

Université du Québec
INRS-Eau, Terre & Environnement

**Caractérisation géochimique et hydrogéochimique de la
matière en suspension de la rivière Saint-Charles, Québec,
Canada**

Par
Pascale Collin

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en Sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Examineur interne

Mario Bergeron, Ph.D.
Université du Québec
INRS-ETE

Examineur externe

Christian Gagnon, Ph.D.
Centre Saint-Laurent,
Environnement Canada

Directeur de recherche

Marc Richer-LaFlèche, Ph.D.
Université du Québec
INRS-ETE

Codirecteure de recherche

Andrée Bolduc, Ph.D.
Commission géologique du
Canada, Ressources
naturelles Canada



Résumé

La charge sédimentaire en suspension dans la colonne d'eau de la rivière Saint-Charles provient principalement de l'érosion du substrat rocheux, des formations quaternaires et des berges. De plus, la dégradation forestière, les rejets urbains et industriels et la pollution atmosphérique contribuent significativement à cette charge sédimentaire.

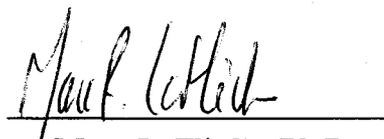
Cette recherche tente de déterminer la provenance et l'origine de la matière en suspension (MES) transporté par les eaux de la rivière Saint-Charles en évaluant leur signature géochimique en métaux trace et terres rares (TR). De plus, elle tente de déterminer les processus géochimiques et hydrogéochimiques présents dans les eaux de la rivière Saint-Charles et d'évaluer l'importance de l'influence des différentes provinces géologiques sur la signature géochimique de la MES de la rivière Saint-Charles.

On observe une dynamique distincte du Fe et du Mn, entre l'automne (novembre 2000) et le printemps (mai 2001). L'enrichissement en oxyhydroxides de fer et de manganèse des particules de MES, probablement non-détritiques, suggère un apport en eaux souterraines (milieu réducteur) dans la section de la rivière située entre 17 kilomètres et 40 kilomètres de l'amont. Dans cette section, on évalue que les revêtements de fer-manganèse sur les particules de MES au mois de novembre 2000 sont présents dans une proportion variant entre 40 % et 80 %. À cette période, les autres échantillons de MES, provenant des autres sections de la rivière, montrent la présence de moins de 30 % de revêtements d'oxyhydroxides. L'effet d'adsorption des TR dissoutes sur les revêtements d'oxyhydroxides de fer et de manganèse est particulièrement présent entre 20 et 40 kilomètres de l'amont. De plus, les coefficients de partage plus élevés en novembre 2000 qu'en mai 2001 montrent que les TR sont fortement associées à la phase particulaire et appauvrie et à la phase dissoute de l'eau de la rivière.

Des trois provinces géologiques présentes dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles, les formations géologiques associées à la province géologique du Grenville influencent le plus les concentrations en TR mesurées dans la MES de la partie amont et centrale de la rivière, probablement dû à la présence des formations granitiques et gneissiques riches en TR de la section amont et du dénivelé de la rivière dans cette section qui favorise l'érosion. L'influence de l'érosion des unités la Plate-forme du Saint-Laurent semble négligeable dans cette rivière aux mois de novembre 2000 et de mai 2001 en raison du faible débit de la rivière, du faible dénivelé et d'un faible taux d'érosion des berges dans cette section.


Pascale Collin, B. Sc.

Étudiante graduée


Marc LaFlèche, Ph.D.
Directeur de recherche



Remerciements

Je dédis ce mémoire à mes parents pour leurs encouragements, leurs générosités incroyables et leurs présences constantes dans ma vie tout au long des tumultueux périples!

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Marc LaFlèche pour sa compétence professionnelle, ses encouragements et ses judicieux conseils tout au long de cette étude. De plus, sa grande compréhension m'a permis d'acquérir de l'expérience de travail dans divers milieu de recherche tout au long de la rédaction de ce mémoire. Je tiens à remercier ma co-directrice Andrée Bolduc pour sa présence, son soutien moral et son sens critique très développé qui m'a beaucoup appris. Je tiens à remercier la participation du Laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec pour leurs contributions aux analyses d'eau. Merci aussi au membre de l'équipe technique du laboratoire de l'INRS-ETE pour leur expertise et leur sens de l'humour que j'ai beaucoup apprécié.

Je m'en voudrais d'oublier certains ami(e)s que je côtoie depuis longtemps et qui ont contribué à leur façon à ce mémoire : soit en m'aidant pour échantillonner, soit en m'offrant résidence dans leur demeures, soit en me soutenant moralement. Merci d'être là!



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xv
INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE	1
2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE : MILIEU PHYSIQUE	3
2.1 Caractérisation des principaux tributaires de la rivière Saint-Charles.	3
2.1.1 Débits de la rivière Saint-Charles et de ses principaux tributaires.	4
2.1.2 Apports sédimentaires à la rivière Saint-Charles.	7
2.1.3 Occupation du territoire.	7
2.2 Géologie.	8
2.2.1 Provinces géologiques.	8
2.2.2 Formations superficielles.	11
2.3 Couvert forestier et climat.	12
2.3.1 Considérations générales.	12
2.3.2 Le bassin versant de la rivière Saint-Charles.	13
2.4 Subdivision de la rivière Saint-Charles.	13
2.4.1 La haute Saint-Charles.	14
2.4.2 La moyenne Saint-Charles.	14
2.4.3 La basse Saint-Charles.	15
2.5 Problématique environnementale de la rivière Saint-Charles.	16
2.6 Zones de remblai et industries bornant la rivière Saint-Charles.	18
2.6.1 Zones de remblai.	18

2.6.2	Industries.	19
3	REVUE DE LITTÉRATURE	21
3.1	Les terres rares et les métaux traces.	22
3.1.1	Les terres rares.	22
3.1.1.1	Le cérium.	24
3.1.1.2	L'euporium.	25
3.1.1.3	Solubilité des terres rares.	25
3.1.1.4	Les réservoirs de référence.	27
3.1.2	Les métaux traces.	29
3.2	La matière en suspension.	32
3.2.1	La constitution de la matière en suspension.	31
3.2.2	La granulométrie.	32
3.3	L'adsorption.	33
3.4	Études menées sur la rivière Saint-Charles.	36
3.5	Eaux usées urbaines.	36
3.5.1	Rejets des eaux usées urbaines dans la rivière Saint-Charles.	38
3.5.2	Composition générale des eaux usées domestiques.	39
4	MÉTHODOLOGIE	39
4.1	Échantillonnage.	39
4.1.1	Localisation des stations d'échantillonnage.	39
4.1.2	Fréquence d'échantillonnage.	39
4.1.3	Décontamination de l'équipement	39
4.2	Méthode de prélèvement dans la rivière Saint-Charles	40
4.2.1	Période d'étiage.	40
4.2.2	Période de crue printanière.	41
4.3	Méthode de prélèvement des échantillons de formations superficielles et de sédiments de rivière.	41
4.4	Traitement des échantillons.	42
4.4.1	Filtration et prises des données physico-chimiques.	42

4.4.1.1	Fraction particulaire.	42
4.4.1.2	Fraction dissoute.	43
4.4.2	Paramètres physico-chimiques.	43
4.5	Dosage analytique.	44
4.5.1	Métaux dissous.	44
4.5.2	Carbone organique et inorganique dissous.	46
4.5.3	Les anions.	46
4.5.4	Métaux particuliers.	47
4.5.6	Matière en suspension.	47
4.6	Granulométrie.	48
4.7	Diffraction-X.	48
4.8	Microscope électronique à balayage (MEB).	48
4.9	Contrôle qualité.	49
4.10	Blanc analytique.	50
5	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	51
5.1	Débits et données météorologiques.	51
5.1.1	Débits.	53
5.1.2	Température et précipitation.	52
5.2	Concentration de la matière en suspension.	55
5.3	pH, conductivité, alcalinité et dureté des eaux de la rivière Saint-Charles.	57
5.3.1	Mesures ponctuelles.	57
5.3.2	Mesures annuelles.	60
5.4	Ions chlorures et sulfates.	62
5.5	Carbone inorganique dissous (COD) et inorganique dissous (CID).	64
5.6	Observations physiques de la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	66
5.6.1	Observation au microscope électronique à balayage (MEB).	66

5.7	Éléments majeurs dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	71
5.7.1	Les oxydes.	71
5.8	Les éléments traces dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	72
5.9	Granulométrie des échantillons de formations superficielles et de sédiments du lit de la rivière Saint-Charles.	73
5.10	Diffraction-X.	75
5.11	Éléments majeurs dissous dans la rivière Saint-Charles.	79
6	DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	79
6.1	Les éléments majeurs présents dans la matière en suspension.	79
6.1.1	Normalisation des concentrations des éléments majeurs au TiO ₂ et variation en fonction de la distance.	81
6.1.2	Normalisation des concentrations par rapport aux valeurs de la croûte terrestre continentale supérieure (UCC).	83
6.2	Présentation des éléments traces dans la MES de la rivière Saint-Charles pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et mai 2001.	88
6.2.1	Les métaux alcalins.	89
6.2.2	Les métaux alcalino-terreux.	90
6.2.3	Les HFSE (High field element).	90
6.2.4	Les métaux de transition.	90
6.2.5	Les terres rares.	92
6.2.5.1	Anomalies en europium de la MES de la rivière Saint-Charles.	101
6.2.5.2	Anomalies en cérium de la MES de la rivière Saint-Charles.	103
6.2.5.3	Sommation des abondances en TR légères et TR lourdes dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	108
6.3	Caractéristiques chimiques des échantillons de formations superficielles et de fond de la rivière Saint-Charles.	110

6.3.1	Caractérisation chimique totale des échantillons de formations superficielles et de fond de la rivière Saint-Charles.	110
6.3.2	Extractions partielles de certains éléments dans les échantillons de formations superficielles et de sédiments de la rivière Saint-Charles.	113
6.4	Coefficient de partage (Kd) entre la fraction solide (MES) et la fraction dissoute des eaux de la rivière Saint-Charles.	114
6.5	Analyse statistique multivariée.	119
6.5.1	Analyse factorielle.	119
	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATION	123
	BIBLIOGRAPHIE	127
	ANNEXES	
1	Correspondance entre les arrondissements et des anciennes villes et quartiers de la ville de Québec.	
2	Industries retenues pour étude dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.	
3	Organigramme méthodologique section 1.	
4	Organigramme méthodologique section 2.	
5	Coordonnées UTM des stations d'échantillonnage de MES et d'eau du lac Delage au fleuve Saint-Laurent.	
6	Description des échantillons de formations superficielles et des sédiments de rivière et localisation des stations d'échantillonnage.	
7	Méthode de digestion totale de la matière en suspension prélevée sur des filtres de Téflon.	

- 8 Méthode de digestion partielle des formations superficielles et des sédiments de rivière en utilisant des bombes haute pression.
- 9 Méthode de digestion totale des formations des métaux particuliers.
- 10 Méthodologie «de particules en vrac » pour l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB).
- 11 Éléments analysés avec les différents spectromètres de masse à source plasma (ICP).
- 12 Qualité des blancs analysés pour la MES en novembre 2000.
- 13 Qualité des standards analysés pour les analyses de la MES en novembre 2000.
- 14 Qualité des blancs de MES et d'eau analysés en mai 2001.
- 15 Qualité des standards de sédiments, de roche et d'eau pour les analyses de MES et d'eau en mai 2001.
- 16 Qualité des blancs (attaque partielle et totale) de formations superficielles et de sédiments de rivière analysés en janvier 2002.
- 17 Qualité des standards pour les analyses de formations superficielles et de sédiments de rivière en janvier 2002.
- 18 Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données moyennes journalières météorologiques.
- 19 Données moyennes horaires des précipitations à la station de Sainte-Catherine de la Jacques Cartier aux périodes d'échantillonnages et la table des marées du fleuve Saint-Laurent.
- 20 Données physico-chimiques de l'eau de la rivière Saint-Charles.
- 21 Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysées par ICP-AES, novembre 2000.
- 22 Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysées par ICP-AES, mai 2001.
- 23 Données granulométriques des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles.

Analyse granulométrique P_{50} des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles.

- 24 Diffraction-X sur certains échantillons de sédiment et de formations superficielles.
- 25 Concentrations des éléments majeurs dissous dans l'eau analysés par ICP-AES, novembre 2000 et mai 2001.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

Figure 2.1	Carte du bassin versant de la rivière Saint-Charles et localisation des stations d'échantillonnage.	5
Figure 2.2	Utilisation du territoire et caractérisation de l'élevage dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.	8
Figure 2.3	Provinces géologiques de la région Québec.	9
Figure 2.4	Photographie de gneiss granitiques de la province du Grenville. Bordure de la rivière Saint-Charles, chute Kabir Kouba.	9
Figure 2.5	Photographie de la séquence de plate-forme du Groupe de Trenton bordant la rivière Saint-Charles constituée de grès et de calcaires. Secteur de la station S9.	11
Figure 2.6	Tronçon de la rivière Saint-Charles du Lac Saint-Charles (station d'échantillonnage S2) au barrage Joseph-Samson (station d'échantillonnage S18)	14
Figure 2.7	Barrage Allard sur la rivière Saint-Charles. Près de la station S11.	15
Figure 2.8	Aperçu d'une partie du secteur bétonné de la rivière Saint-Charles.	16
Figure 2.9	Répartition des émissaires d'égouts le long de la rivière Saint-Charles.	17
Figure 2.10	Coupe schématique montrant la configuration du système d'évacuation des eaux usées et des eaux de ruissellement.	18

Chapitre 3

Figure 3.1	Concentrations moyennes des TR contenues dans l'eau de mer et de rivière normalisées au NASC.	28
Figure 3.2	Spectre du NASC, de PAAS et de l'ES par rapport aux valeurs chondritiques.	63
Figure 3.3	Spectres des TR contenues dans les sédiments de fond de grands fleuves: Amazone, Congo, Ganges, Garonne et Mekong.	65
Figure 3.4	Spectre de la taille des particules.	66
Figure 3.5	Courbes d'adsorption de différents métaux sur des solides amorphes variant en fonction du pH de l'eau.	69
Figure 3.6	Effet du pH de l'eau sur la charge électrique à la surface de particules inorganiques.	70

Chapitre 5

Figure 5.1	Variation des débits moyens journaliers de la rivière Saint-Charles à Québec et des températures et des précipitations moyennes journalières à la station météorologique d'Environnement Québec située à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	54
Figure 5.2	Histogramme de la distribution des concentrations de matière en suspension ($> 0,45 \mu\text{m}$) mesurées aux 20 stations d'échantillonnage dans la rivière Saint-Charles en novembre 2000 et en mai 2001.	55
Figure 5.3	Variation des concentrations de la matière en suspension des eaux de la rivière Saint-Charles de l'amont vers l'aval pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	57
Figure 5.4	Variations des paramètres physico-chimiques pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.	58
Figure 5.5	Variations annuelles du débit, de la conductivité et du pH des eaux de la rivière Saint-Charles. Données prélevées à une station fixe du MENV située dans la rivière Saint-Charles à 22 km du fleuve.	61

Figure 5.6 :	Variation des concentrations en ions chlorures et sulfates contenues dans l'eau de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	63
Figure 5.7	Variation des concentrations en ions chlorures et en sulfates en fonction de la conductivité des eaux de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.	63
Figure 5.8	Variation des concentrations en carbone organique et inorganique dissous pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.	65
Figure 5.9	Variations des concentrations en carbone organique et inorganique dissous en fonction du pH et de la conductivité pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.	66
Figure 5.10	Photos de la matière en suspension de l'échantillon de la station S4 (novembre 2000).	69
Figure 5.11	Photos de la matière en suspension de l'échantillon de la station S20 (novembre 2000).	70
Figure 5.12	Concentrations des éléments dans la matière en suspension de la rivière pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.	72
Figure 5.13	Classification granulométrique des sédiments de fond et des formations superficielles dans un digramme ternaire granule-silt-sable.	74
Figure 5.14	Concentrations des principaux éléments majeurs dissous dans la rivière Saint-Charles au mois de novembre 2000.	77
 <u>Chapitre 6</u>		
Figure 6.1	Relation entre les oxydes des éléments majeurs et le TiO_2 dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	81
Figure 6.2	Concentrations en oxydes normalisés au TiO_2 dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour novembre 2000 et mai 2001.	83

Figure 6.3	Variation des concentrations en oxydes normalisés au <i>Upper Continental Crust</i> (UCC) pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	84
Figure 6.4	Variations des concentrations en oxydes contenus dans la matière en suspension normalisés au <i>Upper Continental Crust</i> (UCC) pour la période d'échantillonnage de novembre 2000.	86
Figure 6.5	Estimation de la proportion (%) de revêtement de fer-manganèse sur la matière en suspension de la rivière Saint-Charles en novembre 2000.	87
Figure 6.6	Variation des concentrations des éléments traces normalisées au réservoir de référence NASC (<i>North American Shale Composite</i>), contenues dans la MES pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. : Métaux alcalins K, Na, Rb et Cs, métaux alcalino-terreux : Ca, Ba et Sr, métaux de transition : Fe, Mn et Cr et HFSE : Ti et Zr.	91
Figure 6.7	Diagrammes des terres rares normalisées à la valeur moyenne des chondrite de type C1 pour la MES de la rivière Saint-Charles.	95
Figure 6.8	Diagrammes des concentrations en Terres Rares contenues dans la matière en suspension de l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. Valeurs normalisées aux Chondrites-C1.	98
Figure 6.9	Diagramme des TR contenues dans la matière en suspension normalisées au PAAS.	99
Figure 6.10	Diagramme des abondances en La, en Eu et en Lu de la MES normalisés au NASC pour les échantillonnages mois de novembre 2000 et de mai 2001 portées en fonction de la distance.	101
Figure 6.11	Rapport Eu_N/Eu_N^* dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	103
Figure 6.12	Rapport Ce_N/Ce_N^* dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	105

Figure 6.13	Variation du rapport La/Ce en fonction des concentrations d'oxyhydroxides ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$) présentes dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	106
Figure 6.14	Variation des anomalies en cérium en fonction des anomalies en europium présentes dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000.	107
Figure 6.15	Sommation des abondances en TR normalisées au titane dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	109
Figure 6.16	Sommation des abondances en TR normalisées au titane en fonction des oxyhydroxides de Fe et de Mn dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.	110
Figure 6.17	Diagrammes des terres rares normalisées au NASC pour les échantillons de formations superficielles (FS) présents dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles et de sédiments de fond de la rivière Saint-Charles. Les échantillons sont présentés en deux groupes distincts : les formations superficielles et les sédiments de fond.	112
Figure 6.18	Concentration totale de certains éléments traces contenus dans les échantillons de formation superficielles (FS) du bassin versant et des sédiments (Séd.) de fond de la rivière Saint-Charles.	113
Figure 6.19	Proportion (%) des éléments extraits par une attaque partielle par HCl (1N) par rapport à l'analyse totale des échantillons de formation superficielles (FS) du bassin versant et des sédiments (Séd.) du lit de la rivière Saint-Charles.	114
Figure 6.20	Coefficients de partage ($K_d/1000$) de l'europium (Eu), des TR légères : cérium (Ce) et samarium (Sm) et des TR lourdes : terbium (Tb), holmium (Ho) et lutécium (Lu) pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	117
Figure 6.21	Coefficients de partage ($K_d/1000$) des TR légères : cérium (Ce) et praséodyme (Pr) et des TR lourdes : terbium (Tb), pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.	118

Figure 6.22	Analyse factorielle des éléments dosés dans la MES en novembre 2000. ETR signifie : terres rares.	120
Figure 6.23	Analyse factorielle des éléments dosés dans la MES en mai 2001.	120
Figure 6.24	Analyse des correspondances pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001 regroupant les liaisons entre la constitution des échantillons de MES et les principaux éléments dosés.	121

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2.1	Contribution des principaux tributaires au débit de la rivière Saint-Charles.	6
Tableau 2.2	Coordonnées UTM des barrages présents sur la rivière Saint-Charles.	6
Tableau 2.3	Données climatiques moyennes de 1995 pour des stations météorologiques au voisinage du bassin versant de la rivière Saint-Charles.	13
Tableau 2.4	Principaux sites présentant un potentiel de contamination dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.	19

Chapitre 3

Tableau 3.1	Propriétés des terres rares.	26
Tableau 3.2	Concentrations en métaux des sédiments de la rivière Saint-Charles prélevés après quelques déversements d'égouts (secteur Marie de l'Incarnation) et après tous les réseaux unitaires d'égouts (barrage Joseph-Samson).	40

Chapitre 4

Tableau 4.1	Conditions opératoires de l'ICP-MS VG-PQ2 ⁺ .	44
Tableau 4.2	Conditions opératoires de l'ICP-AES Optima 3000.	45

Tableau 4.3	Conditions opératoires de l'ICP-AES Vista AX.	45
-------------	---	----

Chapitre 5

Tableau 5.1	Résultats d'observations faites au MEB sur des échantillons de matière en suspension de la rivière Saint-Charles et du fleuve Saint-Laurent.	68
-------------	--	----

Tableau 5.2	Granulométrie de 50 % des échantillons passant dans les tamis.	74
-------------	--	----

Tableau 5.3	Description minéralogique des formations superficielles et des sédiments de la rivière Saint-Charles prélevés respectivement dans le bassin versant et dans le lit de la rivière Saint-Charles.	76
-------------	---	----

Chapitre 6

Tableau 6.1	Sommation des coefficients de partage ($K_d/1000$) des TR entre la fraction solide (MES) et dissoute pour les différentes provinces géologiques et régions présentes dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.	118
-------------	--	-----



INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

La rivière Saint-Charles prend sa source à l'exutoire du lac Saint-Charles. Sur une distance de 33 kilomètres, elle parcourt des régions boisées et très dénivelées en amont, des régions plus résidentielles dans sa partie centrale où elle traverse la ville de Québec, pour enfin se déverser dans le fleuve Saint-Laurent près du port de Québec. Sinueuse en aval, elle supporte la présence de cinq barrages et reçoit les eaux de quatre tributaires. Cette rivière draine un bassin versant d'environ 550 km² qui se démarque par la présence de trois provinces géologiques distinctes. La partie amont de la rivière recoupe le socle grenvillien tandis que les parties centrales en aval recourent respectivement la Plateforme du Saint-Laurent et les Appalaches. Compte tenu de cette diversité géologique nous avons tenté d'évaluer géochimiquement l'hypothèse que la composition de la matière en suspension (MES) présente dans l'eau de la rivière, reflète la présence des différentes formations géologiques présentes dans le bassin versant.

