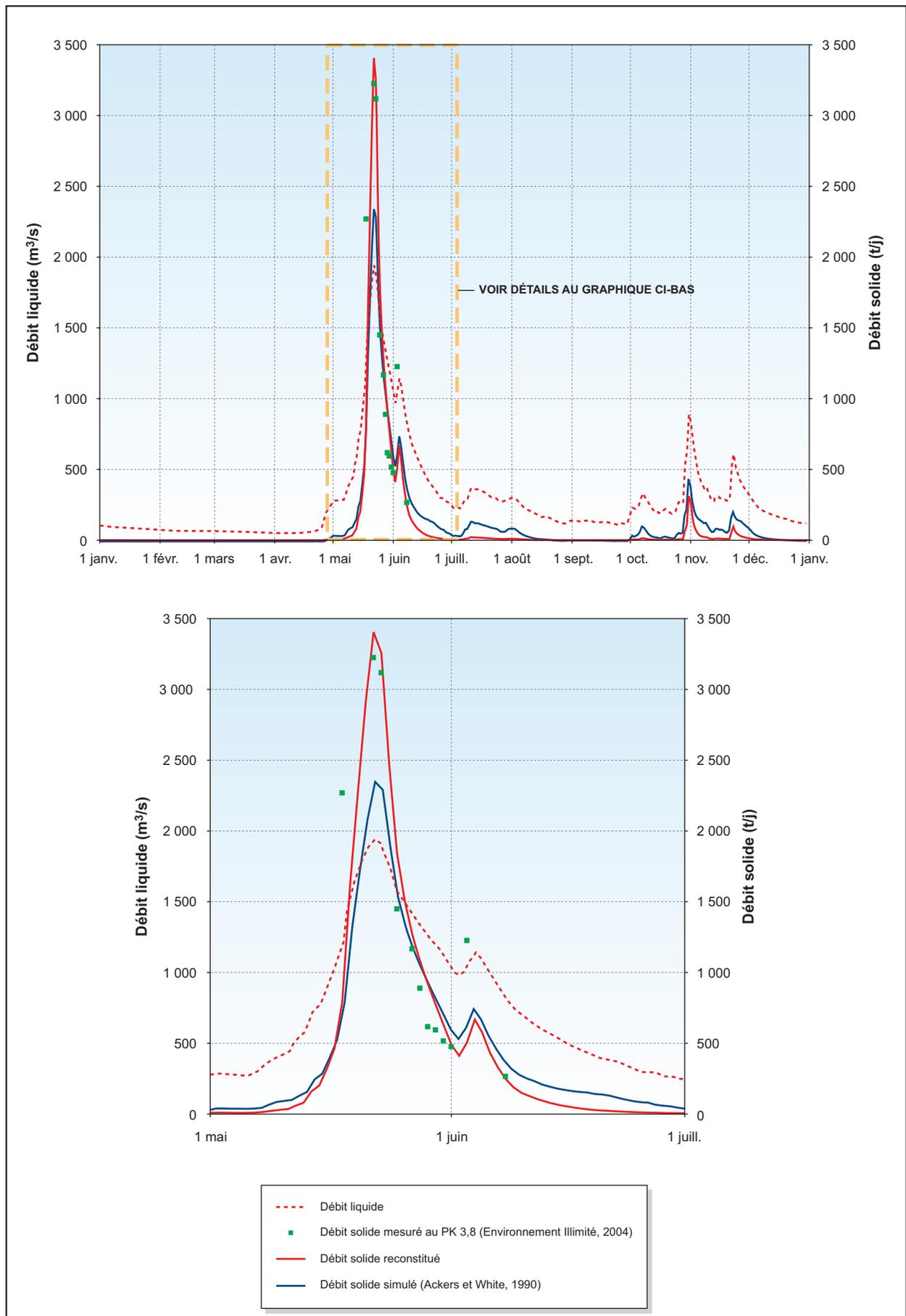
Tableau A6-13. Bilans sédimentaires de l'année 2003.

Source	Amont - PK 53,5 (t)	Aval - PK 3,8 (t)	Bilan sédimentaire (t)
Reconstitution GENIVAR - 2003	25 500	38 300	12 800
Simulation 2003	25 500	41 000	15 500
Mesures 2003 ^a	32 984	69 955	36 971

a Environnement Illimité (2004).

La figure A6-8 présente les résultats de la simulation de l'année 2003. Sur cette figure, les débits solides mesurés et reconstitués sont comparés aux débits solides simulés. La simulation du transport solide est très fidèle aux débits solides reconstitués. Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) a été utilisé pour évaluer la qualité des résultats. Ce critère, adimensionnel, donne des valeurs entre $-\infty$ et 1. À noter qu'une simulation est de bonne qualité lorsque le Nash est supérieur à 0,7. Le tableau A6-14 présente les valeurs de Nash pour la simulation de l'année 2003 en fonction de la reconstitution et des mesures (Environnement Illimité, 2004) de l'année 2003. D'après ces valeurs de Nash élevées entre la simulation (d'après le modèle Ackers et White, 1990) et les mesures (tableau A6-14), la simulation de l'année 2003 est d'une bonne qualité.

Figure A6-8 Comparaison entre les débits solides mesurés et simulés au PK 3,8 en 2003



ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Comme le montre la figure A6-8, la simulation avec l'équation d'Ackers et White (HR WallingFord, 1990) sous-estime les quantités transportées lors de la montée de la crue, comparativement au débit basé sur la reconstitution. Il est probable que cette différence soit causée par la précision de la composition granulométrique du substrat du lit de la rivière imposée au modèle hydrosédimentaire.

Tableau A6-14. Critère de Nash pour les simulations 2003.

Comparaison	Critère de Nash
Simulation versus reconstitution	0,93
Simulation versus mesures d'Environnement Illimité (2004)	0,63

Malgré les différentes méthodologies utilisées, les bilans sédimentaires demeurent du même ordre de grandeur. Somme toute, le bilan sédimentaire (matière en suspension et charge de fond) de l'année 2003 est de l'ordre de 14 150 tonnes. À noter qu'il s'agit d'une moyenne entre le bilan sédimentaire de la reconstitution GENIVAR et de la simulation de l'année 2003.

3.3 Validation

L'année hydrologique 2004 a été simulée afin de valider le modèle hydrosédimentaire toujours en utilisant l'équation de transport total de Ackers et White (HR Wallingford, 1990). La charge sédimentaire au PK 3,8 obtenue pour la simulation de l'année 2004 est de 39 400 tonnes.

Aux fins de comparaison avec les résultats de la simulation (39 400 tonnes), rappelons que la charge sédimentaire obtenue par reconstitution au PK 3,8 est de 37 800 tonnes (section 2.7 de l'Annexe 6).

Le bilan sédimentaire (matière en suspension et charge de fond) de l'année 2004 est d'environ 13 400 tonnes. À noter qu'il s'agit d'une moyenne entre le bilan sédimentaire de la reconstitution GENIVAR et de la simulation de l'année 2004. Le bilan sédimentaire d'Environnement Illimité (2005) est entre 18 550 et 20 406 tonnes.

Tableau A6-15. Bilans sédimentaires de l'année 2004.

Source	Amont - PK 53,5 (t)	Aval - PK 3,8 (t)	Bilan sédimentaire (t)
Reconstitution GENIVAR - 2004	25 200	37 800	12 600
Simulations 2004	25 200	39 400	14 200
Mesures 2004 ^a	32 485 à 34 257 ^b	51 035 à 54 673	18 550 à 20 406

a Environnement Illimité (2005).

b La station amont de Environnement Illimité est située au PK 162.

ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

La figure A6-9 présente les résultats de la simulation de l'année 2004 et on peut en déduire que la simulation du transport solide est comparable aux débits solides reconstitués. Les valeurs de Nash pour la simulation de l'année 2004 en fonction de la reconstitution et des mesures (Environnement Illimité, 2005) de l'année 2004 sont présentées au tableau A6-16. Les mesures de l'année 2004 comportent une grande incertitude due à des problèmes techniques survenus lors des campagnes de relevés (Environnement Illimité, 2005), ce qui explique la faible valeur du critère de Nash en ce qui concerne la simulation versus les mesures de l'année 2004.

Tableau A6-16. Critère de Nash pour les simulations 2004.

Comparaison	Critère de Nash
Simulation versus reconstitution	0,95
Simulation versus mesures d'Environnement Illimité (2004)	-0,27

Pour statuer sur la qualité du modèle, seule la comparaison au débit reconstitué est significative. Une part de la différence observée entre les résultats simulés et les résultats reconstitués est attribuée au fait qu'en général, les modèles théoriques ne reproduisent pas le déphasage qui existe entre la pointe de l'hydrogramme du débit liquide et celle de l'hydrogramme du débit solide. Le rapport d'Environnement Illimité (2004) mentionne la présence d'un tel asynchronisme. Le maximum de débit solide de la matière en suspension devançait de 17 jours celui du débit de la rivière.

3.4 Bilan sédimentaire à long terme pour les conditions actuelles

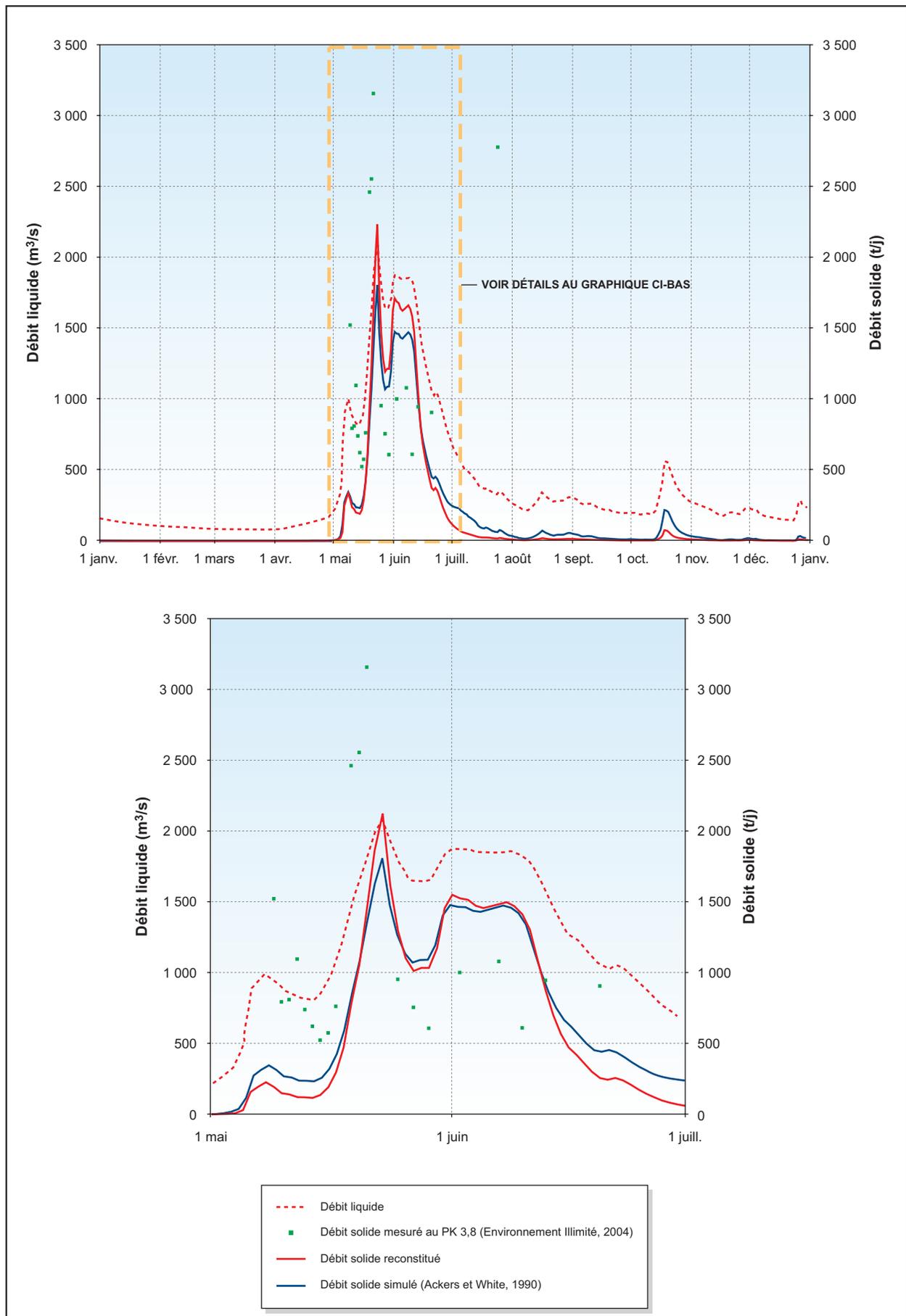
La charge sédimentaire à long terme a été évaluée à partir de la relation de débit liquide versus débit solide au PK 3,8 (section 2.7 de l'annexe 6) pour les années 1957 à 2000, soit un total de 44 années. Cette charge est de l'ordre de 1,659 million de tonnes (tableau A6-17). À noter que cette charge ne tient pas compte des glissements de terrain, donc de la matière silto-argileuse, survenus dans la période étudiée.