La MES présente dans les cours d'eau joue un rôle important dans le transport, la spéciation chimique et l'écotoxicologie des métaux et des contaminants organiques. Bien que les métaux traces bio-disponibles sont en majeure partie présents dans la phase dissoute (< 0,45 µm), il est important de considérer la phase particulaire (> 0,45 µm) puisque les mécanismes d'adsorption régularisent les concentrations des éléments dissous dans les eaux naturelles.

Cette rivière a été choisie et échantillonnée principalement en raison de sa grande diversité géologique et de sa complexité hydrologique caractérisée entre autre par un marnage important des eaux du fleuve Saint-Laurent au niveau de la basse Saint-Charles.

Ce projet de recherche se propose d'apporter des informations sur la provenance et l'origine de la matière en suspension transportée par les eaux de la rivière Saint-Charles et sur la nature des processus géochimiques et hydrogéochimiques actifs dans les eaux de cette rivière.

Le lecteur constatera à la lecture de ce mémoire l'importance apportée au comportement des terres rares (lanthanides) dans la rivière Saint-Charles. À ce jour, peu de rivières canadiennes ont fait l'objet d'une étude systématique de la géochimie de terres

rare et métaux traces dans la MES et dans la fraction dissoute. Le comportement géochimique et hydrogéochimique de ces éléments dans les cours d'eau demeure encore méconnu et ce malgré la disponibilité de nouvelles technologies analytiques permettant le dosage de ces éléments.

Les terres rares sont de plus en plus utilisées : dans la fabrication de catalyseurs automobile, dans les circuits électroniques, en photonique (Laser Nd-YAG), dans le domaine bio-médical et en métallurgie (aimant permanent). Récemment, les agronomes chinois ont produit des engrais phosphatés de terres rares pour la culture des céréales en Chine et ce malgré l'absence d'informations pertinentes sur la mobilité de ces éléments dans l'environnement. Donc, une proportion de plus en plus importante de ces éléments se retrouvent dans l'environnement et ce malgré peu de données sur la toxicité de ces métaux.

L'ensemble de ces informations souligne l'importance d'étudier la géochimie et l'hydrogéochimie des terres rares dans les milieux naturels. Ces éléments peuvent éventuellement être impliqués dans des déversement car dû aux développement de nouvelles technologies, ce sont maintenant de nouveaux contaminants industriels.

Le second chapitre de ce mémoire présente une description du milieu physique et climatologique de la rivière Saint-Charles et de son bassin versant. Le troisième chapitre est une revue de littérature des principaux points théoriques abordés. La démarche méthodologique et les protocoles d'échantillonnage et d'analyse sont discutés au chapitre quatre. Les résultats analytiques et les observations qui ont été effectuées sur les échantillons sont présentés au chapitre cinq. Enfin, le dernier chapitre combine l'interprétation et la synthèse des résultats.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE : MILIEU PHYSIQUE

Le territoire du bassin versant de la rivière Saint-Charles est situé sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent dans la région de la ville de Québec. La rivière s'étend entre 46°48' et 47°06' de latitude nord et entre 71°12' et 71°25' de longitude ouest. Elle est située dans le comté de Québec et traverse dans son extrémité nord la municipalité régionale de comté de la Jacques-Cartier et du centre vers le sud, la ville de Québec (voir annexe 1 pour la correspondance des villes et des quartiers des arrondissements due à la fusion des municipalités). La rivière Saint-Charles est bornée à l'ouest par le bassin versant de la rivière Jacques-Cartier, à l'est par le bassin versant de la rivière Montmorency, au sud par le fleuve Saint-Laurent (Audet et al., 1997) et au nord par le bassin versant du lac Saint-Charles. Dans ce mémoire, la zone d'étude s'étend du lac Delage au nord au fleuve Saint-Laurent au sud (fig. 2.1).

2.1 Caractéristiques des principaux tributaires de la rivière Saint-Charles

Du lac Saint-Charles jusqu'à son exutoire dans le fleuve, la rivière Saint-Charles s'écoule sur plus de 33 km et draine un territoire d'environ 550 km² (Hébert, 1995). De plus, ses deux extrémités peuvent être jointes par une droite d'une longueur de 16 km ce qui démontre que cette rivière est particulièrement sinueuse.

La rivière Saint-Charles, une rivière d'ordre 5 (Strahler 1957; Lajeunesse et al., 1997), compte de nombreux tributaires répartis sur son parcours. Du nord vers le sud, la rivière des Hurons et le lac Delage alimentent principalement le lac Saint-Charles, et la rivière Saint-Charles constitue le segment collecteur central. Ses principaux affluents sont les rivières Jaune et Nelson, situées en aval du Lac Saint-Charles et les rivières Lorette et du Berger, situées dans la partie inférieure du cours d'eau (fig. 2.1). Voici une brève description de ces tributaires:

La rivière Jaune : Située en plus grande partie en aval du lac Beauport, cette rivière coule dans un milieu boisé, accidenté et très peu urbanisé. Elle franchit tantôt des zones

résidentielles isolées, tantôt des lotissements à forte densité démographique, notamment dans le secteur de Notre-Dame-des-Laurentides (Hébert, 1995). Le long de cette rivière, l'utilisation du sol est peu diversifiée et on y retrouve plusieurs sites récréatifs (Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1995).

La rivière Nelson prend naissance dans le secteur de Saint-Gabriel-de-Valcartier et traverse un secteur caractérisé par un élevage intensif de dindes. Par la suite, la rivière continue son trajet en traversant le territoire de la municipalité de Val-Bélair avant de se jeter dans la Saint-Charles.

La rivière Lorette débute à Val-Bélair, borne la ville de L'Ancienne-Lorette et traverse ensuite le quartier Allard. La majeure partie de l'occupation du territoire de cette rivière est à vocation urbaine bien que l'on retrouve quelques activités agricoles telles que l'élevage de bovins et la production de gazon en tête de bassin.

La rivière du Berger traverse uniquement des territoires urbains tels que les secteurs de Neufchatel et de Duberger. Elle prend naissance à la confluence du ruisseau des Marais et de la rivière des Commissaires au nord-ouest d'Orsainville.

2.1.1 Débits de la rivière Saint-Charles et de ses principaux tributaires

Le débit moyen de la rivière Saint-Charles pour la période 1969 à 1992, mesuré à la station débitométrique située à 0,8 km en amont de la confluence de la rivière Lorette, est de $8,29 \text{ m}^3/\text{s}$, alors qu'il diminue à $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ en période d'étiage hivernal (débit annuel minimal entre juillet et septembre pendant sept jours consécutifs avec une récurrence de deux ans) et à $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$ en période d'étiage estival (Hébert, 1995). À cette période, les débits journaliers minimum et maximum sont respectivement de $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $93,5 \text{ m}^3/\text{s}$. En période de crue, le débit journalier moyen enregistré pour la période de 1969 à 1992 est de $63,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les débits des principaux tributaires qui contribuent au débit de la rivière Saint-Charles sont présentés dans le tableau 2.1. Compte tenu de leurs faibles débits relativement semblables ces rivières semblent peu influencer la rivière Saint-Charles.

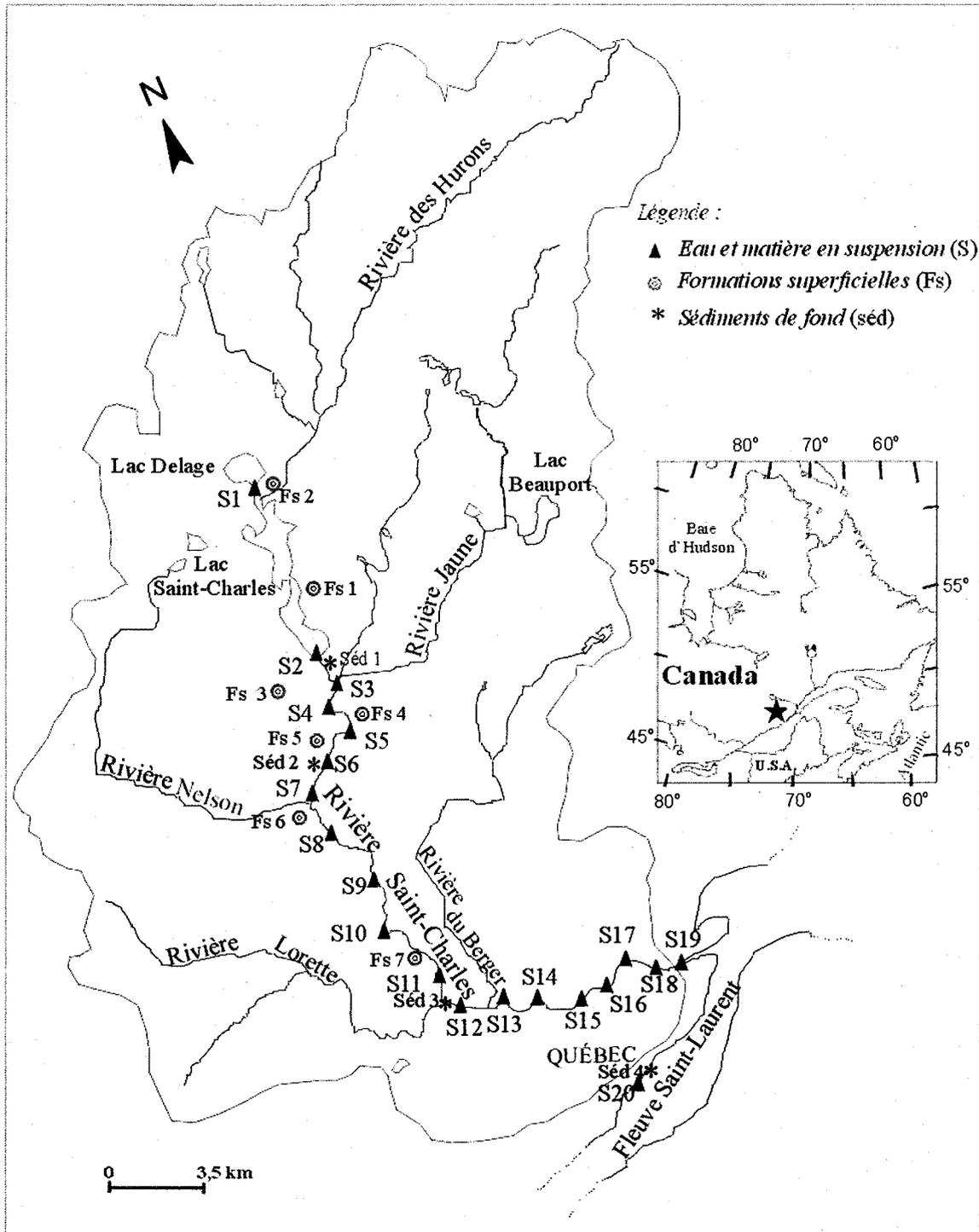


Figure 2.1 : Carte du bassin versant de la rivière Saint-Charles et localisation des stations d'échantillonnages. (Modifiée de : Audet et al., 1997).

Tableau 2.1 : Contribution des principaux tributaires au débit de la rivière Saint-Charles

Rivière	Localisation des stations débitométriques	Période d'observation des débits	Débit	Superficie	Contribution
			moyen (m ³ /s)	du bassin drainé (km ²)	au bassin versant (%)
Jaune	Au pont de la rue Notre-Dame à Notre-Dame-des-Laurentides	1986-1988	2,55 ¹	70 ³	13
Nelson	À 1,9 km de la rivière Saint- Charles	1986-1988	1,83 ¹	72	13
Lorette	Au pont de la rue des Méandres	1987-1988	1,39 ²	65	12
du Berger	À 0,9 km de la rivière Saint- Charles	1987-1988	2,55 ²	53	10

Tiré de: Hébert, 1995.

¹ : Débit moyen calculé sur 8 mois (avril à novembre)

² : Débit moyen calculé sur 7 mois (avril à octobre)

³ : Tiré de Lajeunesse et al., 1997

Le long de la rivière Saint-Charles on retrouve 5 barrages modifiant le débit de la rivière (tableau 2.2). Les barrages sont à la fois un piège à sédiments et une source de particules en suspension dans l'eau lorsque les vannes des barrages fermées depuis quelques jours sont ouvertes à nouveau.

Tableau 2.2 : Coordonnées de latitudes et de longitudes des barrages présents sur la rivière Saint-Charles

Nom du barrage	Coordonnées UTM Zone 19 NAD 27		Fonction du barrage	Distance relative à la station d'échantillonnage S1 (km)
	Nord	Est		
Cyrille-Delage	46° 54' 39"	-71° 22' 18"	Prise d'eau	6
Château d'Eau	46° 51' 42"	-71° 22' 02"	Régularisation du débit	21
Passerelle	46° 51' 42"	-71° 22' 02"	Contrôle des inondations	21
Allard	46° 49' 25"	-71° 19' 25"	Contrôle des inondations	30
Joseph-Samson	46° 49' 15"	-71° 13' 00"	Régularisation du débit	45

Com. Pers. : Centre d'expertise hydrique du Ministère de l'environnement du Québec (MENV), 2003.

2.1.2 Apports sédimentaires à la rivière Saint-Charles

Les particules minérales et organiques retrouvées dans la matière en suspension et dans les zones d'accumulation de la rivière proviennent en grande partie de l'érosion des berges de la rivière, du substrat rocheux, des sols agricoles et forestiers drainés par les tributaires et des égouts municipaux dans la section aval de la rivière. Aussi, dans les derniers kilomètres de la rivière, une proportion significative de la matière en suspension provient des eaux du fleuve Saint-Laurent qui pénètrent dans la rivière par l'effet périodique des marées. La construction de berges artificielles, le redressement et l'élargissement du cours d'eau à certains endroits et la construction du barrage Joseph-Samson ont grandement modifié les mécanismes de transport et les zones de déposition de sédiments dû au changement du régime d'écoulement naturel des eaux (Hébert, 1995). Après certaines études préliminaires, des travaux de stabilisation et de consolidation des berges ont été effectués afin de réduire les problèmes d'érosion et d'ensablement.

Les apports annuels totaux de sédiments à l'embouchure de la rivière Saint-Charles, mesurés au barrage Joseph-Samson, ont été estimés en moyenne à 3600 m³/an. On estime qu'environ 40 % de cette charge sédimentaire est exportée dans l'estuaire de la rivière et dans le fleuve Saint-Laurent. Les rivières Lorette et du Berger et la partie du bassin versant de la Saint-Charles située en amont de ces deux cours d'eau seraient responsables respectivement de 42%, 16% et 42% de l'apport total en sédiment (Hébert, 1995).

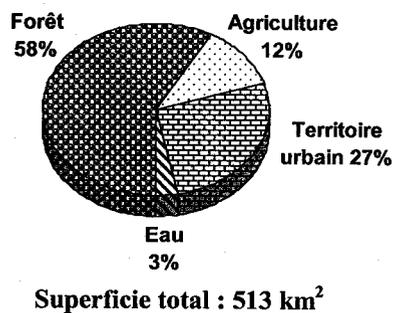
2.1.3 Occupation du territoire

Le bassin hydrographique de la rivière Saint-Charles est dominé par de la forêt et par des territoires à vocations urbaines (fig. 2.2). Près des trois-quarts du bassin sont occupés par de la forêt. Plutôt naturelle dans la partie nord, la forêt est exploitée pour le bois de chauffage plus au sud. Le territoire urbain est densément peuplé en aval de la rivière, avec une population pour la région métropolitaine de 682 757 habitants selon Statistique Canada (2002). En amont, le secteur est parsemé de maisons de villégiature et est caractérisé par une population minime par rapport au sud.

L'agriculture occupe environ 12% du territoire et se concentre surtout dans les secteurs de la rivière Lorette et de la rivière Nelson (Lajeunesse et al., 1997). Les bovins

et les volailles (essentiellement des dindes) dominant le cheptel. On les retrouve au nord-ouest de l'aéroport de Québec et dans la région de Saint-Gabriel-de-Valcartier respectivement (Lajeunesse et al., 1997; Statistique Canada, 1992). Bien que les données statistiques ne soient pas récentes, selon Statistique Canada (2002), l'agriculture aurait légèrement augmenté au pays. On peut donc supposer que les données du recensement de 1992 sont semblables à celles d'aujourd'hui à quelques chiffres près.

Utilisation du territoire



Cheptel

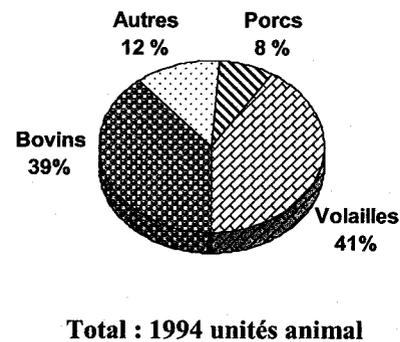


Figure 2.2 : Utilisation du territoire et caractérisation de l'élevage dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles (Source: Hébert, 1995).

2.2 Géologie

2.2.1 Provinces géologiques

Le territoire du bassin versant de la rivière Saint-Charles appartient à trois grandes provinces géologiques (fig. 2.3). Les trois quarts du territoire au nord appartient à la province géologique du Grenville, dont les lithologies sont principalement constituées de gneiss (fig. 2.4), de migmatites et de roches intrusives d'âge Protérozoïque. La partie sud du territoire appartient à la Plate-forme du Saint-Laurent et est constituée de calcaires, de grès et de shales datés à environ 500 millions d'années (Hébert, 1995; Saint-Julien, 1995). Bien que la rivière ne coule pas sur des roches appalachiennes, la partie sud de son bassin versant est localisé dans cette province géologique.

Aux abords de la rivière Saint-Charles, les roches sédimentaires qui appartiennent à la séquence de plate-forme paléozoïque reposent en discordance sur le socle grenvillien. Ces roches appartiennent aux groupes de Trenton, d'Utica et de Lorraine. La majorité des affleurements montrent à la base du Trenton une séquence constituée de quelques mètres

de grès (fig. 2.5). À Loretteville, on peut voir une coupe géologique où une faille met en contact les gneiss précambriens avec les grès du Trenton. Cette séquence se termine 1200 mètres en aval de la rivière, dans les shales de l'Utica (St-Julien, 1995). Au sud-est de ce contact de faille, où la coupe lithologique est discontinue, les affleurements présentent une séquence de turbidites du Groupe de Lorraine.

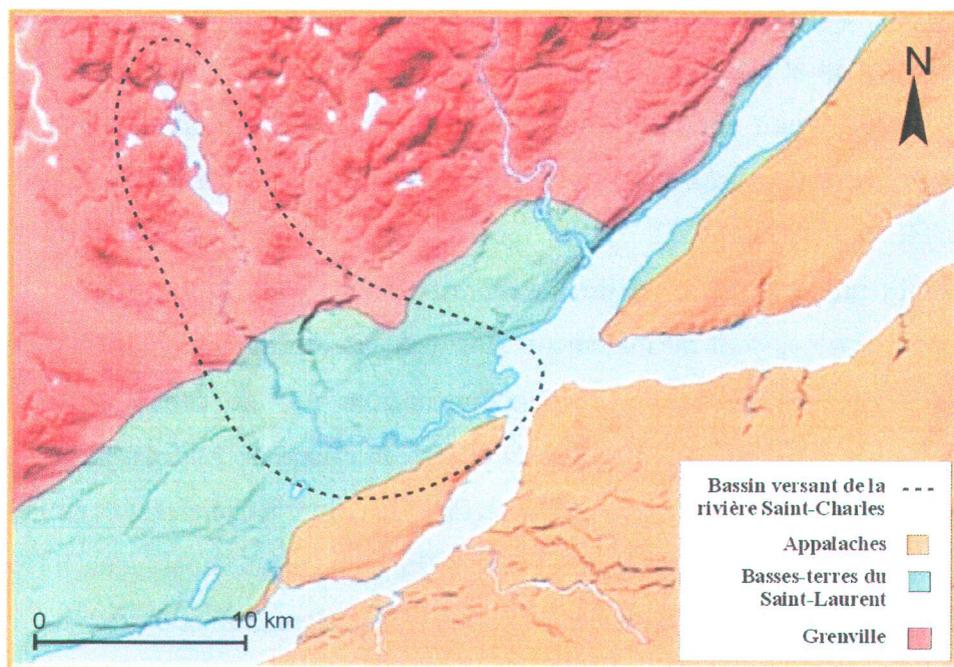


Figure 2.3 : Provinces géologiques de la région Québec (*Source: Feininger, St-Julien et Bolduc, 1995*).



Figure 2.4 : Photographie de gneiss granitiques de la province du Grenville. Bordure de la rivière Saint-Charles, chute Kabir Kouba. (Photo prise par LaFlèche M.)

Tel que mentionné à la figure 2.3, la majeure partie (55%) du bassin versant de la rivière Saint-Charles coule sur le Grenville. Cette province est caractérisée par des faciès métamorphiques amphibolitiques et granulitiques et par des roches ignées formées à haute température telles que des granitoïdes. En général ce sont des formations géologiques riches en TR par rapport aux roches sédimentaires crustales.

Environ 40 % du bassin versant est situé sur la région géologique de la Plateforme du Saint-Laurent et possède comme principales formations des calcaires, des grès et des shales. Cette région est donc composée de roches sédimentaires (carbonates) chimiques et terrigènes (ex. grès formé de 95% de quartz) qui sont des formations très appauvries en TR.

Une faible proportion (5 %) du bassin est touché par les Appalaches. Les formations appalachiennes sont normalement constituée de roches sédimentaires. Elles sont normalement caractérisées par de faibles abondances en TR. Par contre, cette région géologique du bassin n'affecte pas beaucoup la rivière en raison de l'urbanisation et des zones de remblai qui bordent la rivière. Pour faciliter la compréhension du document et en raison du positionnement des stations d'échantillonnage, nous employons le terme fleuve afin de représenter les stations situées dans les Appalaches (S18 et S19).