Afin de calculer le bilan sédimentaire, la charge sédimentaire à long terme au PK 53,5 a été évaluée (relation développée à la section 2.4 de l'annexe 6) et est de l'ordre de 1,106 million de tonnes. Le bilan sédimentaire est donc de 0,553 million de tonnes, soit 12 600 tonnes par année entre les PK 53,5 et 3,8 en conditions actuelles (tableau A6-17).

Tableau A6-17 Bilan sédimentaire à long terme en conditions actuelles au PK 3,8 pour la période 1957-2000.

Source	Amont - PK 53,5 (10 ⁶ t)	Aval - PK 3,8 (10 ⁶ t)	Bilan sédimentaire (10 ⁶ t)	Bilan sédimentaire annuel (t/a)
Reconstitution GENIVAR (1957-2000)	1,106	1,659	0,553	12 600

Figure A6-9 Comparaison entre les débits solides mesurés et simulés au PK 3,8 en 2004



ANNEXE 6 (suite). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

Références

ACKERS P., WHITE W.R., 1973. *Sediment transport : new approach and analysis*. Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), 99 (HY11).

DUBOYS M.P., 1879. *Le Rhône et les rivières à lit affouillable*. Annales de Ponts et Chaussée, 18(5), pp. 141-195.

ENGELUND F., HANSEN E., 1972. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, Denmark.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2004. *HYDAT*. Version 2.04. Mise à jour du 28 janvier 2004.

ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ, 2004. *Aménagements hydroélectriques de la rivière Romaine – Études préliminaires : mesure de la charge sédimentaire*. Rapport présenté à la direction Environnement et services techniques, Ingénierie, approvisionnement et construction d'Hydro-Québec par ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 43 p. et annexes.

ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ, 2005. *Complexe de la Romaine – Études sédimentologiques et océanographiques de la rivière Romaine et de son delta*. Rapport de mission 2004 version préliminaire présenté à la direction principale – Expertise – Unité environnement, Hydro-Québec, par ENVIRONNEMENT ILLIMITÉ. 115 p. et annexes.

GENIVAR, 2002. *Aménagement hydroélectrique de la Romaine-1 – Étude de la population de saumon atlantique de la rivière Romaine en 2001*. Rapport présenté à la direction Environnement et Services techniques d'Hydro-Québec par le Groupe conseil GENIVAR. 119 p. et 10 annexes.

GENIVAR, 2004b. *Rivière Romaine. Modélisation hydrodynamique 1D entre les PK 0 et 192*. Rapport du Groupe conseil GENIVAR inc. à Hydro-Québec Production, Direction Aménagement de production, Hydraulique et Géotechnique. 95 p. et annexes.

HYDRO-QUÉBEC 2005b. Transmission des données du modèle hydrodynamique de la rivière Romaine du PK 51,75 au PK 48,7 par courriel.

HYDRO-QUÉBEC, 2006. *Complexe Romaine, avant-projet phase 2, Régime thermique*. Rapport sectoriel. Montréal, Hydro-Québec Équipement.

HR WALLINGFORD, 1990. *Sediment transport, the Ackers and White theory revised*. Report SSR237, HR Wallingford, England.

LAROCHE, B. 1983. *Dynamique hydraulique et sédimentaire du delta actif de la rivière Romaine*. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Rimouski. 153 p. et annexes.

ANNEXE 6 (fin). Mise en œuvre du modèle hydrosédimentaire entre les PK 0,7 et 51,75.

LAURSEN E.M., 1958. *The total sediment load of streams*. Journal of the Hydraulic Division, ASCE. 84(HY1).

LONG, B., MORISSETTE, M. et LEBEL, J. 1982. *Étude du matériel particulaire en suspension et du matériel dissous des rivières Romaine et Saint-Jean durant un cycle saisonnier*. INRS-Océanologie. Pour Hydro-Québec. PC-82-CE-14. 54 p. et annexes.

MADDEN, E., 1993. *Modified Laursen method for estimating bed-material sediment load*. USACE-WES, Contract Report HL-93-3.

MDDEP, (2006). Transmission des données par courriel par madame Diane Morin en date du 22 mars 2006.

MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R., 1948. *Formula for bed-load transport*. Proceedings of the international Association for Hydraulic Research, 2nd Meeting, Stockholm.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.V., 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. Journal of Hydrology 10 (3). p. 282-290.

POLY-GÉO, 2006. *Étude de la dynamique sédimentaire, Complexe de la Romaine*. Rapport présenté à Hydro-Québec Équipement. 121 p. et annexes.

YANG C.T., 1973. *Incipient motion and sediment transport*. Journal of the Hydraulic Division, ASCE. 99(HY10), pp. 1679-1704.

YANG C.T., 1979. *Unit stream power equations for total load*. Journal of hydrology, 40.

YANG C.T., 1984. *Unit stream power equations for gravel*. Journal of the Hydraulic Division, ASCE. 110(HY12)

YANG C.T., MOLINAS A., WU B., 1996. *Sediment transport in the Yellow River*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 122(5).

ANNEXE 6a

Liste des sections transversales du modèle hydrosédimentaire

ANNEXE 6a. Liste des sections transversales du modèle hydrosédimentaire.

Les sections transversales du modèle hydraulique de la présente étude sont tirées de GENIVAR (2004b). Toutefois, des modifications ont été apportées. D'abord, Hydro-Québec (2005b) a effectué en 2005 un relevé bathymétrique du PK 48,7 au PK 51,75. Ces relevés ont été intégrés dans le présent modèle hydraulique. Ensuite, une limite du nombre de points pour décrire une section transversale doit être imposée avec le logiciel GSTARS, comparativement au logiciel HEC-RAS. Généralement, une douzaine de points suffit pour décrire adéquatement une section. À noter qu'un grand nombre de points pour décrire une section n'augmente pas nécessairement la précision des calculs hydrauliques. En utilisant la fonction « *Cross Section Point Filter* » du logiciel HEC-RAS, les sections HEC-RAS qui contiennent parfois une centaine de points ont été filtrées et insérées dans le modèle GSTARS.

Le modèle hydraulique comporte 142 sections, dont 113 ont été relevées sur le terrain par Hydro-Québec et GENIVAR, 18 sont fictives et 11 sont interpolées. Le tableau A6a-1 présente la source de chaque catégorie de sections utilisées dans le modèle. Enfin, la liste complète des sections est présentée au tableau A6a-2.

À noter que les sections fictives ont été générées dans le but de représenter les zones de rapide de la rivière Romaine aux endroits où les relevés bathymétriques n'ont pu être effectués.

Tableau A6a-1. Sources des différentes sections transversales du modèle GSTARS.

Catégorie	Source des sections
ROM-X	Relevé par Hydro-Québec en 2001
GEN X.XX	Relevé par GENIVAR en 2004
SXXX ou RXX	Relevé par Hydro-Québec en 2005b
Sections fictives	D'après GENIVAR (2004b)
Interpolées HEC-RAS	D'après le logiciel HEC-RAS
Interpolées MNT-HQ	D'après le modèle numérique de terrain (MNT) d'Hydro-Québec (HQ)

Tableau A6a-2. Sections du modèle GSTARS.

Station	PK	Station	PK
ROM-01 et ROM-02	0,700	GEN 45.9	45,900
Interpolée HEC-RAS	0,800	Section fictive	46,180
Interpolée HEC-RAS	0,900	GEN 46.4	46,400
ROM-03	1,000	ROM-49	46,630
ROM-04	1,400	GEN 47.05	47,050

ANNEXE 6a (suite). Liste des sections transversales du modèle hydrosédimentaire.

Tableau A6a-2 (suite). Sections du modèle GSTARS.

Station	PK	Station	PK
Section fictive	2,200	ROM-50	47,400
ROM-05	2,250	GEN 48.2	48,200
ROM-06	3,210	Interpolée MNT HQ	48,460
ROM-08	4,380	GEN 48.5	48,500
ROM-09	5,820	Interpolée MNT HQ	48,560
ROM-10	6,750	Interpolée MNT HQ	48,585
ROM-11	8,000	GEN 48.65	48,650
ROM-12	9,600	Interpolée MNT HQ	48,660
Section fictive	10,570	s001	48,700
ROM-13	11,250	s002	48,770
ROM-14	12,000	s003	48,840
ROM-15	13,000	s004	48,900
ROM-16	14,300	s005	48,950
Section fictive	16,000	s01	49,000
Section fictive	16,080	s02	49,120
ROM-17	16,150	s03	49,230
ROM-18	16,400	s04	49,350
ROM-19	17,830	s05	49,460
ROM-20	18,900	s06	49,600
ROM-21	20,250	s07	49,640
ROM-22	21,450	s08	49,720
ROM-23 et ROM-24	22,900	s09	49,780
ROM-25 et ROM-26	24,350	s10	49,880
ROM-27	25,000	s11	49,970
ROM-28	26,250	s12	50,060
Section fictive	26,450	s13	50,130
ROM-29	27,000	s14	50,210
ROM-30	28,000	s15	50,300
ROM-31	29,000	s16	50,350
Section fictive	29,800	s17	50,370
ROM-32	30,200	s18	50,400
Section fictive	30,450	s19	50,430
Section fictive	30,600	s20	50,490
Section fictive	30,750	s21	50,540
ROM-33	31,230	s22	50,600
ROM-34	32,000	s23	50,670
ROM-35	32,850	s24	50,710

ANNEXE 6a (fin). Liste des sections transversales du modèle hydrosédimentaire.

Tableau A6a-2 (suite). Sections du modèle GSTARS.

Station	PK	Station	PK
Section fictive	33,000	s25	50,790
ROM_033_64	33,640	s26	50,840
GEN 33.7	33,700	s27	50,910
GEN 34.0	34,000	Interpolée HEC-RAS	50,953
ROM-36	34,220	Interpolée HEC-RAS	50,996
GEN 34.4	34,400	R01	51,040
Section fictive	34,500	R02	51,060
Section fictive	34,600	R03	51,070
GEN 34.65	34,650	Section fictive	51,090
GEN 34.75	34,750	R05	51,100
ROM-37	34,800	s29	51,110
Section fictive	35,000	R06	51,130
ROM-38	35,450	R08	51,150
ROM-39	36,050	R09	51,170
ROM-40	37,000	s30	51,180
ROM-41	38,000	R10	51,210
ROM-42	38,500	R11	51,230
Section fictive	39,650	R12	51,260
ROM-43	40,180	s31	51,290
ROM-44	41,490	Interpolée HEC-RAS	51,305
ROM-45	42,480	s1	51,320
ROM-46	43,900	Interpolée HEC-RAS	51,333
Section fictive	44,200	Interpolée HEC-RAS	51,346
Section fictive	44,580	s32	51,360
ROM-47	44,680	s33	51,450
GEN 44.8	44,800	s34	51,560
ROM_045_14	45,140	s35	51,690
GEN 45.24	45,240	s36	51,730
ROM-48	45,800	s37	51,750

Références

GENIVAR, 2004b. *Rivière Romaine. Modélisation hydrodynamique 1D entre les PK 0 et 192.* Rapport du Groupe conseil GENIVAR inc. à Hydro-Québec Production, Direction Aménagement de production, Hydraulique et Géotechnique. 95 p. et annexes.

HYDRO-QUÉBEC 2005b. Transmission des données du modèle hydrodynamique de la rivière Romaine du PK 51,75 au PK 48,7 par courriel.

ANNEXE 7

Description du modèle GSTARS

1.0 Résumé

Le modèle GSTARS3 est un modèle de simulation du transport sédimentaire. Le calcul sédimentaire suit l'évaluation, pour chaque débit, de la courbe de remous le long du tronçon de rivière étudié, établie à l'aide d'un modèle unidimensionnel. Il s'agit donc d'un modèle hydraulique permettant des variations lentes du débit dans le temps et auquel on peut imposer un hydrogramme en escalier. Les résultats hydrauliques obtenus permettent ensuite d'établir des tubes de courant qui parcourent l'ensemble du tronçon tout en s'adaptant localement aux conditions existantes sur la partie de la section où ils passent. Une évaluation du transport sédimentaire est ensuite effectuée pour chacun de ces tubes de courant et pour chacun des diamètres de sédiments. GSTARS3 offre la possibilité d'utiliser différentes formules de transport sédimentaire en fonction du substrat. Pour chacune des sections, GSTARS3 fait le bilan des volumes érodés et déposés. Il détecte ainsi les sections qui ont connu une érosion ou une déposition globale. Une des caractéristiques de GSTARS3 est sa capacité de faire varier la forme de la section. En cas d'érosion globale, GSTARS3 ne creusera pas systématiquement la section pour enlever le volume requis. Il pourra également avoir la possibilité d'élargir la section. Le choix entre ces deux alternatives est commandé par la minimisation d'une fonction de transfert d'énergie.

2.0 Introduction

Le modèle GSTARS3 (*Generalized Sediment Transport Model For Alluvial River Simulation*) est en fait une série de modèles numériques développés par le *Sedimentation and River Hydraulics Group of the Technical Service Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado*. Cette série a connu beaucoup de développements depuis les versions publiques 2.0 et 2.1 (Yang et coll., 1998; Yang et Simoes, 2000). La dernière version officielle mise à la disposition du public est la version 3.0 (Yang et Simoes, 2002).

GSTARS3 a été conçu pour résoudre les problèmes complexes de transport solide en rivière pour lesquels les données (mesures du transport de sédiments, description du substrat, etc.) sont limitées.

Sur le plan hydraulique, le modèle est capable de simuler les écoulements en canaux à surface libre, ayant des fonds et des parois fixes ou mobiles. Il résout les situations d'écoulement en régime fluvial, torrentiel et aussi les situations de régimes mixtes. Il s'agit d'un modèle unidimensionnel (1D), mais avec la possibilité de subdiviser la rivière en tubes de courant. Par conséquent, il est un modèle quasi bidimensionnel (2D). Sur le plan dynamique, il est qualifié de permanent.

Sur le plan sédimentologique, GSTARS3 est capable de prédire, en fonction du comportement hydraulique, les variations de la quantité de sédiments (érosion ou déposition des berges et du lit) aussi bien dans le sens longitudinal (le long de la rivière) que transversal (de part et d'autre de l'axe principal de l'écoulement au droit de toute section). Il comporte 16 équations différentes pour évaluer le taux de transport de sédiments.

ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

Le modèle est composé de deux modules : un module de calcul hydraulique et un module de calcul du transport solide. Les deux modules fonctionnent en mode découplé. À chaque pas de temps, il résout les équations hydrauliques d'abord, puis celles du transport solide.

3. Modèle Hydraulique de GSTARS3

Le calcul hydraulique est basé sur l'équation des écoulements graduellement variés. Les régimes mixtes et les transitions hydrauliques y sont traités en résolvant l'équation de conservation de l'énergie et l'équation de conservation des quantités de mouvement.

3.1 Équation d'énergie

L'équation d'énergie utilisée dans GSTARS3 est :

$$z + Y + \alpha \frac{V^2}{2g} = H$$

où :

z = l'élévation du lit de la rivière (talweg)

Y = la profondeur d'eau

V = la vitesse du courant

α = coefficient de la distribution de la vitesse

H = l'élévation de la ligne d'énergie hydraulique par rapport au datum

g = l'accélération de la pesanteur.

Cette équation d'énergie est utilisée pour tous les calculs des profils hydrauliques. L'hypothèse de pression hydrostatique est utilisée.

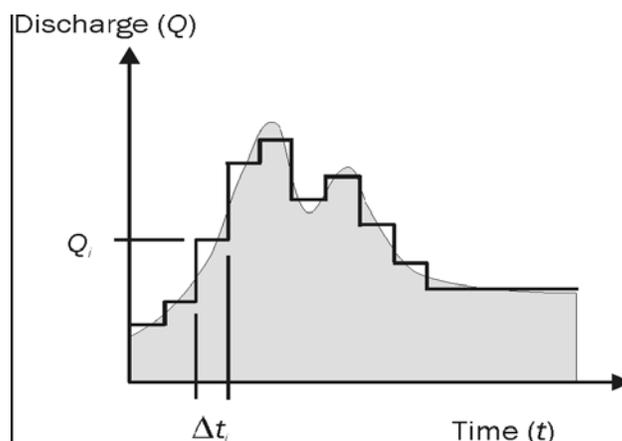


Figure A7-1 Représentation d'un hydrogramme par une fonction en escalier sous forme d'une série de débits constants Q_i pour des intervalles d'une durée finie Δt_i (tiré de Yang et Simoes, 2002)

ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

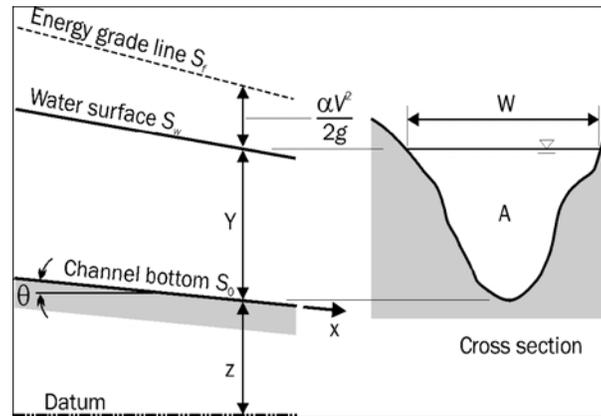


Figure A7-2 Définition des variables (tiré de Yang et Simoes, 2002)

3.2 Modélisation des régimes d'écoulement

L'équation d'énergie est applicable lorsque le régime d'écoulement est invariable sur tout le tronçon de la rivière. S'il y a une variation dans le régime d'écoulement, GSTARS3 utilise l'algorithme de Molinas et Yang (1985) pour le calcul des profils hydrauliques durant le changement du régime d'écoulement sans interruption. Il existe six changements possibles du régime d'écoulement :

- 1) Transition d'un écoulement fluvial vers un écoulement critique ou torrentiel.
- 2) Transition d'un écoulement critique vers un écoulement fluvial ou torrentiel.
- 3) Transition d'un écoulement torrentiel vers un écoulement critique ou fluvial.

Durant un changement brusque du régime d'écoulement, un ressaut hydraulique peut se produire. Dans ce cas, il y a une grande courbure dans les lignes de courant, la pression n'est plus hydrostatique et le régime d'écoulement est considéré rapidement varié.

Avant de procéder à l'évaluation des courbes de remous, il est nécessaire de déterminer le régime d'écoulement (écoulement fluvial, critique ou torrentiel). On commence par le calcul des profondeurs normales et critiques tout au long du tronçon à modéliser. Ces calculs sont effectués dans la direction aval pour les écoulements fluviaux et dans la direction amont pour les écoulements torrentiels. Lorsqu'un ressaut hydraulique est détecté dans un tronçon de la rivière, GSTARS3 utilise l'équation de la conservation de la quantité du mouvement suivante :

$$\frac{Q\gamma}{g}(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = p_1 - p_2 + W_g \sin \theta - F_f$$

ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

où :

γ = masse volumique de l'eau

β = coefficient de la quantité du mouvement

P = la pression agissant sur une section

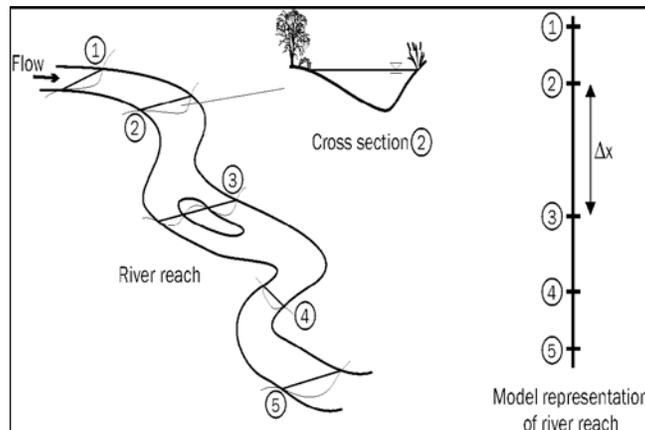
W_g = le poids de l'eau entre deux sections (1 et 2)

θ = angle d'inclinaison du chenal

F_f = la force totale de frottement sur la frontière du chenal

3.3 Modélisation des tronçons et sections de la rivière

Comme tout modèle numérique unidimensionnel, la représentation du tronçon de la rivière à modéliser est effectuée par une discrétisation des sections transversales situées à des endroits spécifiques tout au long de la rivière.