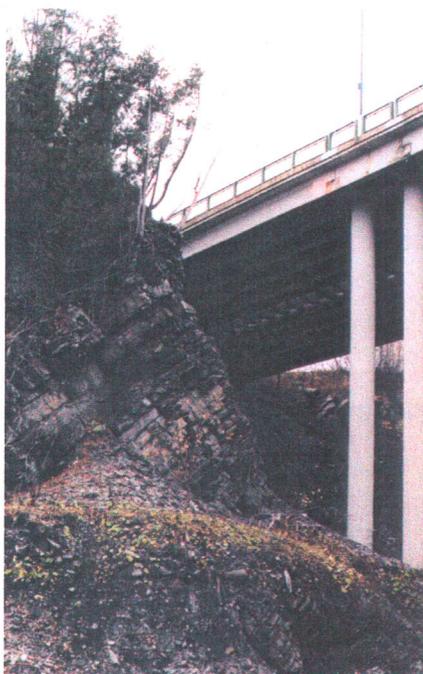


Figure 2.5 : Photographie de la séquence de plate-forme du Groupe de Trenton bordant la rivière Saint-Charles constituée de grès et de calcaires. Secteur de la station S9. (Photo prise par LaFlèche M.)

2.2.2 Formations superficielles

Le bassin versant de la rivière Saint-Charles se situe dans une zone de transition physiographique entre les Basses-Terres du Saint-Laurent au sud et le Bouclier Canadien au nord. Ce bassin montre une transition géomorphologique entre les dépôts d'origine marine de la Mer de Champlain (post-glaciaire) et les dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires des hautes-terres (Hébert, 1995; Morneau, 1989; Bolduc et al., 2000). L'essentiel du relief du bassin versant est pré-quadernaire et il a été relativement peu modifié par les épisodes glaciaires et post-glaciaires du Quarternaire. Dans la partie supérieure du bassin, au-dessus de 200 mètres d'altitude, les glaciers ont laissé une couche de sédiments glaciaires (d'épaisseur généralement inférieure à 1,5 mètres) arrachés aux roches ignées et métamorphiques du socle. Les territoires situés à une altitude inférieure à 200 mètres ont subi non seulement la fonte glaciaire mais aussi des ré-avancées glaciaires, l'invasion glacio-marine et le soulèvement isostatique. Dans ce secteur, les dépôts de surface présentent une forte variabilité spatiale et texturale (Hébert, 1995). Voici les neufs (9)

catégories de dépôts de surface qui ont été relevés pour le lit majeur de la rivière Saint-Charles (Hébert, 1995; Lajeunesse et al., 1997) :

- Affleurements rocheux
- Dépôts glaciaires
- Dépôts fluvio-glaciaires
- Dépôts fluviatiles
- Dépôts glacio-lacustres
- Dépôts marins et estuariens anciens
- Dépôts littoraux
- Dépôts organiques
- Dépôts de versant

2.3 Couvert forestier et climat

2.3.1 Considérations générales

Le climat actuel n'intervient pas directement dans le découpage des unités écologiques, car il n'a pas d'influence importante sur la physiographie qui structure le paysage. Cependant, il est la variable motrice du fonctionnement des écosystèmes; c'est pourquoi nous le retrouvons souvent dans la description écologique du territoire.

Le climat et la végétation sont étroitement liés parce que la végétation se nourrit du rayonnement solaire, de la chaleur et des précipitations qu'elle reçoit. L'ensemble du Québec présente un climat continental modéré dans sa partie méridionale et polaire dans l'extrême nord. Les précipitations annuelles sous forme de pluie varient entre 900 et 1500 millimètres alors que les chutes de neige oscillent entre deux mètres au sud de Montréal et plus de cinq mètres dans la Réserve faunique des Laurentides, au nord de Québec (Odyssee Québec, 2002).

2.3.2 Le bassin versant de la rivière Saint-Charles

La rivière est bordée en amont par de grandes forêts mixtes, comportant des érablières à érable rouge et des sapins baumiers accompagnés de quelques bosquets de

mélèzes (Lajeunesse et al., 1997). Ce secteur est la partie la plus forestière de la rivière Saint-Charles et aussi la plus froide (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Données climatiques moyennes de 1995 pour des stations météorologiques au voisinage du bassin versant de la rivière Saint-Charles

Stations météorologiques	Localisation	Altitude (m)	Température moyenne (°C)			Précipitation moyenne (mm)		
			Janvier	Juillet	Annuelle	Neige	Pluie (mai-oct)	Totale
Duchesnay		166	-13,1	18,4	3,4	334	723	1315
Charlesbourg		114	-11,9	19,5	4,4	314	724	1299
Duburger		15	-11,7	19,8	4,8	291	667	1195

Tirées de : Lajeunesse et al., 1997

Dans la deuxième section de la rivière, on retrouve sur les levées de sédiments alluviaux une forêt plus diversifiée constituée d'érables à sucre, d'hêtres et de tilleuls ainsi que de saules blancs, de peupliers baumiers et de sapins. Cette plus grande diversité peut être liée à la présence de roches carbonatées contrôlant l'acidité des eaux de ruissellement, à des sols mieux drainés, à des conditions climatiques plus favorables et au mode d'exploitation de la forêt (Lajeunesse et al., 1997).

La présence de saules blancs, de peupliers baumiers et d'érables à Giguère caractérise la troisième section de la rivière. Cette section est la moins pluvieuse, la plus chaude et la plus affectée par l'urbanisation des trois sections.

2.4 Subdivision de la rivière Saint-Charles

La rivière peut être divisée en trois secteurs (fig. 2.6) (Hébert, 1995) : 1) la haute Saint-Charles, 2) la moyenne Saint-Charles et 3) la basse Saint-Charles. L'objectif de cette section étant de décrire le profil de la rivière Saint-Charles, la figure 2.6 montre le secteur des stations d'échantillonnage compris entre les stations S2 (Lac Saint-Charles) et S18 (barrage Joseph-Samson).

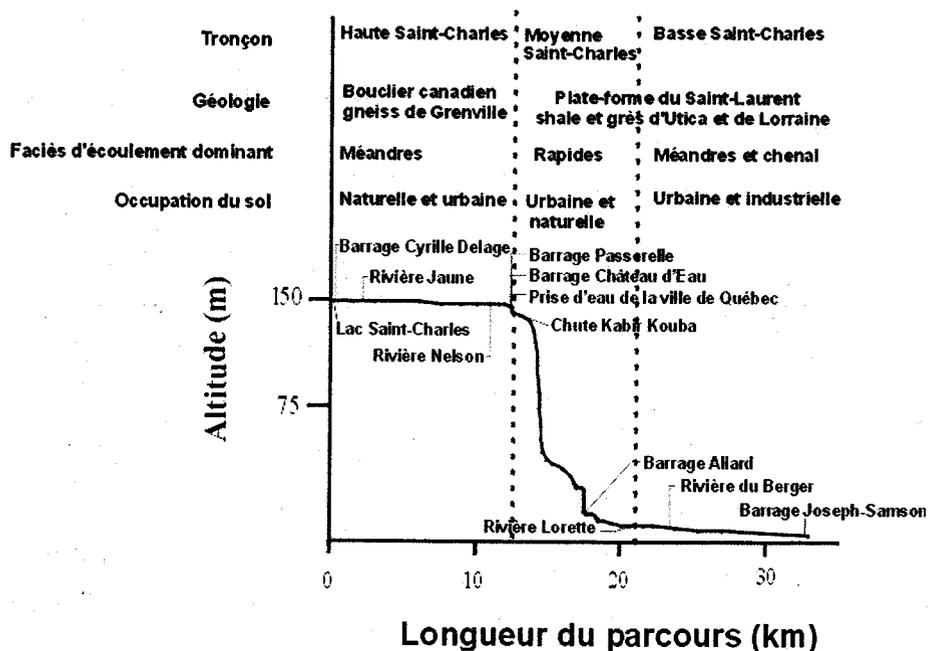


Figure 2.6 : Tronçon de la rivière Saint-Charles du Lac Saint-Charles (station d'échantillonnage S2) au barrage Joseph-Samson (station d'échantillonnage S18) (Adaptée de : Lajeunesse et al.; 1997).

2.4.1 La haute Saint-Charles

Dans le premier secteur, la rivière s'écoule sur les formations géologiques de la province de Grenville, dominée par des gneiss, et sur des sédiments fluviaux fins localisés à une altitude moyenne de 150 m. Dans ce secteur, le cours d'eau est caractérisé par une large plaine inondable, un parcours très sinueux et un dénivelé très faible (0,3%). Ce tronçon se termine au contact de la plate-forme du Saint-Laurent observable au pied des chutes Kabir Kouba à Loretteville-Wendake. C'est à la fin de ce tronçon que se situe la prise d'eau de la ville de Québec. Le niveau moyen des eaux fluctue peu grâce au barrage du lac Saint-Charles et à la limitation de la prise d'eau par la ville de Québec. Cette partie est de plus alimentée par les eaux de la rivière Jaune à l'est et de la rivière Nelson à l'ouest.

2.4.2 La moyenne Saint-Charles

Le secteur de la moyenne Saint-Charles débute à la chute Kabir Kouba et se termine avant l'embouchure de la rivière Lorette. C'est un tronçon d'eau vive qui ne

reçoit aucun autre affluent. Il débute par une chute d'environ 13 m, qui se poursuit en cascades et rapides dans une gorge de calcaire et continue dans une succession de rapides et chenaux moins agités dans une vallée étroite encavée dans les roches sédimentaires (shales et grès) de la plate-forme paléozoïque. Dans ce secteur, le lit de la rivière est peu sinueux mais subit parfois des changements de direction abrupte (Hébert, 1995). La fin de ce secteur est le barrage Allard (Fig. 2.7) qui a été construit dans le but de contrôler le couvert de glace et les inondations lors de la fonte printanière. Le profil de ce tronçon suit une pente moyenne (1,1%) et les périodes d'étiages sont aggravées par les ponctions de la prise d'eau de Québec réduisant le débit. Le lit majeur de cette partie de rivière est bordé par un réseau urbain dense traversé par un réseau routier achalandé et reçoit quelques effluents pluviaux (Hébert, 1995).



Figure 2.7 : Barrage Allard sur la rivière Saint-Charles. Près de la station S11. (Photo prise par LaFlèche M.).

2.4.3 La basse Saint-Charles

Le dernier tronçon, celui de la basse Saint-Charles, reçoit dès le début les eaux des rivières Lorette et du Berger ainsi que de nombreux effluents pluviaux et émissaires

d'égouts. Dans ce secteur, la rivière s'écoule lentement au début de l'ouest vers l'est dans un lit sinueux, encavé dans les sédiments estuariens de la Mer de Champlain, pour ensuite s'écouler au travers de la canalisation bétonnée à partir du pont Scott (Fig. 2.8). Cette section de la rivière est bordée de zones industrielles et résidentielles densément peuplées. À partir du pont Marie-de-l'Incarnation vers l'aval, le régime d'écoulement est contrôlé par le barrage Joseph-Samson, construit afin de contrer les effets des marées dans la rivière. Toutefois, notons que les marées hautes de pleine mer réussissent à influencer la rivière car elles ont une élévation géodésique de 5,1 m, ce qui correspond à une élévation au-dessus des portes du barrage Joseph-Samson qui ont une hauteur de 3,05 m (Grantham, 2001). Ensuite la rivière se poursuit doucement entre les murs de béton traversant le bassin Louise pour enfin terminer son trajet dans le fleuve Saint-Laurent.

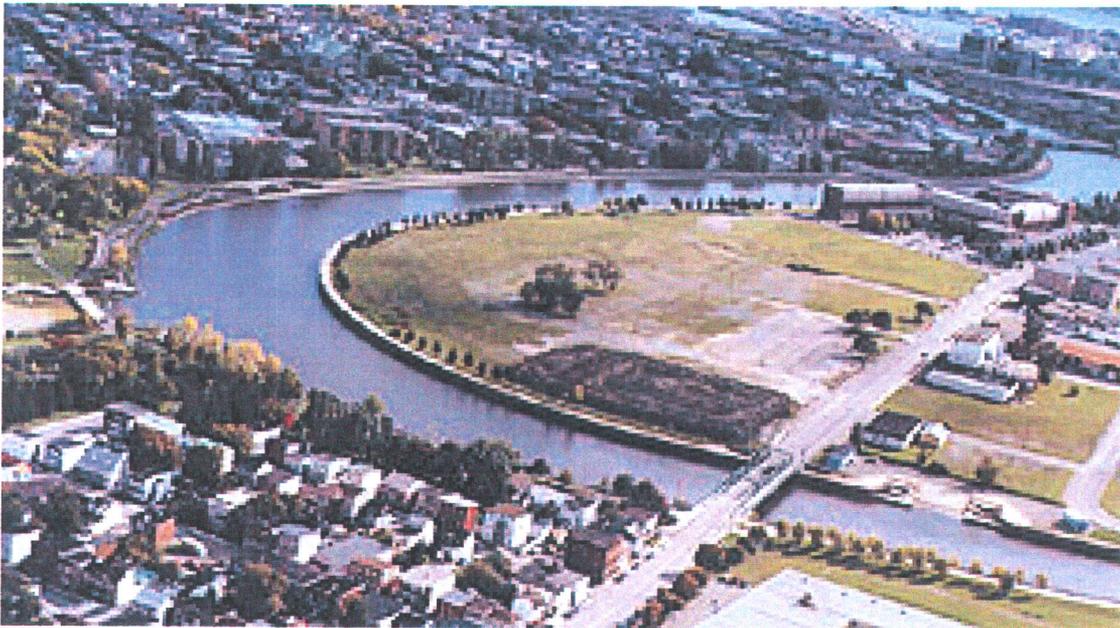


Figure 2.8 Aperçu d'une partie du secteur bétonné de la rivière Saint-Charles (CUQ, Bureau des relations avec la population, 1999).

2.5 Problématique environnementale de la rivière Saint-Charles

Vers la fin des années 1960, plusieurs travaux ont été faits dans le but de résoudre des problèmes d'ordre hydraulique et sanitaire dans le cadre d'un premier grand projet d'aménagement des berges de la rivière Saint-Charles. En 1980, une étude réalisée par le ministère de l'Environnement du Québec démontre qu'un minimum de 4 mm de pluie est

suffisant pour faire déborder les égouts et cela survient en moyenne 50 fois par été (Grantham, 2001). Il est important de souligner que les réseaux d'égouts plus âgés canalisent à la fois les eaux domestiques usées et l'eau de pluie dans une seule et même conduite (fig. 2.9). Quand il pleut, l'eau de pluie se draine dans les puisards de rue et vient gonfler le volume des eaux usées dans la conduite unitaire. Lorsque le débit d'eau dépasse la capacité d'évacuation de cette conduite, l'excédent s'échappe par des émissaires situés le long de la rivière (fig. 2.10). La qualité de l'eau de la Saint-Charles s'en trouve grandement affectée. Dans son état actuel cette rivière présente, dans sa partie aval, un écosystème aquatique et riverain de piètre qualité (Grantham, 2001). Également, aucun usage du plan d'eau n'est actuellement possible en raison de la pollution très sévère de l'eau marquée par de fortes concentrations en coliformes fécaux. Dans ce tronçon, les polluants sont confinés au cours d'eau, les échanges riverains et aquatiques ne sont pas possibles en raison de la présence de murs de béton qui éliminent tous les habitats fauniques. Afin de remédier à ces problèmes, la Ville de Québec s'est fait promoteur de la mise en valeur et de la renaturalisation de la rivière Saint-Charles (Grantham, 2001). La fin de ce projet de dépollution complète et de renaturalisation de la rivière est prévue pour 2008, année du 400^e anniversaire de la Ville de Québec.

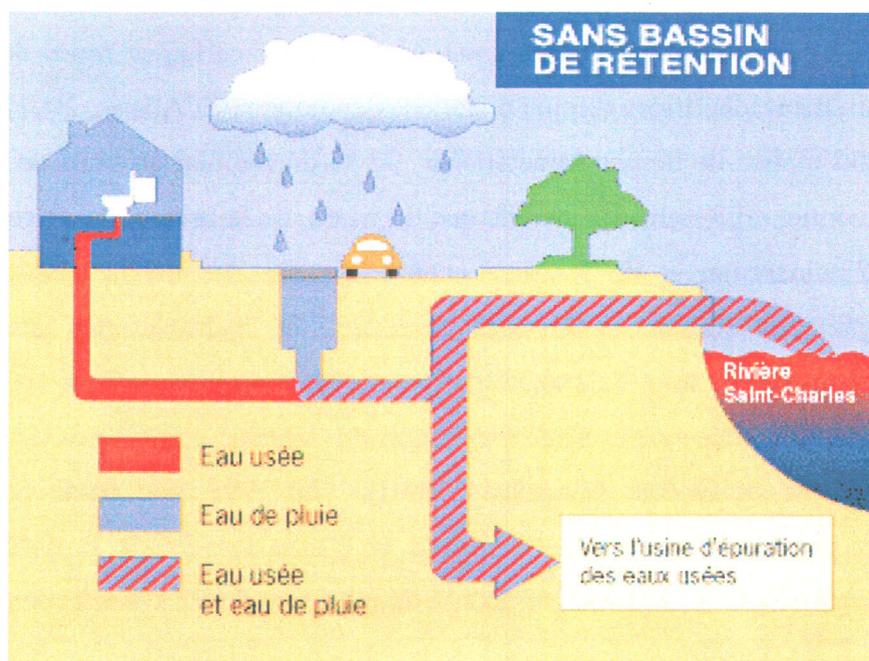


Figure 2.9 : Coupe schématique montrant la configuration du système d'évacuation des eaux usées et des eaux de ruissellement (CUQ, Bureau des relations avec la population; 1999).

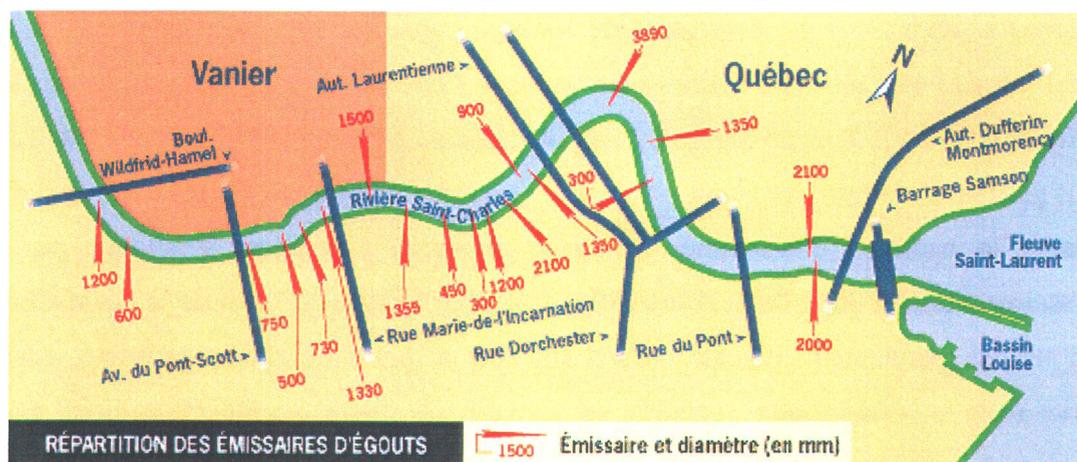


Figure 2.10 Répartition des émissaires d'égouts le long de la rivière Saint-Charles (CUQ, Bureau des relations avec la population, 1999).

2.6 Zones de remblai et industries en bordure de la rivière Saint-Charles

2.6.1 Zones de remblai

La rivière Saint-Charles que nous connaissons aujourd'hui ne ressemble pas beaucoup, ni dans son tracé, ni par son débit, à la rivière Saint-Charles du début du siècle. Diane Bouchard du Service de l'environnement à la Ville de Québec, a fait l'exercice de dessiner l'ancien lit de la rivière sur une carte contemporaine de la ville. Selon cette dernière, la rivière était un « site d'enfouissement urbain et certaines zones du remblai sont même clairement identifiées comme d'anciens dépotoirs » (D'Allaire, 2001).

Sur 3000 mètres de berges caractérisées, 22 % du remblai au bord de la rivière Saint-Charles contient différents débris tels que du béton, de la brique, du verre, du bois, des résidus d'incinération et de fonderie contaminés par des métaux lourds et des composés organiques (huiles et graisses minérales et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)). Le taux de contamination excède souvent le critère « C »¹ de la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés du ministère de l'Environnement du Québec (Grantham, 2001). En 1993, une étude portant sur l'inventaire du potentiel de contamination dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles a été réalisée par la Direction régionale du ministère de l'Environnement et de la

¹ Le niveau « C » est la valeur limite de la pollution au-dessus de laquelle tous les usages sont restreints à ce site.

Faune. On retrouve dans le tableau 2.4 les principaux sites présentant un potentiel de contamination à la suite de cette étude.

Tableau 2.4 Principaux sites présentant un potentiel de contamination dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles

Sites	Principaux contaminants
Parc Cartier-Brébeuf	Métaux, hydrocarbures
Québec Power, rue Verdun	HAP, BPC, huiles, naphthalène, coke, sulfures
FX-Drolet, Québec	Métaux (Cu, Zn, Pb)
Pointe-aux-Lièvres, Québec	Métaux (Cu, Zn, Pb), HAP
Anciens méandres, rivière Saint-Charles	Huiles et graisses, HAP, métaux, BPC
Soludev (plaque tournante de Canadien Pacifique Rails)	HAP, métaux, huiles et graisses

Note : Lors de la rédaction du rapport du ministère de l'Environnement et de la Faune, ces sites étaient en suivi environnemental ou en cours de caractérisation.

Tirée de : Hébert, 1995

Dans le but de faire le constat de cette contamination mixte (métaux-huiles et graisses), dix puits d'observation de l'eau souterraine le long de la Saint-Charles ont été mis en place. Les résultats de cette étude sont intéressants car ils indiquent que l'eau souterraine n'est pas ou peu contaminée et que les contaminants présents dans les sols sont très peu mobiles (Grantham, 2001).

2.6.2 Industries

En 1995, une étude a été menée par la PAEQ (Programme d'assainissement des eaux du Québec) afin de répertorier les industries potentiellement polluantes dans le secteur du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Cette étude porte principalement sur l'importance de leurs rejets d'eaux usées dans les réseaux d'égouts municipaux. Au total 51 industries ont été identifiées comme potentiellement polluantes (Hébert, 1995). Après une étude plus approfondie, 36 de ces industries ont été jugées comme polluantes et retenues pour des interventions, six (6) ont été jugées non polluantes et neuf (9) étaient toujours à l'étude (annexe 2). Les rejets des industries jugées polluantes affectent la

qualité de l'eau de la rivière plus spécifiquement lors des débordements des émissaires en temps de fortes précipitations (Hébert, 1995), suivant le même principe que lors des débordement des égouts domestiques (fig 2.9).

Bien que la majorité de la pollution de ces industries soit reliée au débordement des égouts en temps de pluie, il est hautement probable que l'activité de l'homme en milieu urbain et les émanations des cheminées de certaines industries présentes dans le secteur du bassin versant, affectent la qualité de l'eau de la rivière. Les émanations sortant des cheminées et des tuyaux d'échappement des automobiles ont la particularité d'être volatiles, de s'accumuler dans l'atmosphère et de retomber sous forme de précipitations ou sous la forme d'aérosols en absence de précipitations. De cette façon, l'équilibre de l'écosystème du bassin versant et de ses environs peut être affecté.

CHAPITRE 3

REVUE DE LITTÉRATURE

Depuis plusieurs années, la géochimie des éléments traces et des terres rares est un outil incontournable pour étudier l'évolution de la structure des corps planétaires et plus spécifiquement de celle de la Terre (Taylor et McLennan, 1981 ; Henderson, 1984; Taylor et McLennan., 1985; McLennan, 1989; Condie, 1991; Rollinson, 1993; McLennan, 1995). Récemment, des chercheurs ont appliqué ces principes pour étudier l'évolution géochimique des grands fleuves (Ingri et Widerlund, 1994; Dupré et al., 1996; Tremblay, 1997; Cossa et al., 1998; Petelet et al., 1998; Bau, 1999; Douglas et al. 1999; Roy et al., 1999 ; Grande et al., 1999 ; Sigg et al. 2000; Vital et Stattegger, 2000 ; Grosbois et al., 2001; Stummeyer et al., 2001). Certaines équipes de recherche se sont concentrées sur l'étude de la fraction dissoute des eaux continentales tandis que d'autres se sont attardées à l'étude des sédiments transportés par les cours d'eau. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous attarderons à l'étude des caractéristiques géochimiques de la matière en suspension (MES) d'un tributaire du fleuve Saint-Laurent, la rivière Saint-Charles. Pour expliquer certaines caractéristiques de la MES de la Saint-Charles, les aspects essentiels de la géochimie de l'eau de la rivière seront traités.

Pour comprendre l'origine et l'évolution de la matière particulaire contenue dans les eaux de surface, il est important de connaître la composition minéralogique et géochimique des formations géologiques du bassin versant. En effet, ces paramètres influencent fortement les concentrations en terres rares (TR) et autres éléments à fort champ ionique (ex. Nb, Ta, Zr, Hf, Ti) contenus dans la MES.

Ce chapitre aborde donc les principaux concepts qui seront utilisés dans le mémoire. Dans cette section, nous mettrons l'emphase sur certains aspects essentiels à la discussion des résultats. Les lecteurs peuvent se référer au mémoire de maîtrise de Tremblay (1997) et à la thèse de doctorat de Ndzangou (2003) pour plus d'informations.

Un nombre important de recherches ont porté sur la chimie du Cu, du Zn et du Pb dans les eaux continentales mais relativement peu d'études décrivent le comportement

des TR dans les cours d'eau. Les études de la MES réalisées dans les années 60, reposent sur un nombre restreint d'éléments et ce n'est que depuis la fin des années 90 que l'utilisation des TR comme traceurs de la source géologique est devenue plus fréquente. Notons toutefois que les études géochimiques portant sur la matière particulaire des rivières au Québec sont rares. Pour cette raison, nous ferons fréquemment référence à des études portant sur des rivières ou des fleuves situés à l'extérieur du Canada.

3.1 Les terres rares et les métaux traces

Plusieurs études géochimiques et hydrogéochimiques ont été réalisées sur des rivières et des fleuves (Ingri et Widerlund, 1994; Dupré et al., 1996; Tremblay, 1997; Cossa et al., 1998; Petelet et al., 1998; Grande et al., 1999; Roy et al., 1999; Sigg et al. 2000; Stummeyer et al., 2001). La plupart de ces dernières tentent de caractériser la MES en basant leurs interprétations sur les spectres de terres rares et sur les corrélations existantes entre certains métaux traces.

Les éléments ne se comportent pas tous de la même façon dans les phases dissoutes et particulaires des cours d'eau. Il a été démontré, lors d'une étude géochimique portant sur la comparaison de 20 rivières (Martin et Meybeck, 1979), que divers éléments présents en grandes concentrations dans la phase dissoute (ex. Ca, Na, Mg, As, Sr, Li) ont un comportement plus variable que d'autres éléments plus réfractaires présents surtout dans la MES (ex. TR, Si, Al, Fe, K, Ga, Hf, Sc, Ta, Ti, U).

3.1.1 Les terres rares

Les TR sont un regroupement d'éléments traces qui comprend le scandium (Sc), l'yttrium (Y), le lanthane (La) et les lanthanides qui suivent ce dernier dans le tableau de Mendeleïev. Les TR sont difficilement fractionnées par des processus géochimiques de basse température. Les lanthanides, qui constituent le regroupement d'éléments dominant des TR, sont un groupe d'éléments de la 6^e période du tableau périodique ayant un numéro atomique compris entre 57 et 71, caractérisés par le comblement progressif de l'orbitale périphérique 4f. On inclut aussi dans cette famille l'Y et le Sc en raison de leurs valences et de leurs rayons ioniques semblables qui leur donnent un comportement

similaire. On retrouve ces éléments en concentration de trace (mg/L) et plus rarement d'ultra trace ($\mu\text{g/L}$) dans les roches. Dans l'eau, ces éléments sont présents à des concentrations de l'ordre de 10^{-6} fois inférieures à celle des roches et de la MES (Rollinson, 1993).

Dans la littérature, on sépare cette famille en deux sous-groupes selon la masse atomique des éléments: les terres rares légères du La au Sm et les terres rares lourdes du Gd au Lu (incluant le Sc et l'Y). Les TR ont des propriétés physiques et chimiques très similaires en raison de leurs configurations électroniques. On peut voir au tableau 3.1 que le rayon ionique diminue progressivement avec l'augmentation du numéro atomique (nombre de protons), dû à la contraction du noyau atomique. Ce processus s'explique par l'augmentation des charges effectives dans le noyau lors du remplissage des orbitales 4f ou 5f par les électrons qui sont attirés par les protons. Cette propriété affecte la stabilité des éléments. Les TR lourdes possédant un plus petit rayon ionique, auront tendance à former des liens plus forts et à se substituer plus facilement dans la structure cristalline des minéraux silicatés. Les TR légères, ayant un plus large diamètre, réduiront la force des interactions covalentes et électrostatiques et par le fait même le potentiel de complexation avec d'autres éléments. Deux éléments diffèrent des autres de cette famille par leurs états de valence: le Ce et l'Eu. Pour comprendre les résultats de cette recherche, il est important d'expliquer le comportement de ces deux éléments.

Tableau 3.1 : Propriétés des terres rares

Numéro atomique	Nom	Masse atomique	Symbole chimique	Rayon ionique de l'atome Nombre de coordination = 8 Ångstroms (10^{-10} m)
21	Scandmium	44.955910	Sc ³⁺	0.870
39	Yttrium	88.90585	Y ³⁺	1.019
57	Lanthane	138.9055	La ³⁺	1.160
58	Cérium	140.115	Ce ³⁺	1.143
			Ce ⁴⁺	0.970
59	Praséodyme	140.90765	Pr ³⁺	1.126
60	Néodyme	144.24	Nd ³⁺	1.109
61	Prométhium	(145)	Pas naturellement présent	
62	Samarium	150.36	Sm ³⁺	1.079
63	Europium	151.965	Eu ³⁺	1.066
			Eu ²⁺	1.250
64	Gadolinium	157.25	Gd ³⁺	1.053
65	Terbium	158.92534	Tb ³⁺	1.040
66	Dysprosium	162.50	Dy ³⁺	1.027
67	Holmium	164.93032	Ho ³⁺	1.015
68	Erbium	167.26	Er ³⁺	1.004
69	Thulium	168.93421	Tm ³⁺	0.994
70	Ytterbium	173.04	Yb ³⁺	0.985
71	Lutécium	174.967	Lu ³⁺	0.977

(Modifié de Rollinson, 1993)

3.1.1.1 Le cérium

Sous les conditions de température et de pression présentes dans l'hydrosphère, la majorité des TR sont stables sous la forme trivalente, à l'exception du Ce⁴⁺ et de l'Eu²⁺. Le Ce⁴⁺ et l'Eu²⁺ sont respectivement plus petit de 15 % et plus grand de 17 % que leurs rayons ioniques à une valence 3⁺. Sous des conditions oxydantes, produites uniquement en milieu marin et estuarien, le cérium peut être oxydé dans l'état quadrivalent. La précipitation du Ce (CeO_{2(s)}) en équilibre avec l'eau de mer, associée à la formation des nodules de ferro-manganésien, peut expliquer sa faible concentration dans les eaux océaniques (McLennan, 1995 et Bau, 1999). En contraste avec l'eau de mer, les lacs alcalins montrent une anomalie positive en cérium dissous (Ce⁴⁺) en raison de la stabilité de l'ion à ce pH. On retrouve aussi des interactions avec le manganèse dans le sol. Les oxydes de manganèse fraîchement formés peuvent retenir le Ce⁴⁺ dans les profils de sol (Heinen de Carlo et Wen, 1998). Conséquemment, les eaux souterraines peuvent localement présenter des anomalies négatives en cérium.

3.1.1.2 L'euporium

Dans l'eau d'une rivière ou dans l'océan, la forme Eu^{3+} domine. Sous des conditions réductrices, l'Eu peut exister naturellement dans les matériaux de la croûte terrestre sous forme divalente, lui donnant un rayon ionique identique au Sr^{2+} . Sous certaines conditions présentes dans la croûte terrestre, l'Eu peut facilement se substituer au Sr dans la structure cristalline des plagioclases calciques (feldspaths) résultant en un enrichissement marqué comparativement aux abondances des autres TR trivalentes (McLennan, 1995). Sur des spectres d'éléments traces normalisés aux valeurs chondritiques, l'enrichissement en Eu produit une forte anomalie. Il est à noter que le changement de degré d'oxydation de Eu^{3+} en Eu^{2+} est impossible dans des conditions d'oxydoréduction de basses températures ($< 200^\circ\text{C}$).

La présence d'anomalies négatives ou positives de Ce et d'Eu sur les spectres de lanthanides est signifiée par la présence de pics. Ces anomalies peuvent être reliées au fractionnement des éléments : 1) lors de la formation des minéraux et des roches (pétrogenèse); 2) lors de la cristallisation des magmas et 3) lors de la fusion partielle du manteau terrestre ou de la croûte terrestre (Henderson, 1984). Par exemple, lors de la formation du plagioclase, l' Eu^{2+} peut se substituer facilement au Sr^{2+} dans la structure cristalline et produire un enrichissement considérable comparé aux concentrations des TR trivalentes observées dans les magmas résiduels.

3.1.1.3 Solubilité des terres rares

Comme les TR sont des éléments relativement résistants aux processus de météorisation physique et chimique du substrat rocheux (pédogenèse) et qu'elles tendent à rester dans les profils de sol, elles conservent généralement les principales caractéristiques géochimiques des formations géologiques dans lesquelles ces sols se sont formés (Henderson, 1984 et Condie, 1991). Ces éléments ont une forte affinité avec les roches crustales (éléments lithophiles) et sont relativement immobiles lors du métamorphisme régional, du transport des sédiments et durant les processus d'altération, d'érosion et de diagenèse des sédiments (ex. Henderson, 1984; Condie, 1991; LaFlèche et

Camiré, 1996). Notons que dans les systèmes hydrothermaux acides, réducteurs et de hautes températures (de 300 à 360°C), ces éléments peuvent être très mobiles.

À l'opposé, les TR sont très peu solubles dans l'eau douce et océanique. Elles sont majoritairement transportées dans la phase particulaire. La formation de complexes (tels que les chlorures et les carbonates), un court temps de résidence en phase soluble et le potentiel d'oxydation de l'eau (Rollinson, 1993) influencent la solubilité de ces éléments.

Les concentrations normalisées en TR dans la fraction dissoute de l'eau de mer sont de six à sept ordres de magnitude inférieures aux concentrations observées dans les shales (Rollinson, 1993) (fig. 3.1). Les concentrations en TR dans l'eau de rivière sont d'un ordre de magnitude plus grandes que dans l'eau de mer (Rollinson, 1993). Les colloïdes organiques contrôlent en grande partie la chimie des lanthanides dans les rivières et sont portés à complexer les lanthanides lourds (LaFlèche, 2001).

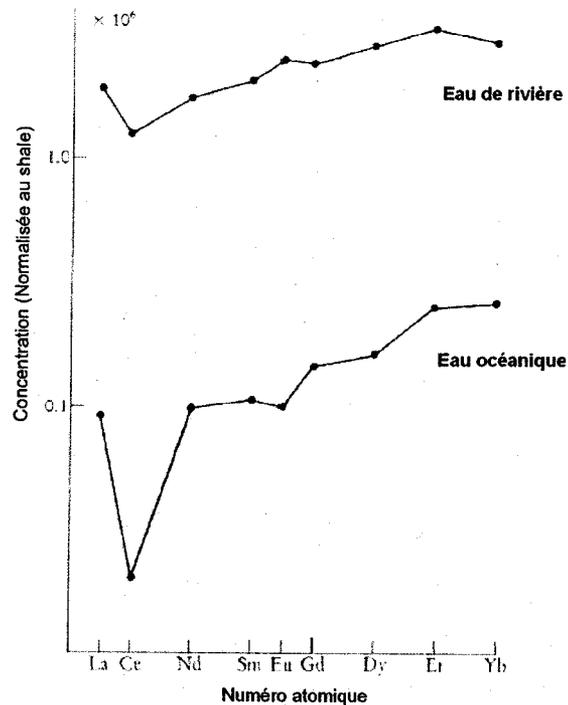


Figure 3.1: Concentrations moyennes des TR contenues dans l'eau de mer et de rivière normalisées au NASC (Modifiée de Rollinson; 1993). Notez l'anomalie négative en Ce de l'eau de mer et l'enrichissement en Tr lourdes.

Dans certains cas, les spectres de TR de la MES sont comparés à ceux de sédiments ou à ceux de la phase dissoute (beaucoup moins concentrée) afin d'étudier

l'origine de la MES et d'expliquer certaines caractéristiques géochimiques (ex. Condie, 1991). Plus précisément, on utilise cette approche pour comprendre les processus d'altération des roches et minéraux et pour déterminer le taux d'érosion des bassins versants de grands fleuves (ex. Dupré et al., 1996).

3.1.1.4 Les réservoirs de référence

Le NASC (North American Shale Composite) et le PAAS (Post-Archean Australian Shale Average) sont fréquemment utilisés pour caractériser géochimiquement la MES et les sédiments turbiditiques fins. Il est à noter que les valeurs de ces deux réservoirs de référence sont dans plusieurs ouvrages tels que Taylor et McLennan (1985) et Rollinson (1993). L'obtention de ces valeurs de normalisation découle d'une compilation statistique de la géochimie de la MES des principaux fleuves drainant le continent nord-américain (NASC) ou le bassin versant de l'océan Pacifique en Australie (PAAS). Ils sont donc représentatifs de la composition moyenne de la croûte continentale exposée à la surface de la Terre et des matériaux détritiques transportés par les rivières vers les océans (ex. Condie, 1991). Le NASC et le PAAS sont caractérisés par : 1) des spectres enrichis en terres rares légères (du La au Sm), 2) un faible fractionnement pour les TR lourdes et 3) des anomalies négatives variables en Eu (fig. 3.2). Notons que la normalisation aux chondrites élimine la variation d'abondance entre les éléments pairs et impairs (effet d'Oddo-Harkins produit lors du processus de nucléosynthèse) avec pour effet de lisser la courbe des concentrations. On nomme cette dernière spectre. Cette représentation graphique permet d'analyser le fractionnement des TR par rapport aux matériaux de la croûte terrestre.

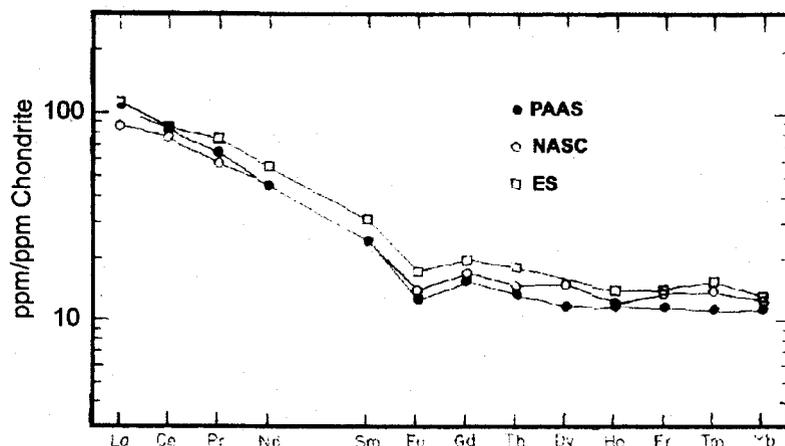


Figure 3.2 : Spectre du NASC, de PAAS et de l'ES (*Average european shale*) par rapport aux valeurs chondritiques (Modifiée de Taylor et McLennan; 1985).

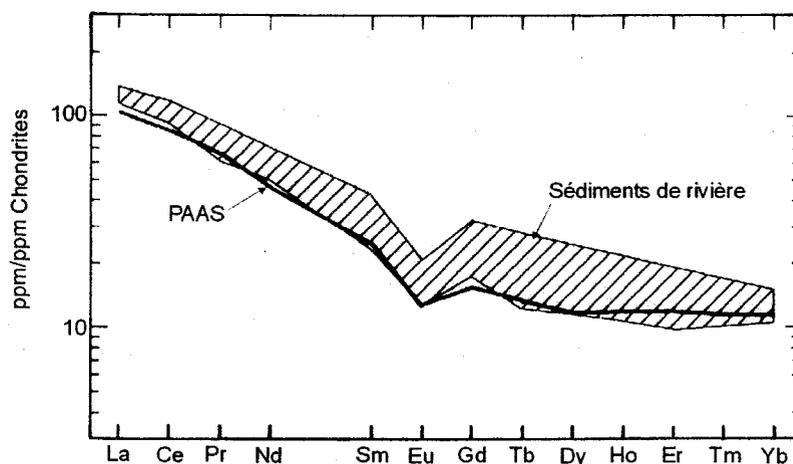


Figure 3.3 : Spectres des TR contenus dans les sédiments de fond de grands fleuves: Amazone, Congo, Ganges, Garonne et Mekong représentés par la zone hachurée (Modifiée de Taylor et McLennan, 1985).

À la figure 3.3, on peut voir la similarité des spectres de TR entre le shale moyen (PAAS) et les concentrations analysées dans les sédiments de quatre grandes rivières du monde. Un léger enrichissement des sédiments en TR par rapport aux valeurs observées dans le réservoir PAAS peut suggérer une préférence des TR pour les particules très fines contenues dans les sédiments des cours d'eau (ex. Taylor et McLennan, 1985). En effet, selon Taylor et McLennan (1985), la majeure partie des TR présentes dans les roches sédimentaires clastiques serait contenue dans la fraction granulométrique $< 63 \mu\text{m}$ (fraction granulométrique des silts et des argiles). Ce phénomène peut s'expliquer en partie par un phénomène de dilution créé par l'absence des TR dans le quartz, un minéral dominant dans la fraction grossière des sédiments. Dans la granulométrie plus fine, la

fraction silteuse tend à être moins enrichie en TR que la fraction argileuse. Finalement, la fraction sableuse comporte de plus faibles concentrations en TR que la fraction silto-argileuse. Les TR sont donc contenues préférentiellement dans la granulométrie argileuse (Taylor et McLennan, 1985).

Sous certaines conditions climatiques, la minéralogie des roches peut faire varier les concentrations en TR lors de la météorisation chimique des formations géologiques (Taylor et McLennan, 1985). Par exemple sous des conditions tropicales favorables à la formation de latérites, la majorité des éléments incluant une proportion importante des TR, serait lessivée par les eaux de percolation. Sous les conditions climatiques modérées qui affectent le territoire québécois, l'exportation des TR logées dans les minéraux vers les eaux de surface est peu efficace en raison des conditions non favorables à la formation de minéraux secondaires (ex. kaolinite, smectite, chlorite, etc.) (Chagnon A., com. pers. 2002). La plupart des particules $< 4 \mu\text{m}$, appelées argiles granulométriques, retrouvées au Québec sont constituées principalement de fins fragments de roches façonnés par l'érosion glaciaire. L'effet du broyage mécanique des roches lors du passage des grands glaciers a produit beaucoup de sédiments glaciaires contenant des proportions variables de particules fines. Ces dernières ne contiennent pratiquement pas d'argiles minéralogiques car les conditions climatiques de l'époque et actuelles sont trop froides pour former ces minéraux. Donc l'érosion récente des dépôts glaciaires permet le transport d'argiles granulométriques peu affectées par les processus d'intempéries chimiques. Conséquemment ces sédiments contiennent peu d'argiles minéralogiques.

Par contre des études récentes montrent que les sols développés sur des tills granitiques comme au Québec peuvent montrer un fractionnement en TR en passant de l'horizon A à l'horizon C (Ndzangou, 2002). Les TR sont fractionnées dans les profils de sols récents développés sur des tills quaternaires. L'érosion mécanique globale des sols (phénomène actuel) tend à homogénéiser la signature des particules acheminées vers les rivières (LaFlèche M., com. pers., 2002).