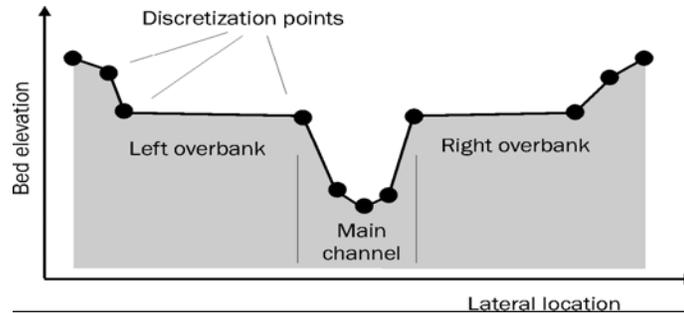


GSTARS3 utilise les informations associées à chaque section transversale pour calculer le profil de la surface libre de l'eau (et aussi les changements de lit pour les rivières avec un fond mobile). L'élévation de la surface libre de l'eau est calculée à chaque section et non pas entre les sections. C'est la raison pour laquelle un choix judicieux de l'emplacement des sections est très important.

3.4 Description des sections

Pour la mise en œuvre d'une simulation avec GSTARS3, la première étape est la définition et la configuration de la géométrie du tronçon à modéliser. Cette tâche est accomplie en choisissant les sections transversales tout au long du tronçon.

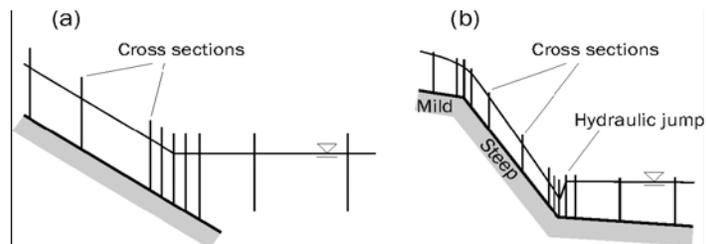
ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.



La géométrie de la section est discrétisée par un ensemble de points, tels que ceux obtenus durant la campagne de relevés bathymétriques et hydrographiques. Une interpolation linéaire est utilisée entre ces points comme le montre la figure suivante :

Les données de chaque section sont utilisées pour calculer les courbes de remous, les surfaces d'écoulement, le périmètre mouillé, le rayon hydraulique, la largeur miroir et le centroïde de la section.

Le nombre et les positions des sections sont arbitraires. Cependant, il est recommandé de bien les choisir pour avoir une meilleure représentation de la géométrie réelle du chenal de la rivière. Il est aussi essentiel d'avoir des données précises pour obtenir de meilleurs résultats. Comme chaque section représente une portion du tronçon de la rivière, le choix de sa position est important. Un nombre plus élevé de sections doit être considéré, dans le cas d'un grand changement dans la géométrie de la rivière ou dans les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, pour mieux approximer la rivière. La figure suivante montre comment positionner les sections dans les zones de ressaut hydraulique ou les régions de variation abrupte de la pente de la rivière.



ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

3.5 Modélisation du frottement et de la résistance à l'écoulement

Une des hypothèses fondamentales utilisées dans GSTARS3 est l'utilisation d'une formule d'écoulement uniforme pour calculer les pertes de charge dues au frottement. Cette formule est utilisée pour calculer la débitance totale, K . La débitance totale est utilisée pour déterminer la pente de frottement, S_f , pour un débit spécifique :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2$$

Dans GSTARS3, on peut utiliser l'une des formules suivantes pour calculer K :

Formule de Manning : $Q = K S_f^{1/2} = \left(\frac{1.49}{n} A R^{2/3}\right) S_f^{1/2}$

Formule de Chézy : $Q = K S_f^{1/2} = (C A R^{1/2}) S_f^{1/2}$

Formule de Darcy-Weisbach: $Q = K S_f^{1/2} = \left[\left(\frac{8gR}{f}\right)^{1/2} A\right] S_f^{1/2}$

Où :

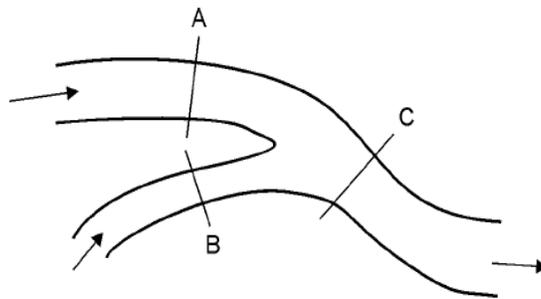
n, C, f = coefficients de rugosité de Manning, de Chézy et de Darcy-Weisbach, respectivement

g = l'accélération de la pesanteur

A = aire de la section

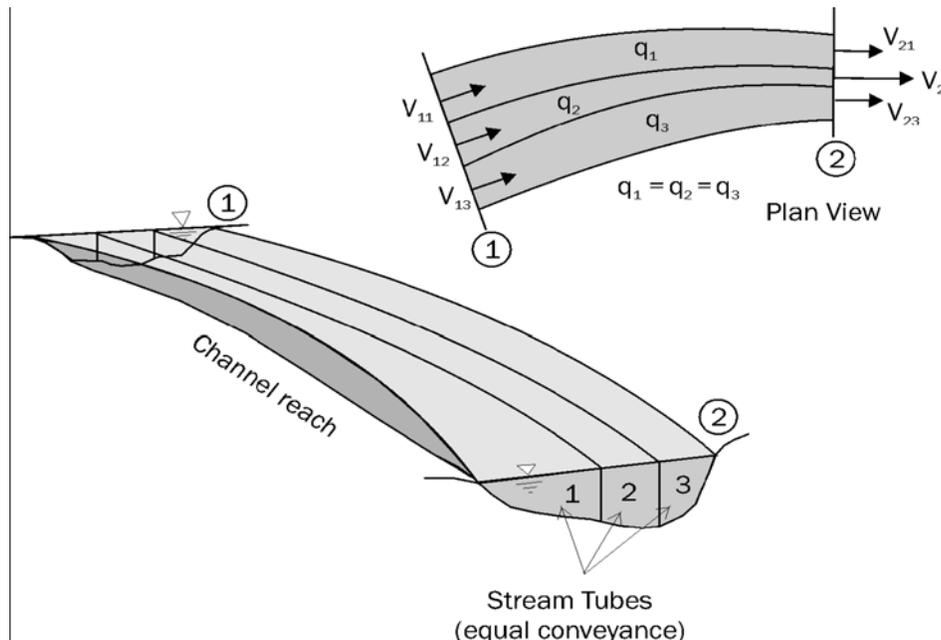
R = le rayon hydraulique

Des sections irrégulières peuvent être modélisées même si le tronçon de la rivière comporte plusieurs chenaux séparés par des îles ou des barres sableuses. Dans le cas d'une section avec des chenaux multiples, les variables liées à la géométrie de la section (aire, périmètre mouillé, rayon hydraulique, largeur au miroir) sont calculées pour chaque sous-chenal et les valeurs totales de la section représentent la somme des valeurs de chaque sous-chenal.



ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

GSTARS3 utilise le concept de tube de courant pour une modélisation quasi bidimensionnelle (2D) de la variation de la vitesse de l'écoulement à travers la section transversale de la rivière. Après les calculs des courbes de remous, le périmètre mouillé est subdivisé en des sections de débitance égale. Chaque section est considérée comme un tube de courant. Chaque tube de courant va transporter le même débit, mais les aires de ces tubes de courant n'ont pas nécessairement les mêmes valeurs et ont généralement des vitesses différentes. Par conséquent, on peut déterminer une vitesse moyenne pour chaque tube de courant et obtenir des vitesses moyennes différentes pour chaque partie de la section de la rivière.



4. Modèles sédimentaires de GSTARS3

Le transport sédimentaire se produit lorsque le débit dépasse une certaine limite et l'écoulement a la capacité de mettre en mouvement les particules du fond. Lorsque le fond de la rivière devient mobile, l'érosion ou la déposition peuvent alors être présentes. Ces changements du lit de la rivière dépendent de plusieurs paramètres, entre autres des conditions hydrauliques (telles que la vitesse et la profondeur), de la nature et de la composition du substrat (la granulométrie des particules qui constituent le lit) et les taux d'apport en sédiments.

ANNEXE 7 (suite). Description du modèle GSTARS.

GSTARS3 modélise le transport total sans distinction entre le transport en charge de fond et le transport en suspension. Le calcul du transport total est basé sur la résolution de l'équation d'Exner représentant un bilan de conservation de la matière solide. Cette approche est appliquée dans GSTARS3 au concept de tube de courant. Le modèle calcule les taux de transport solide par classe de granulométrie. Selon les conditions hydrodynamiques, certaines particules peuvent se déposer, alors que d'autres peuvent se mettre en mouvement. Le lit de la rivière peut être composé d'une ou de plusieurs couches. Le phénomène de pavage peut être pris en compte.

Les sables fins de diamètre plus petit ou égal à 62 microns de nature cohésive peuvent aussi être pris en compte par le modèle. La déposition et l'érosion des sédiments fins sont contrôlées par un ensemble de six paramètres empiriques spécifiés par l'utilisateur d'après des mesures *in situ* ou au laboratoire. Ces paramètres sont :

- le taux de cisaillement critique de déposition;
- le taux de cisaillement critique de l'érosion particulaire;
- le taux de cisaillement critique de l'érosion de masse;
- la pente de la courbe du taux d'érosion de masse;
- le taux d'érosion correspondant au seuil critique d'érosion de masse;
- le pourcentage d'argile dans le lit au-dessus duquel les taux d'érosion des graviers, des sables et des limons sont limités au taux d'érosion de l'argile.

D'autres paramètres relatifs à la mesure de la vitesse de chute de la matière cohésive sont requis.

Des contraintes naturelles à l'érosion du fond ou des berges, de même que des contraintes à la déposition des matières solides peuvent être spécifiées.

Une des caractéristiques de GSTARS3 est sa capacité de faire varier la forme de la section. En cas d'érosion globale, GSTARS3 ne creusera pas systématiquement la section pour enlever le volume requis. Il a également la possibilité d'élargir la section. Le choix entre ces deux alternatives est commandé par la minimisation d'une fonction de transfert d'énergie.

ANNEXE 7 (fin). Description du modèle GSTARS.

Références

MOLINAS, A. et YANG, C.T., 1985. *Generalized water surface profile computations*. J. of the Hydr. Div. ASCE, 111(HY3).

YANG C.T., TREVENO M.A. et SIMÕES F.J.M., 1998. *User's manual For GSTARS 2.0*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.

YANG C.T. et SIMÕES F.J.M., 2000. *User's manual For GSTARS 2.1*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.

YANG C.T. et SIMÕES F.J.M., 2002. *User's manual For GSTARS 3.0*. U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.

ANNEXE 8

Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine

ANNEXE 8. Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

1.0 Introduction

Cette note technique fournit plus de précisions sur la méthodologie et les calculs relatifs à la détermination des contraintes de frottement, aussi appelées les forces tractrices, au droit des principales frayères à saumon de la Romaine.

L'annexe 8a fournit les quelques définitions de base des termes utilisés dans les équations présentées dans cette note.

2.0 Contrainte de frottement (forces tractrices)

2.1 Contrainte de frottement

Les sédiments d'une rivière sont susceptibles d'être entraînés sous l'action des forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement. L'eau étant en mouvement, elle exerce sur les parois du chenal une contrainte de frottement τ_0 (appelée aussi force tractrice).

Pour un écoulement uniforme dans un canal, la force de gravité est en équilibre avec la force de frottement. Dans ce cas, la contrainte de frottement τ_0 est fonction du poids volumique γ_w de l'eau, du rayon hydraulique R_h et de la pente du canal S_f :

$$\tau_0 = \gamma_w (A/P) S_e = \gamma_w R_h S_f$$

où A est la section mouillée et P est le périmètre mouillé. Lors d'un écoulement permanent **non uniforme**, la contrainte de frottement moyenne sur la section est donnée par :

$$\tau_0 = \gamma_w R_h S_e$$

où S_e est la pente d'énergie. La contrainte de frottement pour une section large (comme dans la rivière Romaine) est :

$$\tau_0 = \gamma_w h S_e$$

où h est la profondeur dans le canal. C'est uniquement dans le cas particulier d'un écoulement uniforme que la pente du fond S_f est égale à la pente d'énergie S_e . Les écoulements dans une rivière sont essentiellement non uniformes.

2.2 Méthode de calcul de la pente d'énergie S_e

La perte d'énergie entre deux sections consécutives est le résultat d'une perte de charge entre ces deux sections (figure A8-1).

ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

La perte de charge entre deux sections h_e est due aux singularités et au frottement et se définit comme suit :

$$h_e = L \cdot S_f + C \left| \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right|$$

où L est la distance entre les deux sections, S_f la pente de frottement et C le coefficient de contraction ou d'expansion.

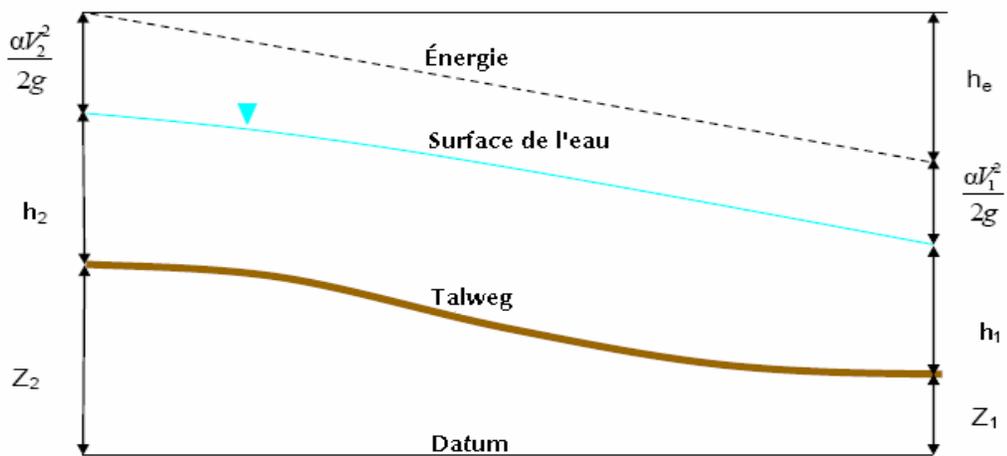


Figure A8-1. Paramètres utilisés pour le calcul de la pente d'énergie entre deux sections.

Dans un cours d'eau naturel, les coefficients de contraction et d'expansion sont de l'ordre de 0,1 à 0,3.

La pente de frottement :

$$S_f = \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}} \right)^2$$

La pente d'énergie est alors obtenue en divisant la perte de charge par la distance entre deux sections :

$$S_e = \frac{h_e}{L}$$

En somme, la pente d'énergie est fonction de la géométrie du canal du débit ainsi que du coefficient de Manning et des coefficients de contraction et d'expansion.

ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (force tractrice) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

2.3 Contrainte de frottement critique

Sur un lit uniforme de rivière (granulométrie uniforme), au seuil de mise en mouvement, la contrainte de frottement tractrice devient la contrainte limite ou la contrainte critique τ_c qui correspond au début d'entraînement. Cette contrainte critique est donnée par :

$$\tau_c = \tau \cdot (\gamma_s - \gamma_w) D$$

où γ_s est le poids volumique spécifique des grains solides, D est le diamètre du grain et le paramètre adimensionnel τ est classiquement appelé paramètre de Shields. Or, $\tau_o = \gamma_w R_h S_e$. Le paramètre de Shields défini ci-dessus s'écrit donc :

$$\tau_* = \frac{\gamma_w R_h S_e}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot D}$$

2.4 Équations utilisées pour le calcul des contraintes de frottement

2.4.1 Shields

Shields (1936) a développé la relation entre la contrainte de frottement adimensionnelle τ_* (paramètre de Shields) et le nombre de Reynolds des particules R_{e*} , ce qui conduit au diagramme de Shields. À noter que les travaux de Shields ont été largement utilisés par la communauté scientifique. Cependant, la détermination de la contrainte de frottement critique τ_{*c} doit être effectuée par approximations successives. Pour contrer ce problème, plusieurs scientifiques ont élaboré des relations explicites, basées sur les travaux de Shields.

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D}$$

$$R_{e*} = \frac{u_* \cdot D}{\nu}$$

2.4.2 Yalin

Yalin (1972) propose l'utilisation du paramètre de Shields τ_* en fonction du diamètre adimensionnel D_* . Ceci mène au diagramme Shields-Yalin (Graf, 2000, figure 3.13).

$$D_* = D_{50} \cdot \left[(G - 1) \cdot \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

Le diagramme de Shields-Yalin (figure A8-2) peut être approximé à partir des quatre équations suivantes (Julien, 1998, p. 117) qui sont fonction du diamètre adimensionnel D_* et de l'angle de repos ϕ :

$\tau_{*c} = 0,5 \cdot \tan \phi$	lorsque	$D_* < 0,3$
$\tau_{*c} = 0,25 \cdot D_*^{-0,6} \cdot \tan \phi$	lorsque	$0,3 < D_* < 19$
$\tau_{*c} = 0,013 \cdot D_*^{0,4} \cdot \tan \phi$	lorsque	$19 < D_* < 50$
$\tau_{*c} = 0,06 \cdot \tan \phi$	lorsque	$D_* > 50$

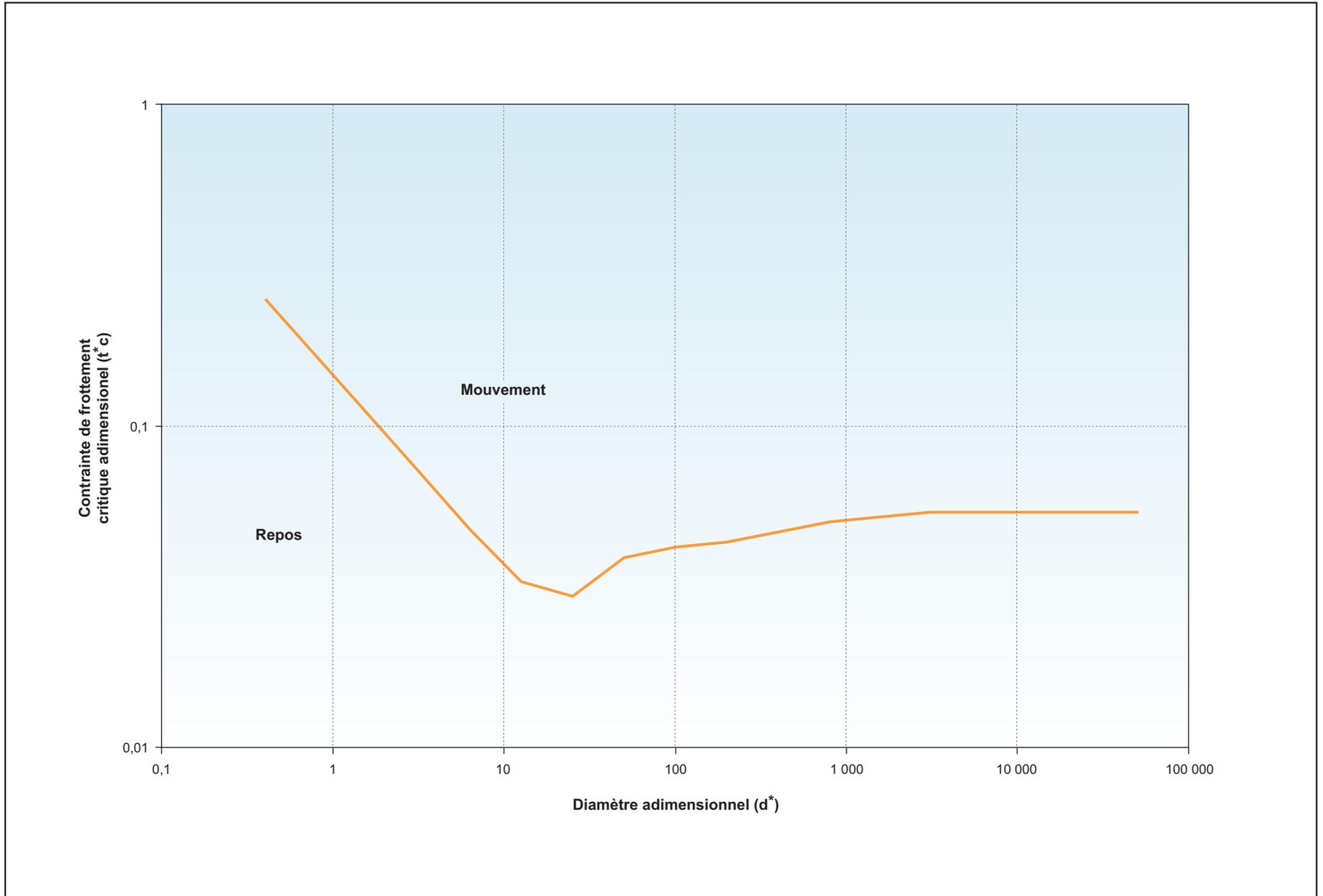
Pour les écoulements turbulents, la contrainte de frottement critique devient proportionnelle au diamètre du grain (Julien, 1998, p. 117). Ceci permet de déterminer la contrainte de frottement critique en fonction du D50 (tableau A8-1).

Tableau A8-1. Contrainte de frottement critique en fonction du D50^a.

D50 (mm)	D. (-)	ϕ (degré)	τ_{*c} (-)	τ_c (N/m ²)
2 048	51 800	42	0,054	1 790
1 024	25 900	42	0,054	895
512	12 950	42	0,054	447
256	6 475	42	0,054	223
128	3 235	42	0,054	111
64	1 620	41	0,052	53
32	810	40	0,050	26
16	404	38	0,047	12
8	202	36	0,044	5,7
4	101	35	0,042	2,71
2	50	33	0,039	1,26
1	25	32	0,029	0,47
0,5	12,5	31	0,033	0,27
0,25	6,3	30	0,048	0,194
0,125	3,2	30	0,072	0,145
0,0625	1,6	30	0,109	0,110

a Extrait du tableau 7.1 de Julien (1998).