3.1.2 Les métaux traces

Le degré d'enrichissement des spectres des terres rares dans les sédiments peut s'expliquer par la présence de certains minéraux accessoires (ex. apatite, zircon,

monazite, allanite) et/ou par la signature primaire de la roche mère (Taylor et McLennan, 1995; Douglas et al., 1999). L'accumulation par densité de ces minéraux lourds résulte en certains enrichissements observés dans les sédiments grossiers de rivières. Mais le rôle de ces minéraux devrait diminuer considérablement dans la MES des rivières. Par exemple, dans la section amont de la rivière Saint-Charles, on peut observer un enrichissement en TR dans la MES par rapport au NASC. La MES montre entre autre la présence d'une importante anomalie négative en Eu. Cette signature géochimique particulière est semblable à celle observée dans les roches granitiques abondantes dans la province géologique du Grenville.

La corrélation positive entre deux éléments (Na, K, Mg et Sr), normalisés à un élément de source détritique minérale (Al, Na ou Ti), peut être utilisée pour préciser l'origine de matériaux sédimentaires (ex. Petelet et al., 1998) et être comparée avec les ratios observés dans les tills régionaux (ex. Ingri et Widerlund, 1994). Selon Grosbois et al. (1999), la détermination des minéraux érodés peut être aussi réalisée en combinant l'analyse graphique des oxydes (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO et SiO_2) en fonction du débit de la rivière en complémentarité à des observations texturales des grains de la MES obtenus à l'aide de microscope électronique à balayage (MEB).

En combinant les informations provenant de l'étude des métaux traces et des TR, il est aussi possible de comprendre le fractionnement de certains éléments reliés aux phénomènes d'adsorption (ex. Stummeyer et al., 2001). Ces processus d'absorption sont de plus en plus importants, en fonction de la concentration des revêtements de fer et de manganèse sur les particules sédimentaires.

3.2 La matière en suspension

La concentration de certains métaux trace présents dans la MES peut être influencée par le climat, la végétation, la géologie, le relief, l'activité humaine et les apports atmosphériques propres à chaque région (ex. Petelet et al., 1998; Grande et al., 1999; Sigg, 2000; Stummeyer et al., 2001). La matière particulaire présente dans les cours d'eau joue un rôle important dans le mouvement, la spéciation chimique et l'écotoxicologie des métaux toxiques et des contaminants organiques (ex. Baudo et al., 1990) dû à la présence des sites d'adsorption à la surface des particules. Bien que les

métaux trace biodisponibles sont en majeure partie présents dans la phase dissoute ($< 0,45 \mu\text{m}$), il est important de considérer la phase particulaire ($> 0,45 \mu\text{m}$) puisqu'elle régularise les concentrations des éléments dissous dans les eaux naturelles (Salomons et Förstner, 1984).

3.2.1 La constitution de la matière en suspension

Au Québec, la MES des rivières origine principalement : 1) du lessivage et de l'érosion des formations superficielles quaternaires; 2) de la roche mère; 3) de la matière organique solide et 4) de rejets anthropiques, de poussières atmosphériques et d'eaux de ruissellement urbain, eaux usées (domestiques, industrielles et agricoles). La MES autochtone et allochtone est constituée d'un mélange de matières organiques (algues, bactéries, débris de végétaux, composés humiques) et de composés inorganiques (carbonates, quartz, feldspaths, amphiboles, micas, oxydes et hydroxydes). En fonction des propriétés chimiques et physico-chimiques des eaux, ces composés peuvent être liés entre eux par des revêtements d'oxyhydroxides de manganèse et de fer et/ou par des substances organiques pour former des particules d'un diamètre plus ou moins important.

Les eaux naturelles contiennent des particules de différentes tailles (fig. 3.4), mais nous limiterons la présente étude aux particules d'un diamètre supérieur à $0,45 \mu\text{m}$. Cette limite est fréquemment utilisée comme norme environnementale dans l'étude des cours d'eau.

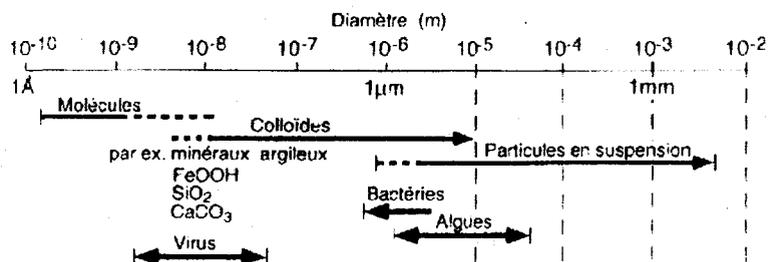


Figure 3.4 : Spectre de la taille des particules selon Sigg et al. (1992).

3.2.2 La granulométrie

Les analyses granulométriques et géochimiques démontrent en général que les plus grandes concentrations de métaux trace adsorbés dans les sédiments se retrouvent dans la fraction silto-argileuse ($< 63 \mu\text{m}$) (Salomons et Förstner, 1984; Sigg et al., 200) en raison de la surface spécifique et des propriétés de surface des particules argileuse.

La MES analysée dans cette étude est constituée de fines particules ($> 0,45 \mu\text{m}$), qui ont un très faible taux de sédimentation et une capacité de transport en eaux douces de plusieurs kilomètres (10 à 1000 km) selon le débit des cours d'eau. Au cours du transport de la MES, les contaminants adsorbés à ces particules transportées dans la colonne d'eau peuvent rencontrer des conditions physico-chimiques différentes pouvant favoriser la désorption. Dans certaines conditions, les métaux adsorbés peuvent être largués sous une forme dissoute ou précipités, et peuvent devenir problématiques pour l'écosystème aquatique.

Notons que les particules colloïdales peuvent constituer une fraction significative de la MES récoltée en novembre 2000 et en mai 2001. Cette fraction peut fortement adsorber les métaux dissous et jouer un rôle important dans un cours d'eau. Les matières colloïdales sont formées à partir de la dispersion de particules argileuses dans l'eau. Les particules colloïdales peuvent coaguler ou flocculer en fonction des conditions physico-chimiques du milieu. Ces particules possèdent une grande surface spécifique. Leurs charges électriques, qui influencent l'adsorption, varient en fonction du pH et du point isoélectrique (fig. 3.5). Sous certaines conditions de pH, la charge plus spécifiquement le potentiel de surface du minéral ou de l'espèce devient négative, ce qui favorise les réactions d'adsorption des cations métalliques dissous dans les eaux naturelles.

3.3 L'adsorption

La réactivité des particules en suspension (d'un diamètre $> 0,45 \mu\text{m}$) est liée entre autre à la surface spécifique qui est inversement proportionnelle à leur diamètre. De petites particules présentes en quantité très faible peuvent jouer un rôle prédominant dans les cours d'eau en raison de leur grande capacité d'adsorption de métaux.

Les mécanismes d'adsorption peuvent être séparés en deux catégories : 1) l'adsorption physique, par suite à des attractions électrostatiques mutuelles entre deux composés et 2) l'adsorption chimique, lorsqu'il y a liaison chimique entre les molécules présentes dans le soluté et un ou plusieurs atomes à la surface du solide.

Les réactions d'adsorption physique sont favorisées, en partie, par la présence de revêtements d'oxyhydroxides de Fe, Mn, Al, Si etc.. La formation de ces revêtements peut apparaître : 1) lors de la décharge de l'eau réductrice d'une nappe phréatique dans une eau oxygénée de surface; 2) à la rencontre d'eaux de surface anoxiques et oxiques; 3) à la jonction de deux eaux de pH différents et 4) lors du mélange de l'eau douce et de l'eau de mer. Les composés organiques, possèdent différents types de complexes à leur surface favorisant l'adsorption (Douglas et al., 1999 ; Sigg et al, 2000; Stummeyer et al., 2001).

Le pH de l'eau est un facteur qui influence l'adsorption chimique et physique des métaux. La figure 3.5 démontre que la fraction de cations fixés à la surface des oxyhydroxides amorphes (surface hydratée d'oxydes qui se forme en milieu aqueux) croît en fonction de l'augmentation du pH. Les charges des revêtements amorphes deviennent positives lorsque le milieu devient acide. Ceci empêche le phénomène d'attraction électrostatique entre surfaces chargées positivement et négativement.

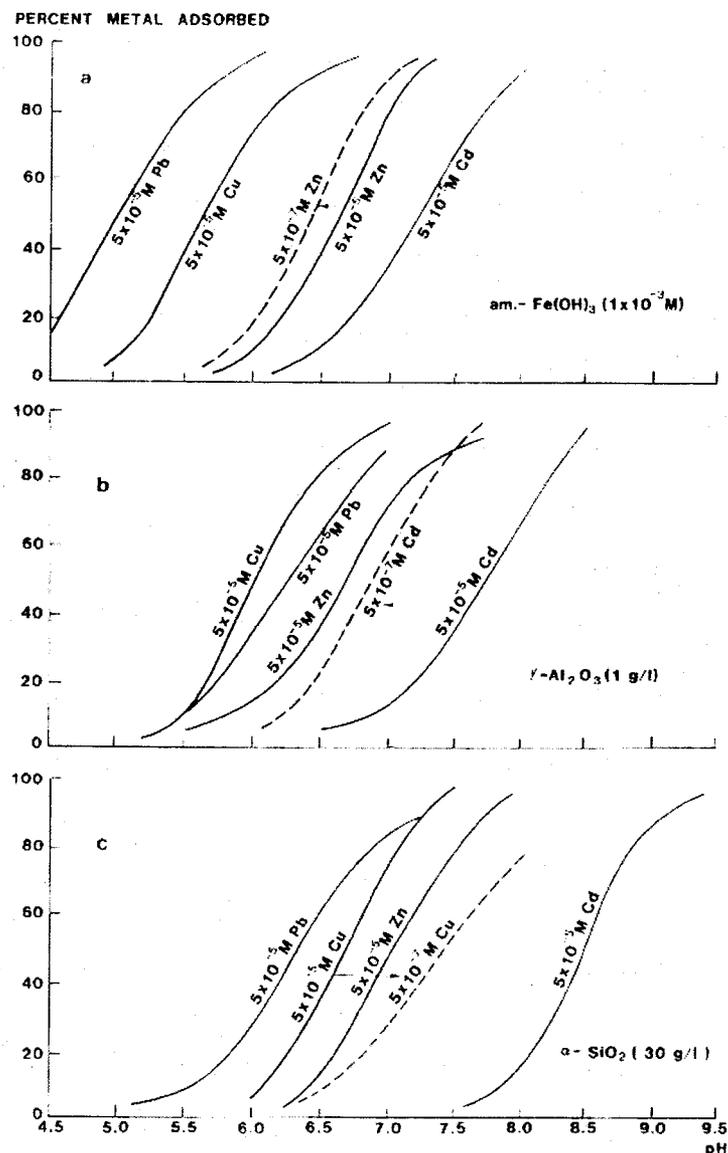


Figure 3.5 : Courbes d'adsorption de différents métaux sur des solides amorphes variant en fonction des variations de pH de l'eau. (Salomons et Förstner, 1984).

La liaison entre des cations et une surface d'oxyde est fonction du pH et s'effectue dans un domaine de pH dépendant des constantes d'équilibre et des concentrations (Sigg et al., 1992). Lors de réactions de surface en milieu naturel, les différents groupes organiques et inorganiques s'influencent mutuellement.

Les interactions entre les composés organométalliques et les surfaces inorganiques sont gérées par les forces électrostatiques. La charge présente à la surface du solide est fonction du pH et tend à devenir négative avec une augmentation de ce dernier. À la figure 3.6 on remarque qu'après le point d'inflexion sur la courbe, la charge négative

domine, ce qui contribuera à l'adsorption des métaux dont la charge est positive. En pH plus acide, les métaux sont préférablement sous la forme dissoute et peuvent se complexer avec différents ligands organiques (phénols, acides aminés, acides acétiques, protéines, glucides, acides humiques et fulviques) et inorganiques (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- et SO_4^{2-}) présents dans l'eau. Les ligands présents dans les eaux naturelles sont très nombreux.

Dans les eaux naturelles, les oxyhydroxides et les carbonates composant la matière en suspension sont des phases importantes (Sigg et al., 1992). L'influence du pH sur ces deux espèces est naturellement marquée. Par contre, en milieu aussi complexe qu'une rivière, les interactions multiples entre les éléments compliquent les interprétations. À l'aide d'extractions séquentielles (ex. Tessier et al., 1979), il est possible d'évaluer avec une plus grande certitude, la concentration des espèces liée aux différentes phases dans la MES.

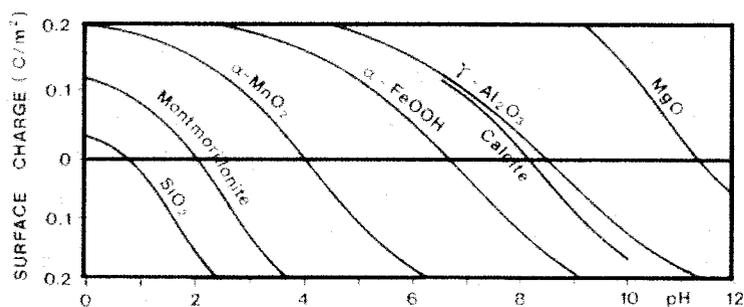


Figure 3.6 : Effet du pH de l'eau sur la charge électrique à la surface de particules inorganiques (Salomons et Förstner, 1984).

Peu importe les mécanismes d'adsorption, les métaux ne sont pas fixés de façon permanente sur la MES et peuvent être remis en solution, revenir sous forme dissoute, ou être adsorbés et jusqu'à co-précipiter sur d'autres composés. En fonction des conditions internes (la composition et caractéristique de la MES) et externes (pH, Eh, la présence de ligands organiques et inorganiques), une redistribution des éléments traces peut prendre place durant le transport et la sédimentation de la MES.

3.4 Études menées sur la rivière Saint-Charles

En raison de la fréquence élevée des déversements des réseaux unitaires dans la rivière, les études publiées sur la rivière Saint-Charles traitent principalement de la qualité de l'eau. L'étude la plus exhaustive est celle de Hébert (1995) portant sur la : *Qualité des eaux du bassin Saint-Charles 1979-1995*. Ce rapport gouvernemental cerne principalement la fraction dissoute, les substances nutritives et différents paramètres physiques et biologiques conventionnels. Des analyses de métaux ont été réalisées pour quelques éléments majeurs (Fe, Al, Mn) et certains métaux traces (Cd, Cr, Cu, Ni et Zn). Toutefois, l'étude ne discute pas de l'impact de la géologie du bassin sur la chimie des eaux et des sédiments de la rivière. On souligne qu'à l'embouchure de la rivière Nelson, des concentrations élevées en aluminium et fer dissous ont été retrouvées. On relie ces concentrations à l'érosion des sols du bassin versant (Hébert, 1995). Le mémoire de maîtrise de Lefebvre (1983) fait à l'INRS-Eau porte aussi sur la mise en évidence de l'impact de la pollution diffuse urbaine sur la qualité de la rivière Saint-Charles mais ne fait pas référence à la géologie du milieu.

D'autres rapports gouvernementaux ont fait suite afin de faire une étude complète du bassin versant tels que: l'hydrologie de la rivière, en particulier les crues de récurrences de 20 ans et de 100 ans, par Barnabé et Lapointe (1989), les planifications et cartographies écologiques par Audet et al. (1997); Lajeunesse et al., (1997), ainsi qu'une étude de la stratigraphie et de la structure des formations rocheuses de la région de Québec (Saint-Julien, 1995).

3.5 Eaux usées urbaines

3.5.1 Rejets des eaux usées urbaines dans la rivière Saint-Charles

La partie urbaine de la rivière Saint-Charles et de ses principaux tributaires situés en amont de cette zone sont contaminés principalement par des coliformes fécaux en raison des faibles débits, des divers ouvrages de surverses et des fosses septiques installées de façon inadéquate en bordure de la rivière (Hébert, 1995).

La décharge directe des eaux usées domestiques change certains paramètres naturels de l'eau de la rivière (ex. Daniel et al., 2002). En particulier, la demande biochimique en oxygène est plus forte (DBO_5) en raison de la décomposition de la

matière organique par les bactéries, ce qui peut changer la spéciation des métaux (forte complexation) en raison d'un milieu qui peut devenir réducteur. Les basses concentrations en oxygène dissous sont souvent accompagnées de concentrations élevées en carbone inorganique dissous (CID) et carbone organique dissous (COD) ainsi que d'une conductivité élevée (Daniel et al. 2002). Des concentrations élevées en phosphore total sont aussi observées (Hébert, 1995).

Le nombre de coliformes fécaux dans les eaux usées brutes peut aller de plusieurs centaines de milliers à des dizaines de millions dans un volume de référence de 100 mL (Environnement Canada, 2002). Pour la rivière Saint-Charles, en période de débordement des égouts, la concentration en coliformes fécaux peut dépasser 50 000 coliformes dans un volume de référence de 100 mL. Selon les indices de qualité de l'eau utilisés par Lefebvre (1983), à l'intérieur de la zone de débordement unitaire de la Saint-Charles, un temps de 24 heures après un minimum de 5 mm de précipitations est nécessaire pour la récupération d'une qualité d'eau autorisant son usage récréatif. Il faut aussi tenir compte que le débit d'une rivière est inversement proportionnel au temps de résidence des eaux (Sañudo-Whitley et Gill, 1999). Selon Grantham (2001), le renouvellement naturel des eaux de la rivière Saint-Charles est de 2 heures en période de crue annuelle et d'environ 6 jours en période d'étiage moyen.

À la fin de la zone de débordement des égouts dans la rivière (basse Saint-Charles), le barrage Samson augmente le temps de séjour de l'eau et favorise la décantation naturelle des particules les plus grossières contenues dans les eaux usées (Degrémont, 1989). Comme on peut le voir au tableau 3.2, les déversements du réseau d'égouts peuvent contribuer à augmenter la concentration en métaux dans les sédiments accumulés près du barrage Joseph-Samson, bien que la granulométrie ne soit pas mentionnée dans la publication source.

Tableau 3.2 : Concentrations en métaux des sédiments de la rivière Saint-Charles prélevés après quelques déversement d'égouts (secteur Marie de l'Incarnation) et après tous les réseaux unitaires d'égouts (barrage Joseph-Samson)

Éléments	Sédiments		
	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm
Secteur Marie de l'incarnation	6,4	81	25,2
Barrage Joseph-Samson	27,1	369,2	76,7
Facteur approximatif d'enrichissement	4,23	4,5	3,0

(Source : Grantham; 2001)

De plus, en raison de la piètre qualité de l'eau, il est fortement défendu de se baigner dans ce secteur en tout temps (Lefebvre, 1983).

3.5.2 Composition générale des eaux usées domestiques

En général, le volume d'eaux usées sanitaires est d'environ 400 litres par année par personne au Canada. Dans ce volume, approximativement 30 % des composés sont suspendus et le reste est dissous. Lors du déversement des eaux usées dans la rivière, les matières en suspension peuvent provoquer une accumulation de boues et induire des conditions anaérobiques extrêmement nuisibles pour la vie aquatique (Environnement Canada, 2002). Les eaux usées sont constituées de composés organiques et de composés inorganiques (métaux lourds, composés azotés, composés phosphorés, matières acido-basiques, composés soufrés, chlorures, matières alcalines et autres matières toxiques) ainsi que de gaz dissous. Le partage entre les composés organiques et inorganiques est d'environ 50%-50%. De cette proportion, 85% à 90% des composés inorganiques et 55% à 60% des composés organiques sont présents sous forme dissoute dans les eaux usées (Environnement Canada, 2002). La concentration des métaux contenus dans ces eaux varie d'une région à l'autre en raison du degré et de la nature de l'industrialisation.

Selon une étude réalisée en Chine, les boues résultantes de la décharge directe des eaux usées dans les canaux *Dagu* et *Beitang*, ville de Tianjin, démontrent après normalisation qu'elles sont enrichies en S, Zn, Cu, Pb, Sb, Bi, Cr, Ni, P et Ba et montrent des concentrations moyennes de carbone organique total (COT) de 15% (Zhang et al. 2002). Les TR analysées dans ces boues semblent provenir de sources uniquement détritiques (Zhang et al. 2001 et 2002).

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

Des échantillons d'eau, de matière en suspension (MES), de sédiments de rivière et de formations superficielles ont été prélevés à différents sites sélectionnés dans les lacs Delage et Saint-Charles, dans la rivière Saint-Charles et sa lisière ainsi qu'en bordure du fleuve Saint-Laurent. Les conclusions de cette recherche sont principalement basées sur les échantillons de MES. Par contre, nous appuierons certaines interprétations en fonction des caractéristiques de la fraction dissoute. D'autres types de prélèvement ont servi à l'analyse et sont brièvement décrits dans l'organigramme méthodologique présenté à l'annexe 3.

4.1 Échantillonnage

4.1.1 Localisation des stations

Les stations d'échantillonnage sont réparties de l'amont vers l'aval de la rivière Saint-Charles et localisées en majorité dans le cours d'eau (fig. 2.1). Les stations S1, S2 et S20 sont situées respectivement à l'exutoire du lac Delage, à l'exutoire du lac Saint-Charles et dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de l'Anse de Sillery.

4.1.2 Fréquence d'échantillonnage

Lors de la première campagne d'échantillonnage, les activités de terrain se sont déroulées sur deux jours: le 10 et le 18 novembre 2000, ce qui correspond à la période d'étiage automnale (voir section 2.1.1). La température froide à cette période a rendu les manipulations et le fonctionnement des appareils électroniques difficiles. La seconde campagne d'échantillonnage a été effectuée en période de descente de crue printanière le 15 mai 2001.

4.1.3 Décontamination de l'équipement

Les bouteilles d'échantillonnage en polypropylène (HDPE et PP) d'une capacité de 125 ml et de 1 L ont été conditionnées à l'acide nitrique (HNO_3 , ACS[®], 10% v/v) et ont ensuite été remplies d'eau déionisée (ED de 18,2 megaohms, système Milli-Q- μV -Plus[®]

de Millipore[®], que nous désignerons par ED) jusqu'à leur usage. Il est à noter que l'ED a été utilisée pour toutes les manipulations de laboratoire.