Figure A8-2 Diagramme de Shields-Yalin d'après les équations de Julien (1998)



ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

2.4.3 Équation de transport de Duboys

Julien (1998) présente l'équation de transport de Duboys (1879) pour effectuer le calcul de la contrainte de frottement critique (lorsque le transport de sédiments q_s est nul). À noter que les unités de τ_c et D s'expriment respectivement en lb/pi et en mm. Pour obtenir une valeur de τ_c en N/m^2 , τ_c exprimée en lb/ft doit être multipliée par 47,88026.

$$\tau_c = 0,0125 + 0,019 \cdot D$$

2.4.4 Équation de transport de Meyer-Peter et Müller

Simons et Sentürk (1992) présentent l'équation de transport développée par Meyer-Peter et Müller (1948). La contrainte de frottement critique est obtenue lorsque le transport de sédiments est nul (donc $q_s = 0$) :

$$\tau_c = 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot D$$

2.4.5 Équation de Guo

Guo (1990) propose une équation empirique pour représenter le diagramme de Shields en fonction du diamètre adimensionnel D_* :

$$\tau_{*c} = \frac{0,23}{D_*} + 0,054 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D_*^{0,85}}{23}\right) \right]$$

2.4.6 Équation de Krey

L'équation de Krey (Garde et Ranga Raju, 1978) est une équation empirique qui permet de déterminer la contrainte de frottement critique en fonction du D_{50} (exprimé en mm) et de la densité G :

$$\tau_c = (G - 1) \cdot \frac{D}{13}$$

2.4.7 Modèle d'Iwagaki

Le modèle d'Iwagaki (MIKE 11, 2004) a développé une relation entre la vitesse de frottement et le diamètre des grains. La vitesse de cisaillement critique est obtenue lorsque le transport de sédiments est nul.

ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

$$u_{f,c}^2 = \begin{cases} 226d & d < 0.0065 \\ 8.41d^{11/32} & 0.0065 \leq d < 0.0565 \\ 55.0d & \text{quand } 0.0565 \leq d < 0.118 \\ 134.6d^{31/32} & 0.118 \leq d < 0.303 \\ 80.9d & 0.303 \leq d \end{cases}$$

$$\tau_c = \rho \cdot u_{f,c}^2$$

2.5 Contrainte de frottement critique sur les berges d'un canal

L'équation de Lane (Julien, 1998, page 127) est utilisée pour déterminer la contrainte de frottement critique sur les berges d'un canal $\tau_{\theta c}$. Cette équation est fonction de l'angle de la pente de la berge par rapport à l'horizontal θ et de l'angle de repos du sédiment ϕ .

$$\frac{\tau_{\theta c}}{\tau_c} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}}$$

Le tableau A8-1 peut être consulté pour déterminer l'angle de repos pour différents D50 constituant le lit de la rivière.

3.0 **Contrainte de frottement critique**

D'après les résultats de contrainte de frottement critique (tableau A8-2) obtenus à partir des équations de la section 2.4, les équations de Julien (1998) sont retenues. Ces équations sont simples d'approche et sont basées sur le diagramme de Shields largement utilisé dans la pratique (dans les modèles HEC-RAS et MIKE 11).

Les valeurs de τ_c obtenues à partir du tableau de Julien (1998), des équations de Julien (1998) et de Guo (1990) sont toutes similaires et proviennent toutes du diagramme de Shields (1936). Ces valeurs sont donc toutes acceptables. Du même ordre de grandeur que τ_c , les équations de transport de Meyer-Peter et Müller (1992) et de Duboys (1879) donnent des résultats acceptables. Par contre, l'équation de Krey (Garde et Ranga Raju, 1978) donne des valeurs de τ_c bien différentes des autres équations. La figure A8-3 illustre les résultats obtenus par les différentes équations.

À titre indicatif, la granulométrie typique d'une frayère à saumon atlantique est composée d'un peu de sables (< 2 mm), majoritairement de graviers et de cailloux (entre 2 et 64 mm) et de galets (entre 64 et 128 mm). Les valeurs de τ_c pour cette granulométrie varient entre 1 et 112 N/m² (tableau A8-2).

ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

Tableau A8-2. Contrainte de frottement critique pour une granulométrie uniforme.

D ₅₀ (mm)	Contrainte de frottement critique τ_c (N/m ²)					
	D'après Julien (1998)	D'après tableau Julien (1998)	D'après Duboys (1879)	D'après Meyer-Peter et Müller (1992)	D'après Guo (1990)	D'après Krey (Garde et Ranga Raju, 1978)
2 048	1 790,90	1 790,00	1 863,72	1 558,05	1 790,24	259,94
1 024	895,45	895,00	932,16	779,02	895,20	129,97
512	447,73	447,00	466,38	389,51	447,67	64,98
256	223,86	223,00	233,49	194,76	223,91	32,49
128	111,93	111,00	117,04	97,38	112,03	16,25
64	54,03	53,00	58,82	48,69	56,09	8,12
32	26,08	26,00	29,71	24,34	28,12	4,06
16	12,14	12,00	15,15	12,17	14,12	2,03
8	5,64	5,70	7,88	6,09	7,01	1,02
4	2,72	2,71	4,24	3,04	3,26	0,51
2	1,26	1,26	2,42	1,52	1,38	0,25
1	0,48	0,47	1,51	0,76	0,58	0,13
0,5	0,27	0,27	1,05	0,38	0,28	0,06
0,25	0,19	0,19	0,83	0,19	0,19	0,03
0,125	0,15	0,15	0,71	0,10	0,16	0,02
0,0625	0,11	0,11	0,66	0,05	0,15	0,01

Les contraintes de frottement critique sur une pente d'une berge pour différentes inclinaisons sont présentées au tableau A8-3 et à la figure A8-4. De façon générale, plus l'angle θ est élevé, plus la contrainte de frottement critique est réduite. Le sédiment localisé sur la pente d'une berge nécessite une contrainte de frottement moins élevée pour être mis en mouvement que celui sur un fond plat.

Tableau A8-3. Contrainte de frottement critique avec un angle θ .

D ₅₀ (mm)	ϕ (degré)	θ (degré)						
		τ_c (N/m ²) ^a	5	10	15	20	25	30
2 048	42	1790,90	1775,64	1729,54	1651,50	1539,27	1388,49	1190,15
1 024	42	895,45	887,82	864,77	825,75	769,64	694,24	595,08
512	42	447,73	443,91	432,39	412,88	384,82	347,12	297,54
256	42	223,86	221,96	216,19	206,44	192,41	173,56	148,77
128	42	111,93	110,98	108,10	103,22	96,20	86,78	74,38
64	41	54,03	53,55	52,10	49,65	46,11	41,33	34,98
32	40	26,08	25,84	25,11	23,87	22,08	19,65	16,39
16	38	12,14	12,02	11,65	11,02	10,09	8,83	7,08
8	36	5,64	5,58	5,39	5,07	4,59	3,92	2,97
4	35	2,72	2,69	2,59	2,43	2,18	1,84	1,33
2	33	1,26	1,25	1,20	1,11	0,98	0,80	0,50
1	32	0,48	0,47	0,45	0,42	0,37	0,29	0,16
0,5	31	0,27	0,26	0,25	0,23	0,20	0,15	0,06
0,25	30	0,19	0,19	0,18	0,17	0,14	0,10	0,00
0,125	30	0,15	0,14	0,14	0,13	0,11	0,08	0,00
0,0625	30	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06	0,00

a Valeurs de τ_c d'après Yalin (1972).

Figure A8-3 Comparaison des modèles mathématiques pour le début de mise en mouvement des grains

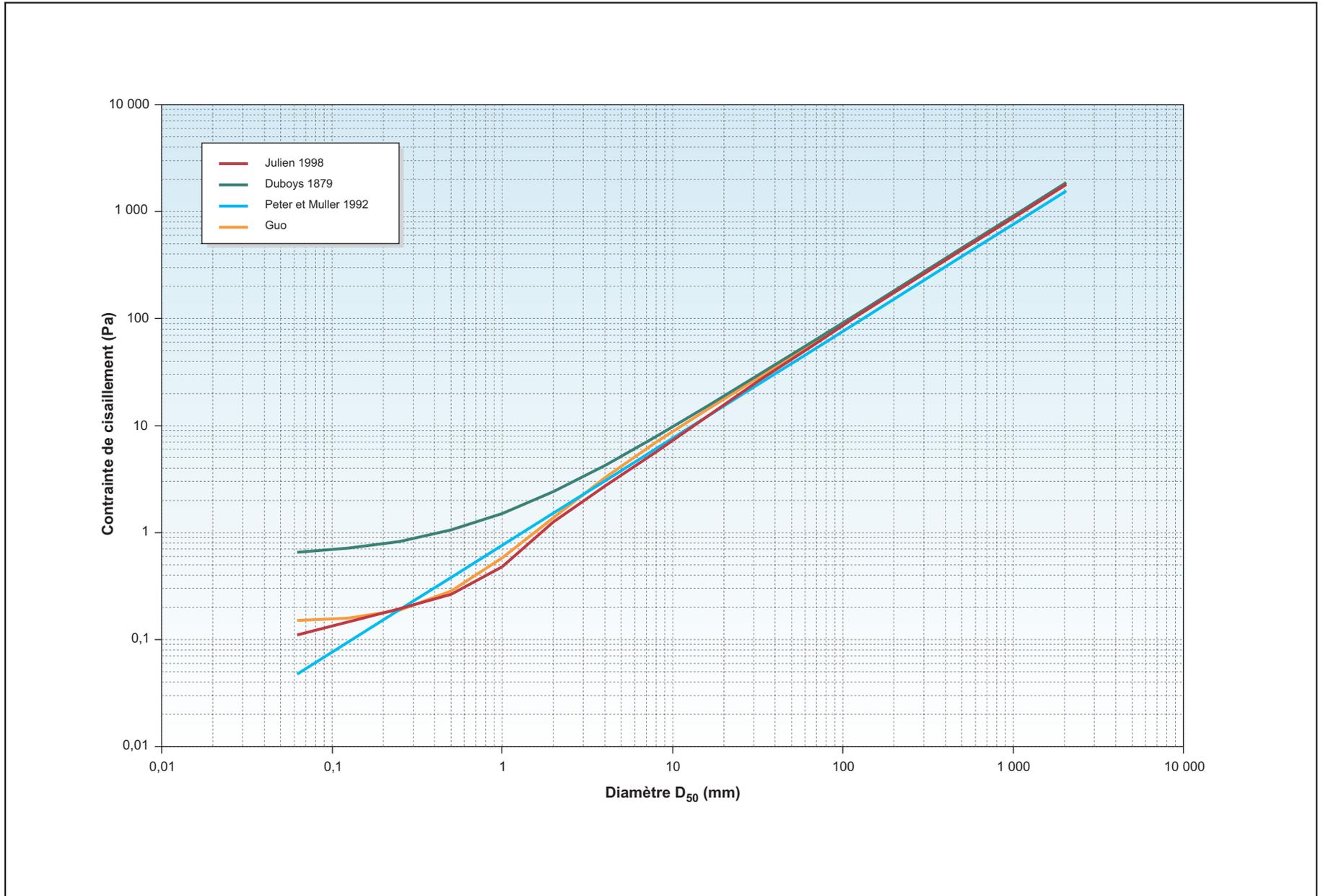
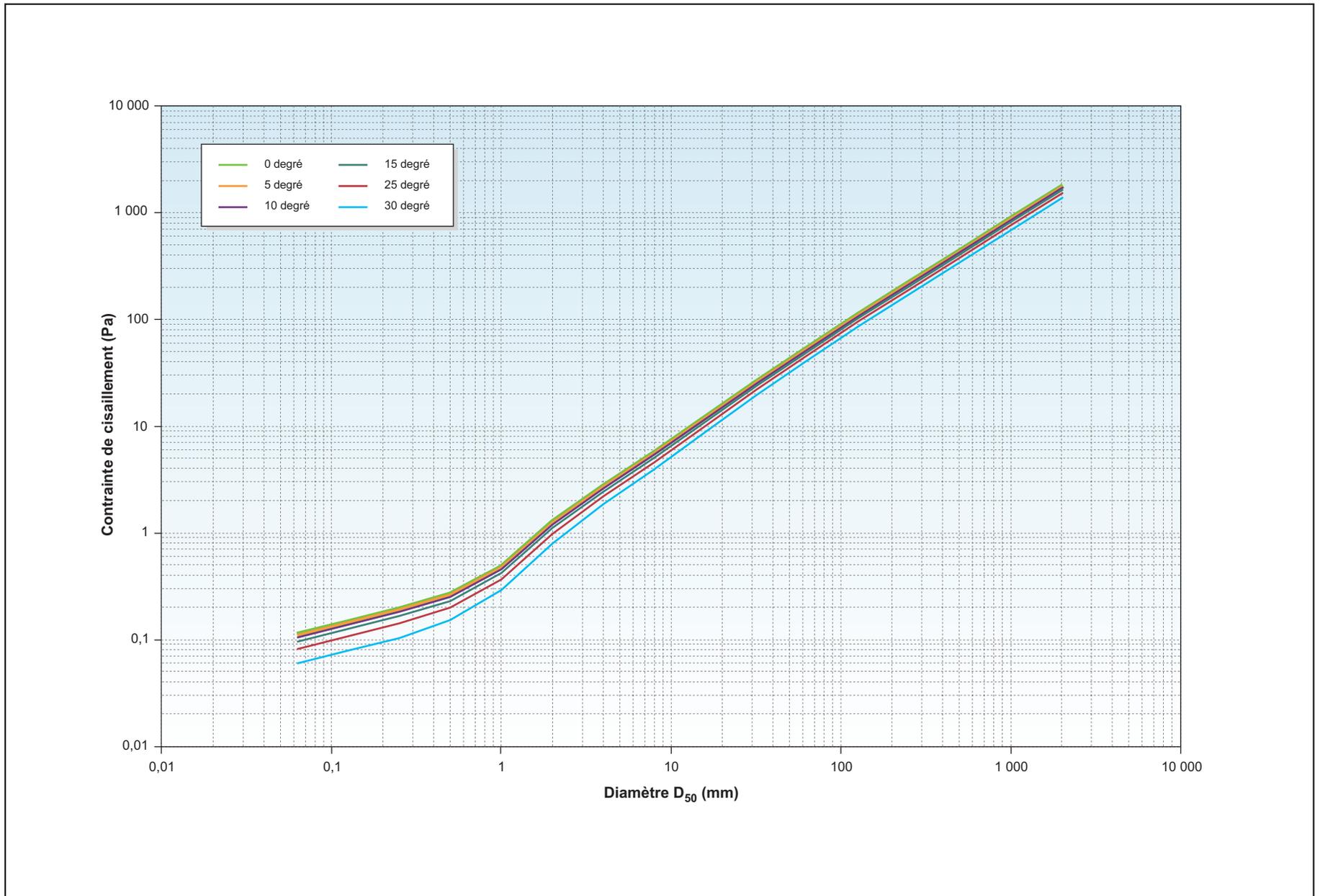


Figure A8-4 **Contrainte de frottement critique sur une berge en fonction de l'inclinaison**



ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

3.1 Contrainte de frottement critique sur les frayères de la rivière Romaine

Les valeurs de τ_c ont été calculées pour les différents D50 associés à la granulométrie des frayères aux PK 34,5, 46 et 49 de la Romaine (tableau A8-4). La plupart des recherches réalisées sur les contraintes de frottement ont été effectuées sur un lit dont la granulométrie est uniforme. Pour tenir compte d'un lit non uniforme, Simons et Sentürk (1992, p. 385) suggèrent d'utiliser le D50 pour effectuer les calculs de contrainte de frottement.

Tableau A8-4. Valeurs du D50 des frayères et de leurs τ_c respectives selon Julien (1998).

Frayère (PK)	D50 (mm)	D*	θ (degré)	τ_{*c} (-)	τ_c (N/m ²)
34,5	35	885,36	40	0,050	28,52
46	18	455,33	38	0,047	13,66
49	50	1264,80	41	0,052	42,21

3.2 Contrainte de frottement sur les frayères

Les résultats de contrainte de frottement τ_0 (tableau A8-5 et figures A8-5 à A8-7) ont été déterminés à partir du modèle HEC-RAS de la rivière Romaine (GENIVAR, 2004). Chaque valeur présentée est une moyenne de τ_0 effectuée sur trois sections transversales (valeur dans le chenal) du modèle à proximité de la frayère. Également, pour chaque valeur de τ_0 présentée dans le tableau, le D50 déplacé par la contrainte de frottement a été calculé d'après Julien (1998).

Tableau A8-5. Contrainte de frottement pour différentes périodes de retour.

Récurrence e (année)	Q (m ³ /s)	PK 34,5			PK 46			PK 49		
		τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_e (m/m)	τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_e (m/m)	τ_0 (N/m ²)	D50 déplacé (mm)	S_e (m/m)
2	1 523	5,4	8	$1,0 \times 10^{-4}$	1,4	2	$2,5 \times 10^{-5}$	32,2	40	$5,8 \times 10^{-4}$
5	1 883	6,3	9	$1,0 \times 10^{-4}$	1,3	2	$2,3 \times 10^{-5}$	34,3	42	$5,7 \times 10^{-4}$
10	2 077	6,7	9	$1,1 \times 10^{-4}$	1,3	2	$2,2 \times 10^{-5}$	35,3	43	$5,4 \times 10^{-4}$
40	2 381	7,3	10	$1,1 \times 10^{-4}$	1,4	2	$2,1 \times 10^{-5}$	36,6	45	$5,1 \times 10^{-4}$
100	2 549	7,5	10	$1,1 \times 10^{-4}$	1,4	2	$2,1 \times 10^{-5}$	37,3	44	$4,9 \times 10^{-4}$
1 000	2 906	8,3	12	$1,1 \times 10^{-4}$	1,4	2	$2,0 \times 10^{-5}$	38,6	46	$4,6 \times 10^{-4}$
10 000	3 205	9,0	12	$1,1 \times 10^{-4}$	1,4	2	$1,9 \times 10^{-5}$	39,8	47	$4,5 \times 10^{-4}$