Les seringues, les embouts (Millipore[®], Swinnex-25) et les portes-filtre pour les métaux particuliers (Nalgène[®] en polysulfone) ont été lavés avec un détergent sans phosphate et rincés trois fois à l'ED. Ils ont ensuite été décontaminés de la même façon que les bouteilles en PP et HDPE. Ils ont été rincés à l'ED et placés dans des sacs Whirlpack[®] jusqu'à leur utilisation. Les filtres en nitro-cellulose, les joints toriques « O-ring » en fluoro-carbone (Viton[®]) et les différents constituants des seringues ainsi que les portes-filtre (pour la fraction dissoute) ont été décontaminés pendant au moins trois jours dans l'acide nitrique (HNO₃, métaux traces[®], 3% v/v). Après leur décontamination, ils ont été conservés séparément dans des boîtes de pétri en polystyrène pré-décontaminées de la même façon.

4.2 Méthode de prélèvement dans la rivière Saint-Charles

4.2.1 Période d'étiage

L'échantillonnage a été réalisé à l'aide de cuissardes qui ont permis de s'éloigner de la rive afin de capter le signal géochimique global des charges particulières et dissoutes de la rivière. En général, la profondeur de prélèvement des échantillons est d'environ 0,40 m de la surface. Une attention particulière a été portée lors de la cueillette afin de ne pas prélever de sédiments soulevés lors des déplacements dans l'eau, l'échantillonnage s'est effectué vers l'amont. Pour la fraction particulière, les échantillons ont été prélevés à chaque site dans deux bouteilles de 1L (PP) pré-décontaminées. Pour recueillir les métaux dissous, l'eau a été filtrée sur place à l'aide d'une seringue et d'un porte-filtre. Le filtrat a été conservé dans une bouteille (HDPE) à 4°C à la noirceur jusqu'à l'arrivée au laboratoire. En présence de berges de béton et de la profondeur d'eau aux sites S16, S17 et S18, il a été impossible d'avoir un accès direct au cours d'eau en cuissardes. L'échantillonnage a donc été effectué à l'aide d'un sceau attaché à une corde. Il est à noter que le récipient a été rincé abondamment avec l'eau du milieu à chaque site avant son utilisation et a été décontaminé avant l'échantillonnage (HNO₃, ACS[®], 10% v/v). La filtration de la MES a été faite en laboratoire au cours des jours suivant l'échantillonnage.

L'acidification pour l'analyse de la charge dissoute a été pratiquée à l'arrivée au laboratoire de l'INRS-ETE.

4.2.2 Période de crue printanière

Certaines modifications méthodologiques ont été adoptées lors de la seconde campagne d'échantillonnage. Les stations ont été répétées à quelques mètres près, à l'exception de la station S18 (située dans la zone bétonnée) qui a été éliminée en raison de la proximité des stations situées en amont et en aval.

4.3 Méthode de prélèvement des échantillons des formations superficielles et de sédiments de rivière

L'échantillonnage des sols et sédiments a été réalisé à deux périodes soit les 15 et 18 octobre 2001 (voir annexe 4). De façon à pouvoir caractériser les principales formations de dépôts meubles du bassin versant de la rivière Saint-Charles, les échantillons ont été localisés à partir de la carte des formations superficielles de Bolduc et al. (2000).

Les sédiments ont été échantillonnés à l'aide d'un carottier (tube en plexiglas de 9,5 cm de diamètre interne et de 50 cm de longueur) décontaminé selon la même procédure que les bouteilles de PP (voir section 4.1.3). Seuls les 15 premiers centimètres à partir de l'interface eau-sédiment ont été conservés dans des sacs Whirlpack® stériles. Les sites qui ne permettaient pas l'utilisation du carottier en raison de la présence de fragments grossiers ont été échantillonnés à l'aide d'une cuillère (PP) décontaminée selon la même procédure que les bouteilles de PP (voir section 4.1.3).

Les sols ont été échantillonnés dans l'horizon C à l'aide d'une pelle et conservés dans des sacs Whirlpack®. Entre chaque site, la pelle a été soigneusement nettoyée à l'aide d'un chiffon propre et de l'eau et notons que le sol immédiatement en contact avec la pelle n'a pas été échantillonné. Au laboratoire, les échantillons ont été placés dans des récipients (PP) pré-décontaminés (HNO₃, ACS, 10% v/v). Par la suite, les échantillons ont été chauffés dans une étuve à 60°C jusqu'à séchage complet. Une partie de chaque échantillon sec a servi pour différentes analyses et l'autre a été conservée pour référence future au besoin.

4.4 Traitement des échantillons

4.4.1 Filtration et prise de données physico-chimiques

4.4.1.1 Fraction particulaire

Par économie de temps, la filtration pour récupérer les métaux particulaires et la mesure de la concentration de MES ont été combinées lors des sessions d'échantillonnage. En novembre 2000, la filtration (environ 2L) a été réalisée dans les jours suivant l'échantillonnage dans la salle ultra trace de l'INRS-ETE sur des filtres de Téflon (Millipore[®], 0,45 µm). Elle a été effectuée sur des portes-filtre Nalgène[®] (polysulfone) couplés à un système de vide imposé par une trompe à eau ou une pompe mécanique à diffusion. Les filtres ont été pré-pesés à l'aide d'une balance électronique Mettler[®] modèle AE 160 de précision 0,1 mg. Les bouteilles d'eau contenant l'échantillon ont été pesées avant la filtration (balance Mettler Bas Bal[®] de précision de 10 mg) et pesées après la filtration dans le but de déterminer le volume d'eau filtré. Le substrat, fraction plus grande que 0,45 µm, recueilli sur le filtre a été séché immédiatement sous une hotte à flux laminaire de classe 100 (norme U.S), c'est-à-dire dans un environnement contenant moins de 100 particules de taille supérieure à 0,2 µm par pied cube d'air. Une fois un poids constant obtenu, les filtres ont été pesés afin de connaître la quantité de MES retenue par volume d'eau filtré. Ils ont été entreposés dans des boîtes de pétri (polystyrène) à 4°C et à la noirceur pendant quelques jours jusqu'à la mise en solution de la MES qu'ils contenaient.

En mai 2001, la filtration de la MES a été faite par des membres de l'équipe du projet, au fur et à mesure de la progression de l'échantillonnage. Pour économiser du temps, nous avons recueilli le filtrat pour les mesures et les analyses devant être réalisées au Laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec en même temps que la MES pour l'analyse des métaux particulaires. De plus, la filtration a duré trois jours comparativement à une semaine pour l'échantillonnage du mois de novembre 2000.

4.4.1.2 Fraction dissoute

Pour recueillir les métaux sous la forme dissoute, l'eau a été échantillonnée à l'aide d'une seringue et d'un porte-filtre Swinex-25 de Millipore®. Le porte-filtre a été fixé au bout de la seringue et contenait un filtre en nitro-cellulose pré-décontaminé (Millipore, 0,22 µm). Le filtrat a été recueilli dans des bouteilles décontaminées d'une capacité de 125 ml (PP). Un volume d'environ 35 ml d'eau brute a été retenu pour les analyses de carbone organique dissous et inorganique dissous (COD et CID). Le reste de l'échantillon a été acidifié à l'acide nitrique (HNO₃, Seastar®, 10% v/v) afin d'imposer la même matrice que les courbes de calibration et de prévenir l'activité bactérienne, l'adsorption des métaux et les échanges ioniques sur les parois internes des bouteilles. La technique d'acidification est différente pour la période d'échantillonnage du mois de mai en raison de l'utilisation d'un spectromètre à émission atomique à source plasma (ICP-AES) de type axial qui est calibré avec une matrice d'acide nitrique plus diluée (HNO₃, Seastar®, 2 % v/v) que celle utilisée avec l'ICP-AES Optima 3000.

4.4.2 Paramètres physiques et physico-chimiques

En novembre 2000, la filtration de l'eau de rivière a été faite *in situ* afin de pouvoir remettre 500 ml de filtrat dans les plus brefs délais au laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec pour la mesure de différents paramètres. La filtration, sur filtre en nitrocellulose (Millipore® 0,45 µm), a été réalisée à l'aide d'une pompe péristaltique (Cole-Parmer system® model no.7553-70 ; 6-600 RPM) et d'une table à filtration (Geofilter de Denver Corporation®) équipée de tube en Tygon. Comme mentionné à l'étape 4.4.1, en mai 2001 le filtrat de la MES a servi pour les analyses effectuées par le Laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec.

Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, l'oxygène dissous et la conductivité ont été mesurés sur le terrain respectivement à l'aide d'un pH-mètre Corning, d'une sonde YSI 90 et d'un conductimètre Hanna. Les paramètres physico-chimiques tel que la conductivité et le pH, ont été mesurés par le Laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec ainsi que la turbidité qui est un paramètre physique. Ces paramètres ont respectivement été mesurés à l'aide d'un conductimètre, un pH-mètre et un turbidimètre.

4.5 Dosages analytiques

4.5.1 Métaux dissous

Différents éléments ont été dosés à partir du filtrat ($< 0,22 \mu\text{m}$) et de la MES digérée. Les échantillons de MES et d'eau ont été analysés à l'aide de trois appareils différents dont deux nécessitant une matrice d'acide nitrique semblable. Le premier instrument utilisé pour doser les éléments ultra-traces et les terres rares est un spectromètre de masse à source plasma (ICP-MS) de modèle VG-PQ2⁺ équipé d'un nébuliseur de type V Groove avec une chambre de type Scott (*double pass*). Pour cette technique analytique, l'écart-type est déterminé avec une précision égale à $2\sigma < 1\%$. Les conditions opératoires sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Conditions opératoires de l'ICP-MS VG-PQ2⁺

Débit de nébulisation	0,9 L min ⁻¹
Débit de gaz (plasma)	14,5 L min ⁻¹
Débit de gaz (auxiliaire)	0,5 L min ⁻¹
Mode d'acquisition « peak jumping »	3 points de masse
Puissance incidente	1,350 kW
Nombre de réplicat	3
Débit de l'échantillon	1 ml min ⁻¹

Il est à noter qu'en fonction de la nature des échantillons et des éléments dosés, ces paramètres opératoires peuvent être modifiés.

Le deuxième appareil est un spectromètre à émission atomique à source plasma (ICP-AES) (modèle Optima 3000) de Perkin Elmer équipé d'un nébuliseur de type *cross flow* et d'une chambre de type *Scott*. Cet appareil a servi à doser les éléments majeurs et certains éléments traces. Voici ses conditions opératoires :

Tableau 4.2 : Conditions opératoires de l'ICP-AES Optima 3000

Débit de nébulisation	0,8 L min ⁻¹
Débit de gaz (plasma)	15 L min ⁻¹
Débit de gaz (auxiliaire)	0,5 L min ⁻¹
Résolution	Normal
Puissance incidente	1,3 kW
Nombre de répliat	3
Débit de l'échantillon	1 ml min ⁻¹

En raison de la diminution de concentration des métaux contenus dans la phase dissoute causée par la fonte des neiges au printemps (dilution), les éléments majeurs et traces ont été dosés par un spectromètre à émission atomique à source plasma (ICP-AES) axial de la compagnie Varian (modèle Vista AX) équipé d'un nébuliseur de type *Concentric* et d'une chambre de type *Cyclone*. Le détecteur axial permet d'atteindre de meilleures limites de détection pour certains éléments. Voici ses conditions opératoires :

Tableau 4.3 : Conditions opératoires de l'ICP-AES Vista AX

Débit de nébulisation	0,9 L min ⁻¹
Débit de gaz (plasma)	15,0 L min ⁻¹
Débit de gaz (auxiliaire)	1,5 L min ⁻¹
Résolution	Normal
Puissance incidente	1,3 kW
Nombre de répliat	3
Débit de l'échantillon	0,9 ml·min ⁻¹

4.5.2 Carbone organique et inorganique dissous

Les concentrations en carbone organique dissous (COD) et en carbone inorganique dissous (CID) ont été mesurées pour les échantillons de novembre 2000 et de mai 2001. Les analyses ont été réalisées avec un appareil de marque Shimadzu® (TOC-5000A). Le principe de l'analyse du carbone total (CT) repose sur une combustion complète d'un volume connu d'échantillon. Tout le carbone présent est transformé en CO₂ puis analysé dans une cellule infrarouge. Un volume d'échantillon connu est ensuite injecté dans une solution d'acide phosphorique 25% (v/v). Tout le carbone inorganique dissous (CID) (bicarbonates, carbonates et acides carboniques) est transformé en CO₂ et analysé dans la même cellule infrarouge. Nous obtenons le COD par soustraction du CID au CT.

4.5.3 Les anions

Les anions ont été analysés, dans les deux séries d'échantillons, au Laboratoire de l'Environnement de la Ville de Québec.

Les sulfates (SO₄²⁻) ont été mesurés à l'aide d'un turbidimètre. Ces anions présents dans chaque échantillon réagissent avec du chlorure de baryum pour former un composé insoluble: le sulfate de baryum (barite). Ceci a pour effet d'augmenter la turbidité de l'échantillon et la teneur en sulfate est obtenue par une mesure turbidimétrique.

Les chlorures ont été dosés par titration. Ils sont titrés avec une solution de nitrate d'argent. Le point de virage est détecté au moyen d'une solution de chromate de potassium.

Les nitrites et nitrates inorganiques ont été dosés par la méthode Kjeldahl. Cette méthode consiste en une distillation et un ajout d'hydroxyde de sodium. L'ammoniac libéré de cette réaction est ensuite distillé, recueilli dans un excès connu d'une solution étalon acide, et dosé par titrage en retour par une base étalon.

La dureté a été dosée par titration. Les ions responsables de la dureté (principalement le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺)) sont titrés avec une solution d'EDTA. Le point de virage est mis en évidence par l'ajout de noir d'ériochrome T.

4.5.4 Métaux particulaires

Les fractions particulaires récoltées lors des deux périodes d'échantillonnage ont été dosées à l'ICP-MS et l'ICP-AES selon les mêmes conditions opératoires énoncées aux tableaux 4.1 et 4.2. Le mode de mise en solution adopté consiste en une digestion acide (mélange de HNO₃, HF et HClO₄) de la MES retenue sur les filtres de Téflon®. Le protocole de mise en solution de cette fraction est expliqué en détail à l'annexe 8.

La fraction inférieure à 63 µm des échantillons de formations superficielles (après tamisage) et des sédiments de rivière ont été mis en solution et dosés à l'ICP-MS et ICP-AES selon les conditions opératoires présentées aux tableaux 4.1 et 4.2. En raison d'une plus grande quantité de matériel disponible, les échantillons de sols et de sédiments ont été mis en solution par la technique de fusion au métaborate de lithium (LiBO₂) pour s'assurer d'une destruction complète des minéraux accessoires réfractaires (ex. zircon, titanite, etc...) pouvant être présents dans les échantillons. Afin de contourner la contamination en lithium induite par cette technique et le fait que nous devons fortement diluer les échantillons (effets de matrice), nous avons aussi réalisé une digestion totale sur une autre partie de l'échantillon.

Une digestion partielle à l'aide d'une solution HCl 1M a été faite sur une partie des échantillons (fraction < 63 µm) de formations superficielles et de sédiments de rivière (annexe 9). Cette dernière a pour but d'estimer approximativement la proportion de métaux les moins fortement liés aux différentes particules organiques et inorganiques, qui sont donc par le fait même les plus susceptibles d'être solubilisés en milieu faiblement acide. Le protocole de mise en solution de cette fraction est présenté en détail à l'annexe 4.

4.5.5 Matière en suspension

La concentration de la matière en suspension présente dans les échantillons d'eau a été déterminée lors de la filtration des échantillons (voir section 4.5.1.1).

4.6 Granulométrie

Afin de connaître la répartition granulométrique complète de chaque échantillon de formations superficielles et de sédiments de rivière, une masse connue de chaque échantillon a été passée dans une colonne de tamis calibrés fait d'acier inoxydable. Lors du tamisage, les mailles des tamis étaient de: 8 mm (2,5mesh), 4 mm (5 mesh), 2 mm (9 mesh), 1 mm (16 mesh), 500 μm (32 mesh), 250 μm (60 mesh), 125 μm (115 mesh) et 63 μm (250 mesh). Chacune des fractions respectives a été pesée. Le deuxième objectif était de séparer la fraction plus petite que 63 μm pour permettre les analyses géochimiques et aussi l'analyse des fractions plus fines au granulomètre Laser (fraction < 63 μm).

Ainsi, 0,1 g de la fraction fine (< 0,063 mm) a été analysé par granulométrie Laser (Analysette 22 de Fritsch®) jusqu'à une granulométrie minimale de 0,16 μm .

4.7 Diffraction des rayons-X

La diffraction des rayons-X a été nécessaire afin de connaître les différents minéraux présents dans la fraction inférieure à 63 μm . Les analyses ont été faites au laboratoire de diffraction X du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. Ce laboratoire opère avec deux diffractomètres, un Siemens D-5000® et un Philips PW-1050®.

4.8 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le MEB a permis de faciliter l'interprétation des analyses chimiques grâce à l'analyse des textures et de la morphologie des particules de matière en suspension. L'instrument utilisé est un JSM-6400. Deux échantillons de MES, prélevés en novembre 2000, ont été choisis pour cette analyse. L'échantillon S4 a été prélevé en amont de la rivière Saint-Charles et l'échantillon S20 en bordure du fleuve Saint-Laurent. Contrairement aux autres microscopes, tel que le microscope à transmission électronique qui forme une image à partir des électrons transmis, le MEB produit une image à partir des électrons réfractés à la surface de l'objet. Il permet entre autre de réaliser des grossissements de 10 à 300 000 fois ainsi que l'analyse des images au niveau de la texture

et de la composition chimique. La méthode utilisée est décrite à l'annexe 10.

4.9 Contrôle de qualité

Des contrôles de qualité d'analyse (annexes 13, 15 et 17) ont été réalisés en utilisant des échantillons de sédiments certifiés de nature et de concentrations semblables aux échantillons prélevés (NIST : *National Institut of Standards and Technology*; SRM *Standard Reference Material*). Le SRM 1645 est un sédiment de rivière dragué du fond du *Indiana Harbor Canal* près de Gary dans l'état de l'Indiana (É-U.A). Le SRM 1646a est un sédiment d'estuaire dragué dans la baie de Chesapeake dans l'état de Virginie (É-U.A). Ce standard a aussi été utilisé lors des attaques partielles afin de vérifier la reproductibilité de la technique.

Le standard d'eau utilisé est le TM-24.2 (Sample 3) dans une matrice de HNO_3 2 % (v/v). Ce dernier, utilisé comme standard inter-laboratoires, a été dosé en partie par les laboratoires d'Environnement Canada (Montréal, Québec) et par l'Institut National de Recherche sur les Eaux (Burlington, Ontario). Les valeurs « attendues » sont conséquemment tirées d'une compilation des résultats d'analyses (moyennes et écarts-types).

Pour le dosage des isotopes du plomb, le standard utilisé est le NIST 981 qui consiste en un fil de plomb hautement purifié à 99,9 %.

Pour valider les terres rares, nous avons utilisé un standard provenant de l'USGS (United States Geological Survey) soit le Icelandic Basalt BIR-1. Ce standard est un échantillon de tholéiite à olivine du groupe Reykjavik (Islande) formée lors de la cristallisation de coulées de lave datant de la plus jeune période interglaciaire.

Il est à noter que les échantillons de MES analysés ne contenaient que quelques milligrammes de sédiments (généralement < 10 mg). Par conséquent, nous avons utilisé de petites quantités de standards (sous forme de poudre) afin d'évaluer la quantité de MES présente dans la rivière. Mais, il est important de souligner que lorsqu'on prélève un petit aliquot de standard certifié, il présente souvent une forte hétérogénéité. Le transport des échantillons et les années de conservation peuvent entraîner une séparation des particules fines et grossières, ce qui peut accentuer l'hétérogénéité des échantillons.

Ces deux phénomènes peuvent expliquer des variations observées entre les teneurs mesurées et celles certifiées (annexes 13, 15 et 17) .

4.10 Blancs analytiques

Dans le cas de l'analyse de la phase dissoute, l'ED du laboratoire a été filtrée, acidifiée et analysée pour les éléments majeurs, traces et ultra-traces en même temps que les échantillons prélevés en novembre 2000. Pour chaque série de 20 échantillons, trois blancs ont été insérés pour l'analyse. Ces blancs tiennent compte des risques de contamination due aux flacons, aux différents réactifs et aux traitements effectués sur les échantillons provenant de la rivière et des lacs (annexes 12, 14 et 16).

Pour la phase particulaire, des « blancs réactifs » ont été insérés et ont suivi les échantillons du début de la méthode de digestion jusqu'à la fin. De plus, des « blancs papiers » contenant des filtres Millipores® préalablement conditionnés et sans MES ont suivi, en même temps, la procédure de digestion des échantillons. Ces blancs ont été analysés pour les mêmes éléments que les échantillons (annexes 12, 14 et 16).

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les données de débit de la rivière Saint-Charles, les données météorologiques du bassin versant, les principaux paramètres physico-chimiques de l'eau, les observations minéralogiques (MEB) sur la MES ainsi que les données géochimiques telles que la distribution des éléments majeurs et traces de la MES des eaux de la rivière Saint-Charles et de ses principaux tributaires. Ces données sont présentées pour les 2 périodes d'échantillonnage (novembre 2000 et mai 2001). La géochimie et les observations minéralogiques (diffraction-X) sur les formations superficielles et les sédiments sont abordées à la fin de ce chapitre afin d'apporter des précisions sur certaines caractéristiques géochimiques de la MES.

5.1 Débits et données météorologiques

5.1.1. Les débits

Le débit de la rivière Saint-Charles est mesuré quotidiennement par le Centre de connaissances et d'expertise hydrique du Ministère de l'Environnement du Québec (MENV). La station de mesures, située au milieu de la rivière Saint-Charles, est localisée à 0,8 km en amont de la rivière Lorette. Ce site est équivalent à la station d'échantillonnage S11 de notre étude (fig. 2.1). Les débits journaliers moyens (fig. 5.1 et annexes 5.1 à 5.4) sont calculés à partir de mesures prélevées automatiquement à toutes les 15 minutes et servent à estimer les fluctuations saisonnières du volume d'eau drainé par la rivière Saint-Charles. Le débit de la rivière Saint-Charles est en partie contrôlé par les 5 barrages situés au long de la rivière. Ces derniers permettent de préserver la réserve d'eau potable de la ville de Québec et d'amoindrir les effets des crues et des étiages (ex. Hébert, 1995 ; Lajeunesse et al., 1997).

Entre octobre 2000 et novembre 2001, le débit minimal et le débit maximal ont été atteints à l'été et au printemps respectivement. Ces débits étaient de $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ le 9 août 2001 et de $43,03 \text{ m}^3/\text{s}$ le 25 avril 2001. Lors de l'échantillonnage du 10 et du 18 novembre 2000, les débits ont varié de $1,78 \text{ m}^3/\text{s}$ à $5,91 \text{ m}^3/\text{s}$. On peut considérer ces

débites similaires à ceux de la rivière lors de l'échantillonnage du 15 mai 2001. À ce moment, le débit était de $5,94 \text{ m}^3/\text{s}$.

Notons toutefois que l'environnement sédimentaire est différent en mai 2001 car l'échantillonnage fait suite à une période majeure de crue de 4 à 5 semaines. Les hauts débits de la rivière permettent une importante remise en suspension de sédiments et une érosion importante du lit et des berges de la rivière.

5.1.2 Température et précipitations

Les données météorologiques annuelles ont été présentées au chapitre 2 à la section 2.3. Les données météorologiques lors de la période d'échantillonnage ont été mesurées par le MENV à une station météorologique située dans la région de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier à une altitude de 130 mètres ($46^{\circ}50'N$; $71^{\circ}70'O$). Les données provenant de cette station sont représentatives des conditions météorologiques affectant la haute Saint-Charles et surtout le bassin des lacs Delage et Saint-Charles.

En l'absence de gel au sol, l'intensité des précipitations peut expliquer en partie les variations de la concentration de la MES dans les eaux de la rivière. Ceci reflète l'érosion des berges et des terrains agricoles du bassin versant ainsi que les débordements des égouts pluviaux et municipaux dans la rivière pour les stations situées dans la section avale (S15 à S18). Notez que lors de précipitations importantes, les dépôts quaternaires dans le bassin versant peuvent être localement érodés et transportés vers les cours d'eau par les eaux de ruissellement.

À la figure 5.1, on remarque un couplage entre l'intensité des précipitations et le débit de la rivière en période de faible crue. À l'opposé, à d'autres périodes il n'y a aucune corrélation entre l'importance des précipitations et le débit de la rivière Saint-Charles. La ville de Québec contrôle les débits aux barrages situés le long de la rivière Saint-Charles en ouvrant ou en fermant les vannes. Lors de la période de crue printanière (mai 2001), le pic maximal n'est pas relié à l'intensité des précipitations mais reflète probablement le processus de fonte des neiges (fort ruissellement). De plus, le déphasage entre les fortes précipitations de décembre 2000 et la crue observée vers la fin décembre 2000 ne fait que confirmer l'effet des barrages.

Notons qu'il n'y a eu aucune précipitation le jour précédent l'échantillonnage du 10 novembre 2000 (annexe 18). Le refoulement des égouts, dû aux précipitations du 10 novembre 2000, entre 10 heures et 12 heures, n'a pas affecté l'échantillonnage car le prélèvement d'échantillons concernait seulement l'amont de la zone urbaine. Les sites affectés par l'urbanisation ont été échantillonnés le 18 novembre 2000. Des précipitations ont été enregistrées à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, le 17 novembre 2000 pour une accumulation totale de 20 millimètres. Il n'y a eu aucunes précipitations importantes le jour précédent l'échantillonnage du 15 mai 2001 et le jour même de l'échantillonnage.

Notez que les échantillons des stations S18 à S20 sont influencés par des processus de mélange impliquant la MES provenant du Saint-Laurent. Nous avons échantillonné ce secteur de la rivière Saint-Charles à marée montante (voir annexe 22) le 18 novembre et à marée descendante le 15 mai 2001.

Les moyennes de précipitations sont semblables pour les mois de novembre 2000 et de mai 2001 (8,6 mm versus 7,6 mm). Par contre, la moyenne des températures du mois de novembre 2000 est nettement plus froide ($-0,1^{\circ}\text{C}$) que celle du mois de mai 2001 ($11,6^{\circ}\text{C}$). Notons que le température chaude de l'été a un effet sur l'évaporation de l'eau et contribue à diminuer les débits des petites rivières. De plus, en période estivale la consommation d'eau de la ville de Québec est extrême et parfois le lit de la rivière devient pratiquement sec dans la partie amont. L'ouverture des vannes des barrages de la rivière Saint-Charles en amont de la station de mesure du débit, induit parfois des périodes de crue et d'étiage indépendantes des périodes naturelles.

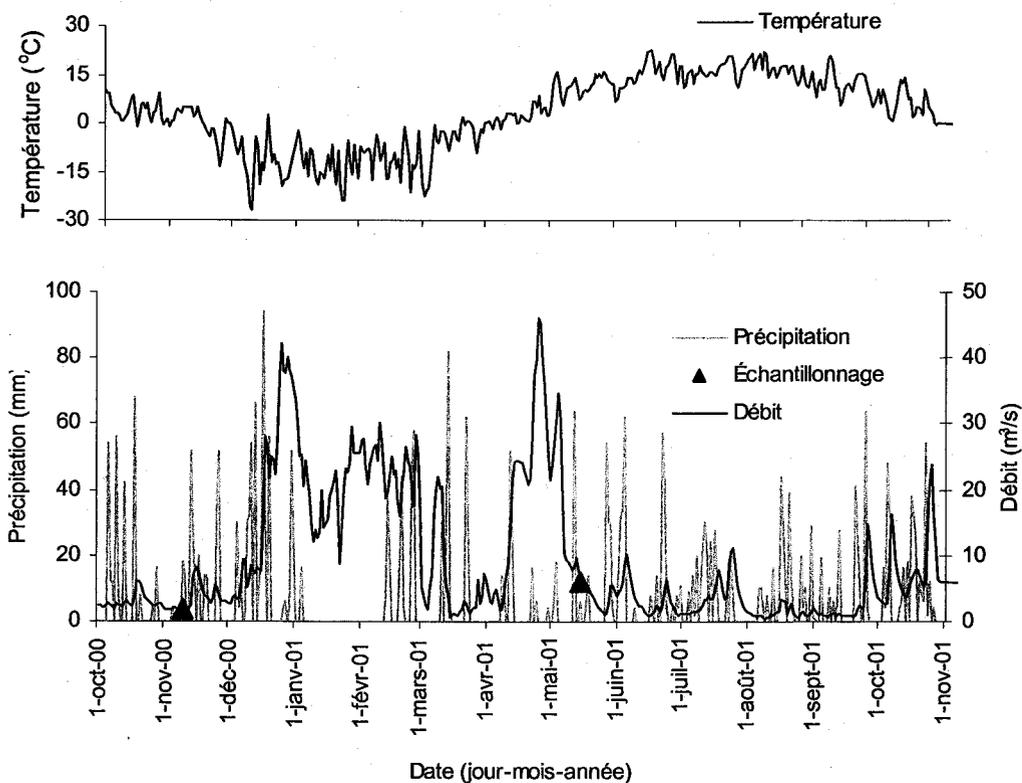


Figure 5.1 Variation des débits moyens journaliers de la rivière Saint-Charles à Québec et variation des températures et des précipitations moyennes journalières à la station météorologique d'Environnement Québec (MENV) située à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (octobre 2000 à novembre 2001).

5.2 Concentration de la matière en suspension

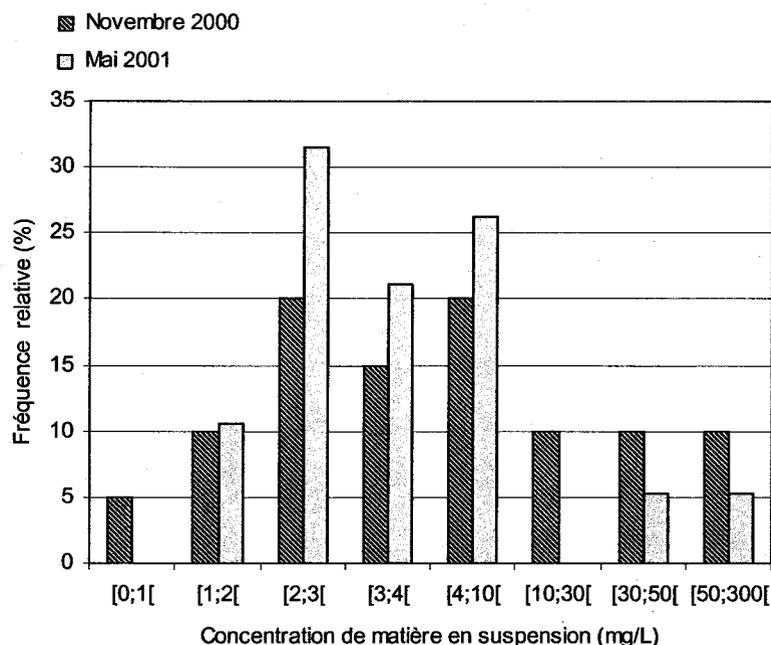


Figure 5.2 : Histogramme de la distribution des concentrations de matière en suspension (> 0,45 µm) mesurées aux 20 stations d'échantillonnage dans la rivière Saint-Charles en novembre 2000 et en mai 2001.

Les concentrations de la matière en suspension augmentent de l'amont vers l'aval de la rivière et varient de 0,1 à 66,5 mg/L en novembre 2000 et de 1,3 à 234 mg/L en mai 2001 (annexe 23). Les concentrations minimales ont été observées en novembre 2000 au lac Delage (S1) et en mai 2001 à la station S10 située à 25 kilomètres en aval du lac Delage. Les concentrations maximales de MES de novembre 2000 ont été mesurées à la station S18 située à 47 kilomètres de l'amont et en mai 2001 à la station S19 située à 50 kilomètres de l'amont.

La figure 5.2 montre qu'en novembre 2000, les fréquences de concentrations de la matière en suspension recueillie aux 20 stations sont réparties d'une façon plus uniforme dans toutes les classes de concentrations comparativement au mois de mai. Par exemple, en mai 2001, 89 % des échantillons de MES recueillie montrent des concentrations entre 1 et 10 mg/L. Cette tendance montre qu'à la majorité des stations d'échantillonnage, nous avons obtenu des concentrations de MES allant de 1 à 9 mg/L. En novembre 2000, 69 % des échantillons récoltés tombent dans cette gamme de

concentrations. À la même période, 30 % des stations montrent des concentrations de MES au-dessus de 10 mg/L. Ceci montre qu'à certaines stations la quantité de sédiments en suspension est plus élevée au mois de novembre.

Comme on peut le voir à la figure 5.3, c'est environ à 40 kilomètres de l'amont (vers la station S15) de la rivière que les concentrations de MES augmentent le plus. Cette zone correspond à la zone aménagée par la ville de Québec. À environ 3 kilomètres en aval (S16) de cette zone, le secteur bétonné de la rivière Saint-Charles débute. Considérant la similarité des variations de concentration de la MES des échantillonnages de novembre 2000 et mai 2001 (échantillonnages sans fortes précipitations), on peut considérer comme négligeable l'impact des rejets urbains sur les échantillons prélevés. En raison de l'importance des variations de concentration observées, l'échelle logarithmique de la figure 5.3 permet de visualiser la tendance générale et d'intégrer l'ensemble des données dans le même graphique. Bien que le MENV ait fourni des données annuelles sur la concentration de la MES dans la rivière Saint-Charles, la majorité des données gouvernementales sont en-dessous de la limite de détection (< 2 mg/L) de l'appareil de mesure. Ainsi elles ne peuvent être présentées et même statistiquement interprétées.

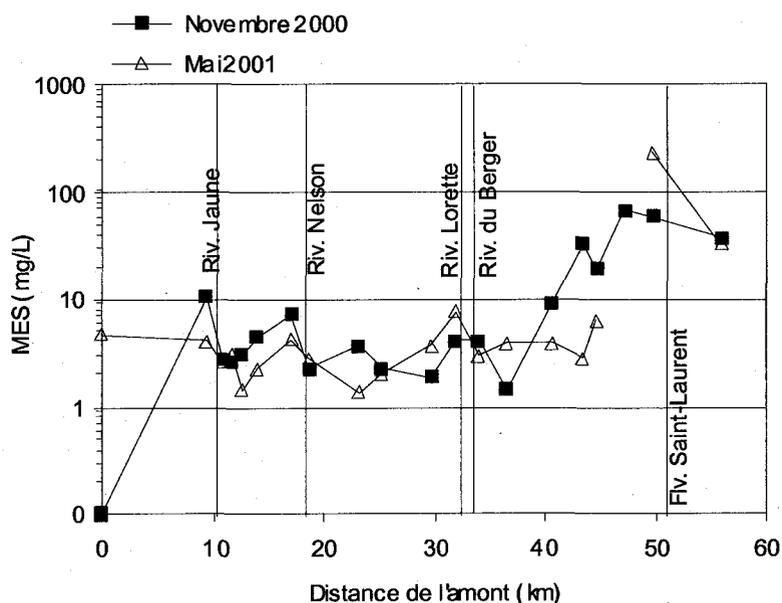


Figure 5.3 Variation de la concentration de la matière en suspension des eaux de la rivière Saint-Charles de l'amont vers l'aval pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. Notez que les droites verticales correspondent à la position de la jonction des tributaires secondaires de la Saint-Charles.

5.3 pH, conductivité, alcalinité et dureté des eaux de la rivière Saint-Charles

5.3.1 Mesures ponctuelles

En général, le pH, la conductivité, l'alcalinité et la dureté de l'eau augmentent de l'amont vers l'aval et suivent une distribution semblable (fig. 5.4). Les valeurs de ces paramètres sont légèrement plus élevées en novembre 2000 qu'au mois de mai 2001. Au printemps, ce phénomène reflète probablement un facteur de dilution plus élevé par les eaux de ruissellement provenant de la fonte des neiges. Notons que les valeurs minimales (7,2) et maximales (8,0) de pH pour les deux périodes d'échantillonnage ont été respectivement mesurées aux mêmes endroits soit au lac Delage et dans le fleuve Saint-Laurent. Les stations d'échantillonnage S19 et S20 sont influencées variablement par les eaux du fleuve Saint-Laurent selon le cycle des marées. Le pH et la conductivité des eaux du fleuve sont fortement influencés par la présence des eaux provenant du bassin hydrographique des Grands Lacs et des tributaires drainant la rive sud du Saint-Laurent (terrains appalachiens) (Tremblay, 1997). Les roches de la zone des Grands Lacs et des

Appalaches contiennent des unités géologiques riches en cations basiques (calcaires, dolomies, grès et roches volcaniques).

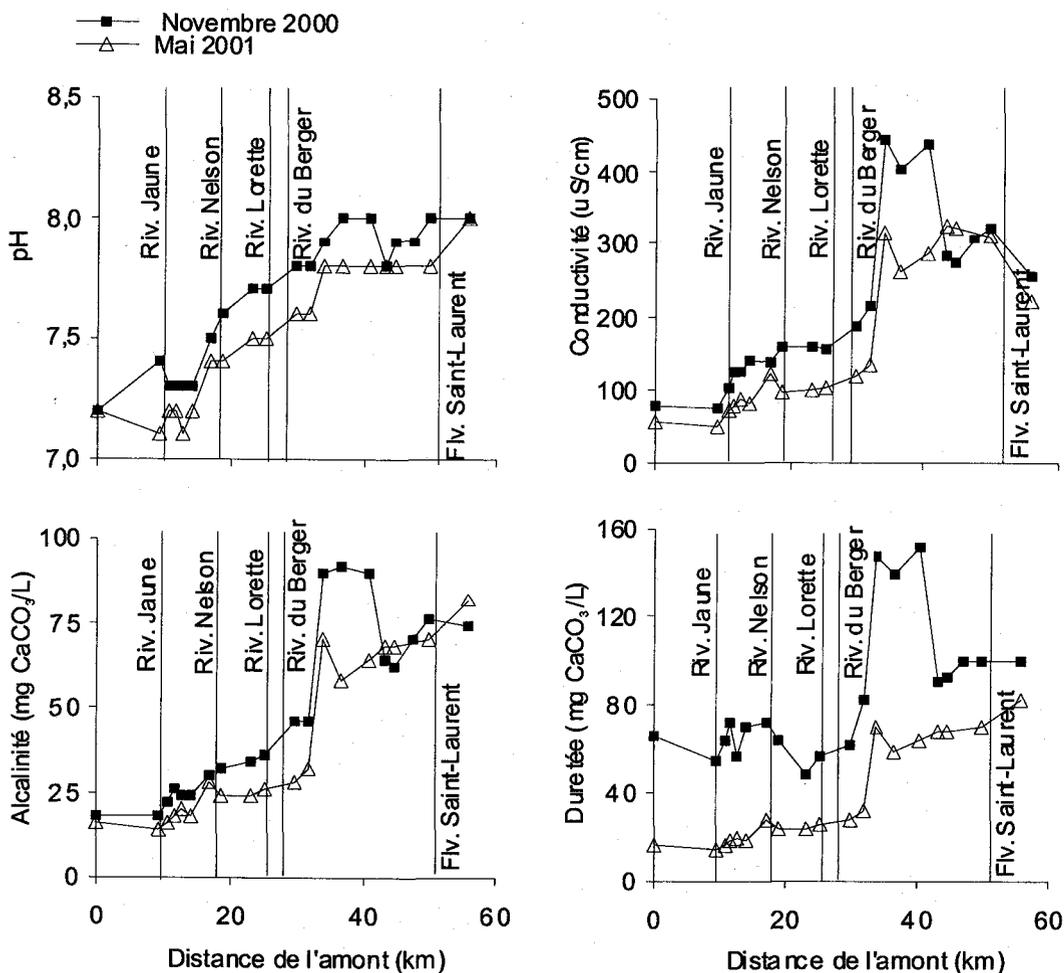


Figure 5.4 Variations des paramètres physico-chimiques pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.

Le long de la rivière Saint-Charles, la conductivité électrique de l'eau varie beaucoup. Les plus faibles valeurs de conductivité ont été mesurées à la sortie du lac Saint-Charles (station S2). Pour cette station, aux deux périodes d'échantillonnage nous avons obtenu 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 49 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement en novembre 2000 et mai 2001. Ce site est situé dans la province géologique du Grenville où on trouve des roches granitiques et gneissiques et des tills quaternaires de dérivation locale particulièrement résistants aux

processus de météorisation chimique. Ainsi il est normal de mesurer de faibles valeurs de conductivité dans ces eaux.

Les valeurs de conductivité maximale observées se situent dans le segment de la rivière drainant les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent entre 34 et 41 kilomètres de l'amont (stations S13, S14 et S15). Dans ce secteur, les valeurs de conductivités atteignent 400 à 437 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'échantillonnage du mois de novembre.

La dureté de l'eau est exprimée en concentration de carbonate de calcium (CaCO_3) et est égale à la concentration totale (mg/L) des cations de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) présents dans l'eau (ex. Sigg et al., 2000) filtrée sur un filtre de 0,22 μm . C'est une propriété de l'eau qui se manifeste entre autre par une difficulté à former de la mousse avec du savon.

L'alcalinité mesure la capacité de l'eau à pouvoir neutraliser un acide et on exprime cette dernière par la concentration de carbonate de calcium (CaCO_3). Le pouvoir tampon des eaux naturelles est dominé par les cations basiques (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+}) et par les anions acides (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^{2-}) dissous dans l'eau. Chaque augmentation de concentration d'un cation basique augmente l'alcalinité alors que l'apport d'un anion acide diminue l'alcalinité.

Dans la rivière Saint-Charles, la conductivité, la dureté et l'alcalinité montrent une augmentation subite vers 35 kilomètres de l'amont. Ces trois paramètres varient de la même façon reflétant probablement la présence de formations géologiques de la Plate-forme du Saint-Laurent particulièrement riches en unités carbonatées. Notons que l'enrichissement observé ne peut s'expliquer par un simple mélange avec les eaux du fleuve. Ces dernières montraient au moment de l'échantillonnage une conductivité inférieure à celle observée vers 35 kilomètres de l'amont (fig. 5.4).

Les variations de concentrations en cations majeurs dissous, tels que le Ca et le Mg, semblent refléter la nature des régions géologiques traversées par les rivières (ex. Rhodes et al.; 2001). Les eaux drainant le secteur grenvilien, riche en granite et gneiss, sont peu conductrices et caractérisées par des concentrations en ions majeurs dissous beaucoup plus faibles qu'en aval où le cours d'eau rencontre des unités géologiques carbonatées de la Plate-forme du Saint-Laurent. Ainsi la dissolution congruente de la calcite et de la dolomite présentes dans les calcaires et les dolomies pourraient facilement

expliquer le transfert d'une proportion importante de calcium et magnésium dans les eaux de la rivière Saint-Charles.

Tout en étant conscient qu'il convient de définir la barrière entre le dissous et le solide (0.45 μm) il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'une définition opérationnelle. Une quantité importante de matériel colloïdal (inférieur à 0.45 μm) peut être présente dans les eaux de la rivière et être sujet à des phénomènes de coagulation lors de l'augmentation de la force ionique. Des techniques par ajout d'ions sont employées lors du traitement de l'eau pour permettre une coagulation des particules colloïdales. De tels processus de coagulation sont certainement présent dans le milieu naturel et donneront lieu à des zones de turbidité maximale lors d'un accroissement ionique. À mon avis, des phénomènes de coagulation de particules colloïdales sont aussi présents dans la rivière Saint-Charles. L'augmentation de la MES versus la conductivité (fig.5.3 et 5.4) est peut être le reflet de ces phénomènes (Bergeron M., com. pers., 2004).