Figure A8-5 **Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 34,5**

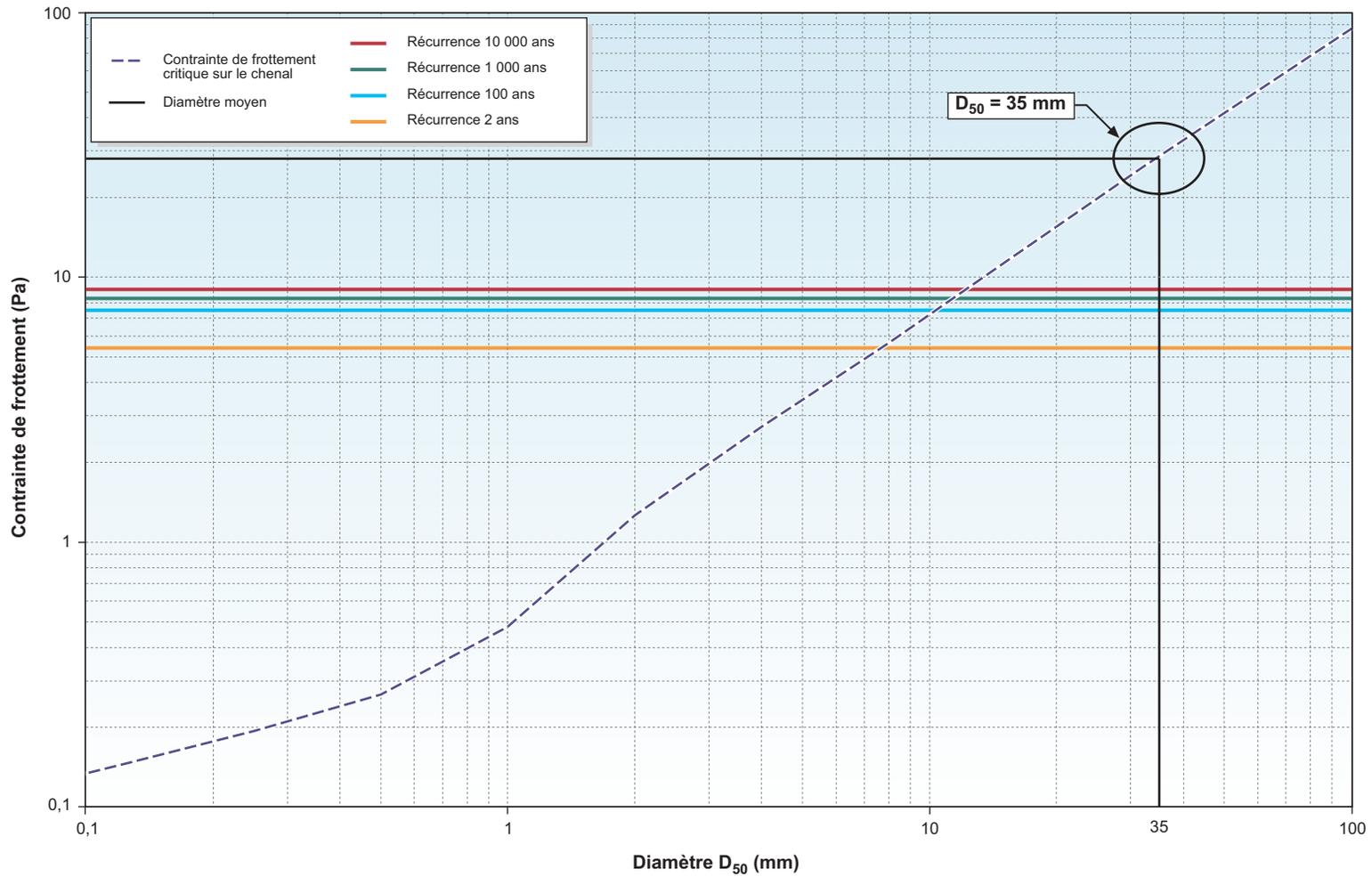


Figure A8-6 **Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 46**

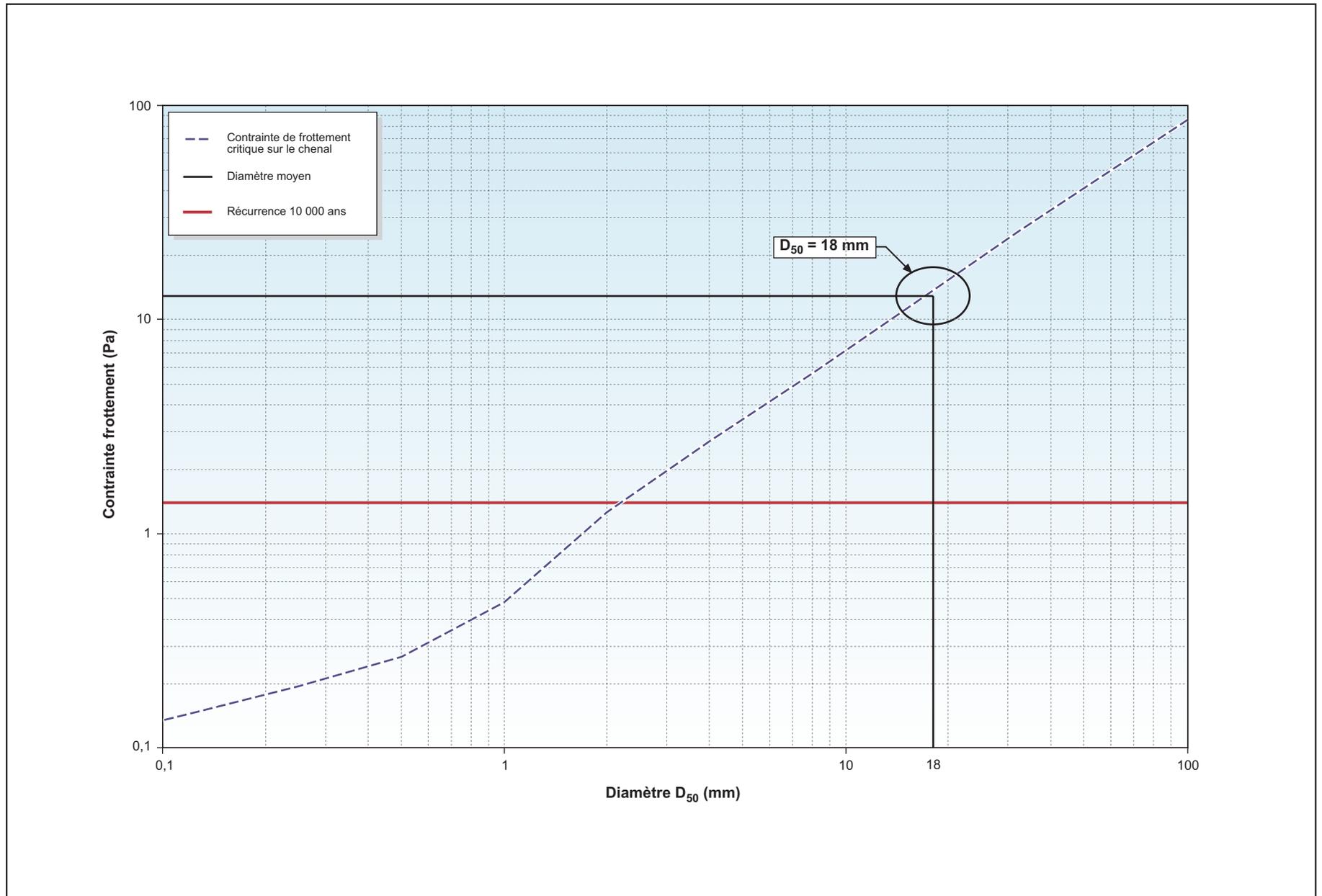
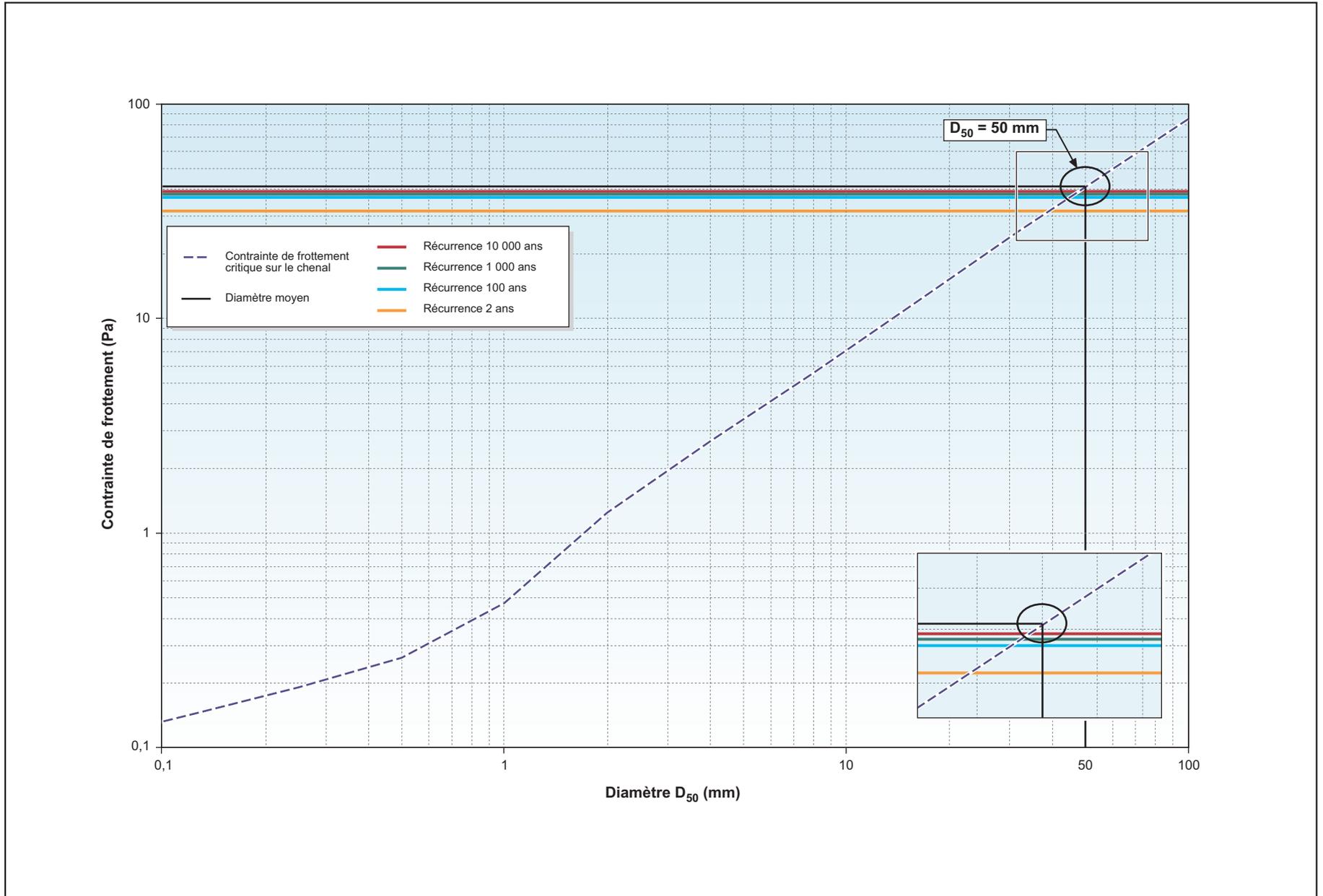


Figure A8-7 **Contrainte de frottement en fonction du diamètre à la frayère du PK 49**



ANNEXE 8 (suite). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

Dans les cas qui nous intéressent, les résultats HEC-RAS montrent que la contrainte de frottement augmente avec le débit pour les PK 34,5 et 49, tandis qu'on observe une certaine constance au PK 46.

Comme exposé précédemment, la contrainte de frottement est fonction du rayon hydraulique et de la pente d'énergie. Puisque pour chaque frayère le rayon hydraulique croît avec le débit, la pente d'énergie est alors le facteur qui détermine si la contrainte de frottement augmente, diminue ou reste constante quand le débit augmente.

Au PK 46, puisque la pente d'énergie décroît approximativement au même taux que le rayon hydraulique croît, la contrainte de frottement reste relativement constante.

3.4 Conclusion

Il appert que le D50 de chaque frayère (tableau A8-4) est supérieur à celui déplacé par la contrainte de frottement (tableau A8-5). Par conséquent, le substrat des frayères au PK 34,5, 46 et 49 de la rivière Romaine est stable pour les récurrences de 10 000 ans et moins.

4.0 **Références**

- DUBOYS, M.P., 1879. *Études du régime du Rhone et de l'action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouillable*. Annales de Ponts et Chaussées, Sec. 5, Volume 18, p. 141-195.
- GARDE, R.J. et RANGA RAJU, K.G., 1978. *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. Wiley Eastern Limited. India.
- GENIVAR, 2004. *Rivière Romaine. Modélisation hydrodynamique 1D entre les PK 0 et 192*. Rapport du Groupe-conseil GENIVAR inc. à Hydro-Québec Production, Direction Aménagement de production, Hydraulique et Géotechnique. 95 p. et annexes.
- GRAF, W.H., 2000. *Hydraulique fluviale – Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. Traité de génie civil. Volume 16. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne. 627 p.
- GUO, J., 1990. *Basic laws of sediment transport*. Technical report, Shanxi Provincial Natural Science Foundation, Taiyuan, Shanxi Province, China.
- JULIEN, P. Y., 1998. *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press. New York. 280 p.

ANNEXE 8 (fin). Détermination des contraintes de frottement (forces tractrices) au droit des frayères à saumon de la rivière Romaine.

MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R., 1948. *Formula for bed load transport*. Proceedings 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Research, Stockholm. p. 39-64.

MIKE 11, 2004. *A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual*. DHI software, Water and environment.

SHIELDS, A., 1936. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und Turbulenz forschung auf die Geschiebewegung*. Berlin: Mitteilungen der Preussische Versuchanstalt für Wasserbau und Schiffbau. N° 26.

SIMMONS, D.B. et SENTÜRK, F., 1992. *Sediment transport technology – Water and sediment dynamics*. Water resources publications. Chelsea. 897 p.

WHITE, W.R. et DAY, T.J., 1982. *Transport of graded gravel bed material*. Dans : *Gravel-Bed Rivers*, R.D. Hey et coll. Wiley. New York.

YALIN, M.S., 1972. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press. Oxford, GB.

ANNEXE 8a

Définitions de base

ANNEXE 8a. Définitions de base.

Tableau A8a-1. Définitions de base.

Terme français	Terme anglais	Équation ou symbole
Contrainte de frottement	Shear stress	$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot S_e$
Contrainte de frottement critique	Critical shear stress	τ_c
Contrainte de frottement adimensionnelle / paramètre de Shields	Shields parameter	$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D}$
Contrainte de frottement adimensionnelle critique	Critical value of Shields parameter	τ_{*c}
Diamètre adimensionnel	Dimensionless particule diameter	$D_* = D_{50} \cdot \left[(G-1) \cdot \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3}$
Nombre de Reynolds des particules	Grain Shear Reynolds number	$R_{e*} = \frac{u_* \cdot D}{\nu}$
Rayon hydraulique	Hydraulic radius	$R_h = A/P$
Pente de fond du canal	Bed slope	$S_f = -\Delta z / \Delta x$
Vitesse de frottement	Shear velocity	$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$
Viscosité cinématique de l'eau à 20 °C	kinematic viscosity	$\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$
Masse volumique du quartz	Mass density	$\rho_s = 2650 \text{ kg} / \text{m}^3$
Masse volumique de l'eau	Mass density of water	$\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$
Poids volumique	Spécifique weight	$\gamma_s = \rho_s \cdot g = 26 \text{ kN} / \text{m}^3$
Poids volumique de l'eau	Spécifique weight	$\gamma = \rho \cdot g = 9,81 \text{ kN} / \text{m}^3$
Densité	Specific gravity	$G = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2,65$
Poids volumique déjaugé	Submerged specific weight	$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma = 16,19 \text{ kN} / \text{m}^3$
Diamètre des particules au point sur la courbe granulométrique où le pourcentage passant est de 50 %	Median diameter	D_{50}