5.3.2 Mesures annuelles

Les variations annuelles du pH et de conductivité des eaux de la rivière (fig. 5.5, annexe 18) peuvent être en partie influencées par le processus de la fonte des neiges au printemps. À ce moment de l'année, les sels déglaçants sont libérés en grandes quantités et une proportion importante de ces sels atteint la rivière par ruissellement et aussi par les canalisations des égouts pluviaux. Notez que la station de mesure du MENV est située à 22 kilomètres du fleuve (équivalent à S10, figure 2.1) et subit l'influence de quelques boulevards et avenues traversant la rivière en amont par des ponts ou longeant de près le cours d'eau (ex. Avenue Chauveau, Boulevard Johnny-Parent et Boulevard Saint-Jacques).

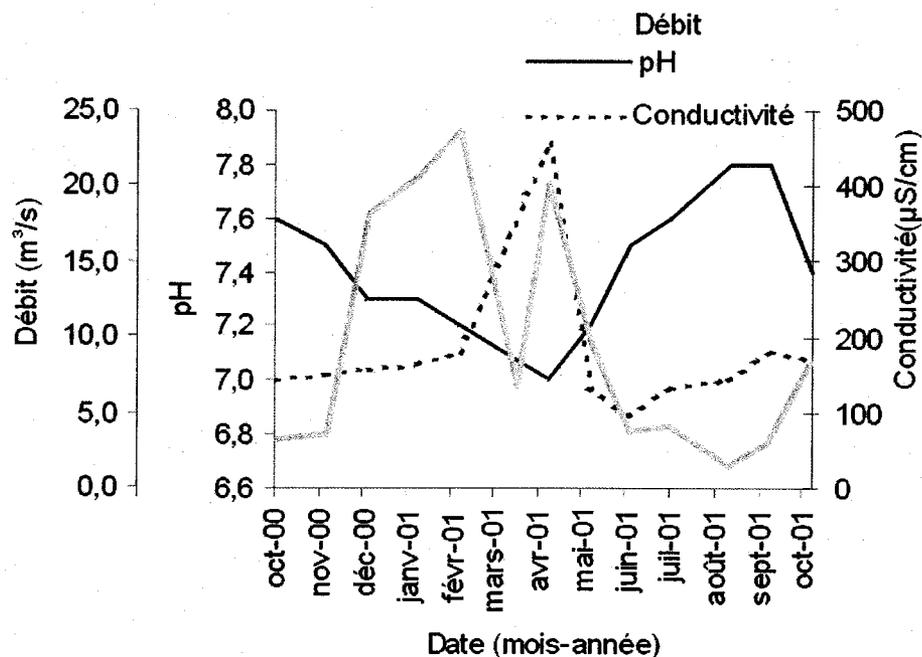


Figure 5.5 : Variations annuelles du débit, de la conductivité et du pH des eaux de la rivière Saint-Charles. Données prélevées à une station fixe du MENV située dans la rivière Saint-Charles à 22 km du fleuve. Ce site est équivalent à la station S10 de la figure 2.2.

Le pH diminue de janvier à avril pour atteindre sa valeur moyenne minimale annuelle en avril 2001 avec 7,0 lors de la période de crue printanière. À partir de mai, ce paramètre augmente pour atteindre une valeur maximale de 7,8 en août 2001 lors de la période d'étiage. Le pH semble varier de la même façon que le débit de la rivière du mois d'avril jusqu'au mois de juin 2001. La diminution de pH à cette période peut refléter un lessivage plus important d'acides fulviques en provenance des sols forestiers. Par contre, le pH est inversement proportionnel de juin à octobre 2001 et ne semble pas être influencé par l'augmentation du débit de novembre à février. Les fortes valeurs de pH observées en période d'étiage estivale témoignent probablement d'une provenance des eaux dominée par des sources souterraines situées en terrains calcaires ou dolomitiques. La conductivité varie inversement au pH d'octobre 2001 à juin 2001. À la mi-mars 2001 l'augmentation du débit semble influencer la conductivité. Notez que, le débit de la rivière Saint-Charles étant contrôlé par cinq barrages, on ne peut pas relier directement ces variations aux paramètres météorologiques.

5.4 Ions chlorures et sulfates

La figure 5.6 présente les variations des concentrations en ions chlorures (Cl^-) et sulfates (SO_4^{2-}) en fonction de la distance (annexe 23). En raison de la grande distance au front estuarien, les concentrations en ions chlorures sont principalement reliées à la dissolution de sels pour les stations d'échantillonnage situées en milieu urbain. Les concentrations en sulfates sont probablement reliées aux activités anthropiques tels que la combustion des combustibles fossiles. Cette combustion produit des sulfates qui retombent sous la forme d'aérosol et de précipitations acides. Il est probable qu'une proportion significative des sulfates provienne de la dégradation de la matière organique. Notons que parfois les eaux naturelles souterraines peuvent être enrichies en sulfates en raison de la présence d'unités évaporitiques associées aux roches carbonatées (LaFlèche M., com. pers., 2002). De plus, dans des secteurs fortement impactés par l'agriculture, des processus de dénitrification des eaux souterraines peuvent impliquer l'oxydation de la pyrite (FeS_2) en sulfates.

En général, dans la rivière Saint-Charles, les concentrations des anions sont plus élevées en novembre qu'en mai. Aux deux périodes d'échantillonnage, les concentrations en Cl^- doublent à 35 kilomètres de l'amont. Dans le secteur des stations de la zone bétonnée (soit de S15 à S19), les concentrations du mois de mai dépassent celles de novembre.

En novembre 2000, les concentrations en SO_4^{2-} sont plus élevées qu'au mois de mai 2001 et ce particulièrement à partir de 35 kilomètres de l'amont. Cette partie de la rivière reçoit des proportions importantes d'eau de ruissellement par le système de canalisation des eaux de pluie. Notons que les teneurs en SO_4^{2-} des précipitations conventionnelles peuvent varier entre 0,005 mg/L à 2,5 mg/L selon la proximité des centres urbains (Horne et Goldman, 1994).

Comme les ions Cl^- et SO_4^{2-} contribuent significativement à la charge ionique de l'eau, ils sont fortement corrélés avec la conductivité (fig.5.7). Selon Rhodes et al. (2001), les concentrations en Cl^- dans les cours d'eau augmentent en fonction de la densité des réseaux routiers. Il faut souligner de plus que dans le secteur urbain et bétonnée de la rivière Saint-Charles, les abondances en chlorures et sulfates sont plus élevées que dans les eaux du fleuve Saint-Laurent. Ceci montre que les variations

géochimiques observées dans l'eau entre les 11^{ème} et 18^{ème} stations ne peuvent s'expliquer par un simple processus de mélange entre les eaux de la Saint-Charles et celles du Saint-Laurent. Elles impliquent l'arrivée d'une nouvelle source probablement associée aux eaux de ruissellement en milieu urbain.

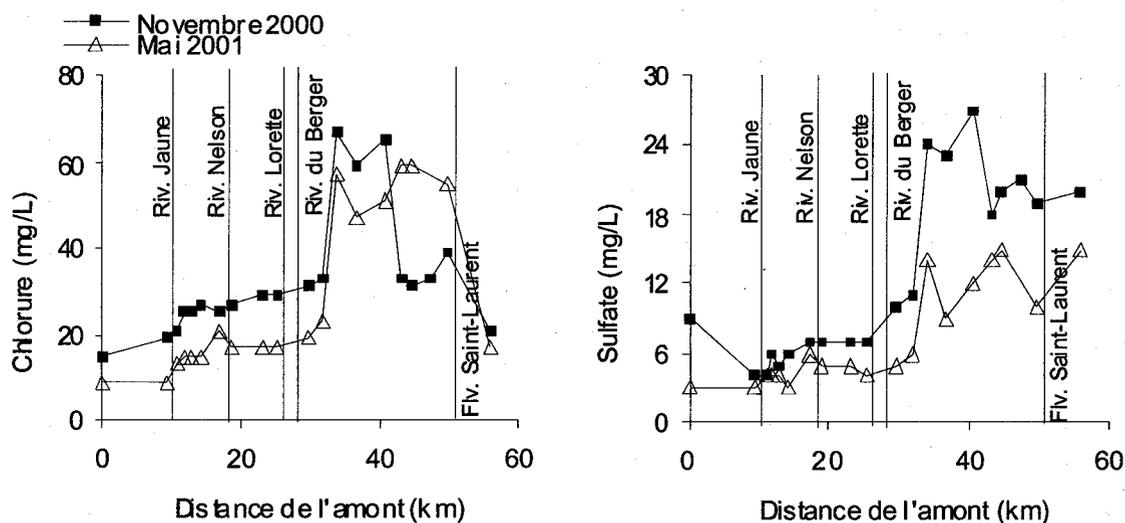


Figure 5.6 : Variation des concentrations en ions chlorures et sulfates contenues dans l'eau de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.

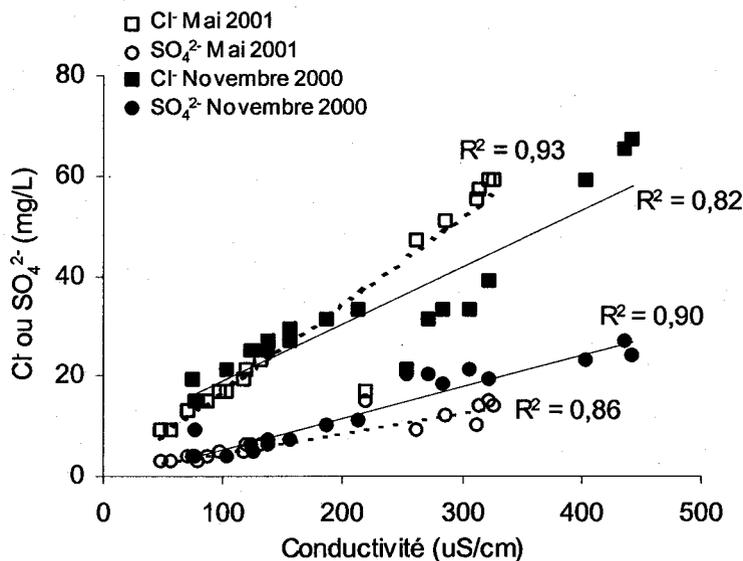


Figure 5.7 : Variation des concentrations en ions chlorures et en sulfates en fonction de la conductivité des eaux de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.

5.5 Carbone organique dissous (COD) et inorganique dissous (CID)

Dans les cours d'eau, le COD est en majeure partie constitué de composés humiques dominés par les acides fulviques. Ces macromolécules organiques, résultantes de la dégradation de la matière organique, ont des structures complexes et contiennent des groupements fonctionnels pouvant agir comme ligands avec les métaux: carboxyles (-COOH), hydroxyles (-OH) et phénoliques ainsi qu'en quantité moindre de ligands avec N et S (ex. Sigg et al., 1992). Ces ligands ont des affinités différentes pour les ions métalliques. Les acides fulviques diffèrent des acides humiques par le nombre de groupements -COOH et -OH supplémentaires aussi que par leurs solubilités différentielles en fonction du pH.

Le CID est représenté par le système des carbonates. Les groupements influençant ce système sont : l'acide carbonique (H_2CO_3) comme principal acide, l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et l'ion carbonate (CO_3^{2-}) comme principales bases.

La figure 5.8 présente les teneurs en COD et CID mesurées dans la rivière Saint-Charles pour les deux périodes d'échantillonnage. Les concentrations en COD et CID sont plus élevées en novembre qu'en mai et la partie aval de la rivière semble plus enrichie en COD et CID par rapport à l'amont pour les deux périodes. Notez qu'une augmentation des concentrations en carbone organique dissous est souvent occasionnée par l'activité humaine (ex. eaux domestiques et apport d'engrais par le ruissellement de terres agricoles). Dans les eaux de ruissellement, lorsque le pH se situe entre 6 et 8, tel qu'observé dans la rivière Saint-Charles, le carbone inorganique dissous se retrouve habituellement sous la forme d'ion bicarbonate (HCO_3^-) (ex. LaFlèche et Camiré, 1996 et Sigg et al., 2000).

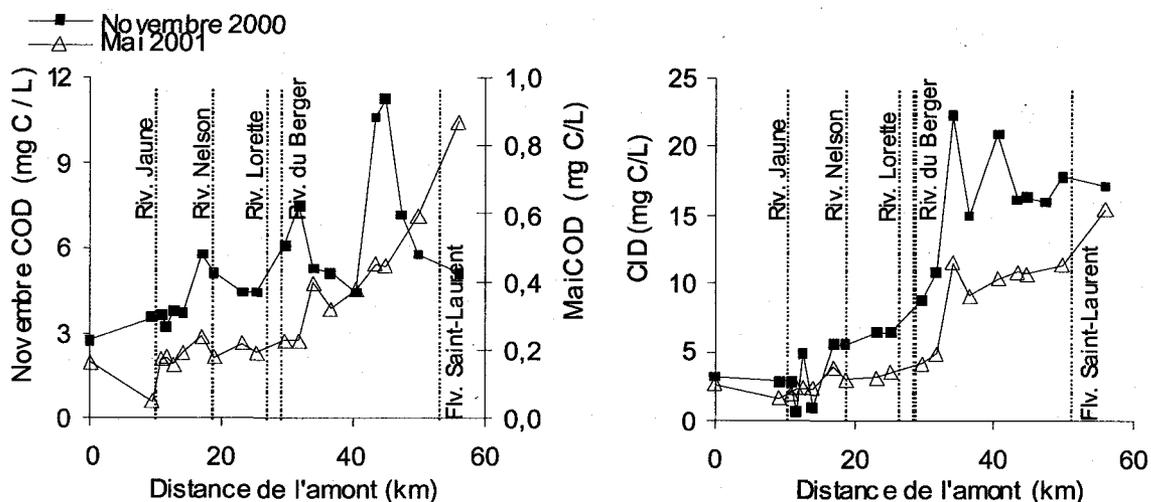


Figure 5.8: Variation des concentrations en carbones organique et inorganique dissous pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.

Généralement, les concentrations en carbone organique dissous sont plus élevées que celles en carbone inorganique dissous (ex. LaFlèche et Camiré, 1996), mais on voit l'opposé pour la rivière Saint-Charles. Les données présentées à la figure 5.8 montrent des concentrations en COD pour le mois de novembre beaucoup plus importantes que pour le mois de mai. Le drainage des sols forestiers du bassin, la dégradation des algues, du zooplancton et des matériaux forestiers sont des sources importantes de matière organiques pouvant contribuer au transfert de COD dans les eaux de la rivière. Pendant l'hiver et au début du printemps, ces processus sont relativement peu importants car les sols sont encore gelés en profondeur, la température de l'eau est basse et la productivité biologique des eaux est minimale. Notons qu'au mois de novembre, les eaux de la rivière Saint-Charles contiennent beaucoup de particules organiques variablement dégradées. On remarque à cette période de l'année une augmentation subite de concentration pour les stations S16 et S17. Ces hautes concentrations pourraient être occasionnées par le déversement des égouts ou de composés organiques quelconques dans les eaux de la rivière en secteur urbain.

Le pH et la conductivité sont fortement corrélés en novembre 2000 et mai 2001 ($0,81 \leq R^2 \leq 0,87$) avec les concentrations en CID de la rivière Saint-Charles. Comme le démontre la figure 5.9, plus le pH est basique plus la concentration en CID augmente. On trouve la même relation avec le CID et la conductivité.

Ces corrélations démontrent l'importance des carbonates dans l'évolution hydrogéochimique des eaux de la Saint-Charles. En plus de l'influence des formations de la Plate-forme du Saint-Laurent (roches carbonatées), le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'environnement réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3).

Ces composés ont la propriété, dans les eaux naturelles, d'augmenter l'acidité du milieu. Selon les coefficients de détermination obtenus à la figure 5.9, dans ces conditions naturelles les concentrations en COD ne semblent pas influencées par le pH et la conductivité des eaux.

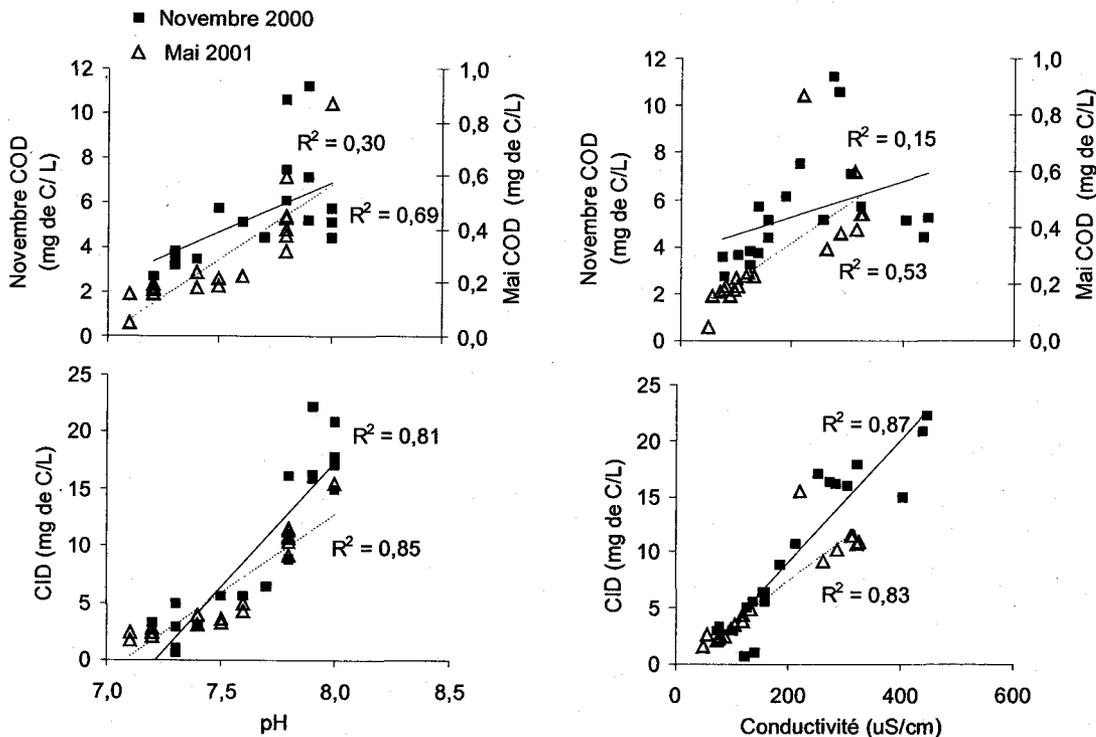


Figure 5.9 : Variations des concentrations en carbone organique et inorganique dissous en fonction du pH et de la conductivité pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001.

5.6 Observations physiques de la matière en suspension de la rivière Saint-Charles

5.6.1 Observations au microscope électronique à balayage (MEB)

Les observations réalisées au MEB ont permis de révéler la présence de matières organiques (débris végétaux, squelettes de micro-organismes algues) et de caractériser certains minéraux présents dans deux échantillons de MES (tableau 5.1, fig.5.10 et fig.5.11). Ces échantillons reflètent en partie la nature de la charge sédimentaire en

suspension érodée du secteur grenvillien (S4) et celle en provenance du bassin versant du fleuve Saint-Laurent (S20).

L'échantillon S4 a été prélevé à 12 kilomètres du lac Delage. Cet échantillon est constitué de feldspaths, de quartz et de micas de type biotite. La matrice a une composition granulométrique majoritairement argileuse. Les minéraux constituant l'échantillon prélevé dans le fleuve Saint-Laurent à 56 kilomètres du lac Delage (S20), semblent plus nombreux et diversifiés: argiles, dolomites (roches carbonatées), chlorites (roches métamorphiques), ilménites (roches ignées et métamorphiques) et pyrites (FeS_2). La diversité minérale observée démontre bien la contribution des différentes formations géologiques que drainent les principaux affluents du fleuve Saint-Laurent.

Dans les deux échantillons, on remarque la présence de squelettes de micro-organismes soulignés par de très fortes concentrations en silicium. Pour l'échantillon S4, on a pu remarquer (à fort grossissement) la structure d'une diatomée très bien conservée en plus d'un agrégat de squelettes plus ou moins amorphes de micro-organismes liés ensemble probablement par de la matière organique.

La silice, le fer et l'aluminium sont les éléments dominants ressortant de nos observations au MEB. On remarque que le fer et l'aluminium sont présents en concentrations supérieures par rapport aux autres éléments analysés sur les filtres. Cette analyse nous a permis de connaître grossièrement la constitution générale de la matière en suspension d'un échantillon prélevé dans la section grenvillienne de la Saint-Charles et dans le fleuve Saint-Laurent.

Tableau 5.1 : Résultats d'observations faites au MEB sur des échantillons de matière en suspension de la rivière Saint-Charles et du fleuve Saint-Laurent.

Échantillon (Station)	Photo (#)	Numéro d'identification sur la photo (#)	Minéraux et éléments chimiques observés dans les spectres
S4	1		Fond constitué principalement de matière organique, de minéraux et de silicates
S4	2	1 et 3	Micas de type biotite : Si, O, Al, Mg, Fe, K
		2	Quartz : SiO ₂
		4	Feldspath (plagioclase) : Si, Ca, Na,
		5	Fibres de bois (matière organique) : C, O
		6	Agglomération de fragments de micro-organismes tenus par de la matière organique : Si, C, O, Al
S4	3		Zoom de l'agglomération de fragments de micro-organismes tenus par de la matière organique : Si, C, O, Al
S4	4		Diatomée : Si, C, O
S20	5		Fond constitué particulièrement de minéraux et de matières organiques Autres minéraux remarquables: Dolomite : Ca, Mg, O ₂ Feldspath : Si, O, Al, K Ilménite : Oxyde de fer, titane Plagioclase : Si, Ca, Na,
		1	Dolomite : Ca, Mg, O ₂
		2	Quartz : SiO ₂
		3	Argile : Si, O, Al, Fe, Mg,
		5	Diatomées : Silice
S20	6	6	Chlorite : Al, Fe, Mg, Si, O
		4	Pyrite : S, Fe
		7	Fond gélatineux : illite (mélange d'argile)
		8	Pyrite : S, Fe,
S20	7	1	Pyrite framboïdale : FeS ₂
		2	Micas disposés en feuillet

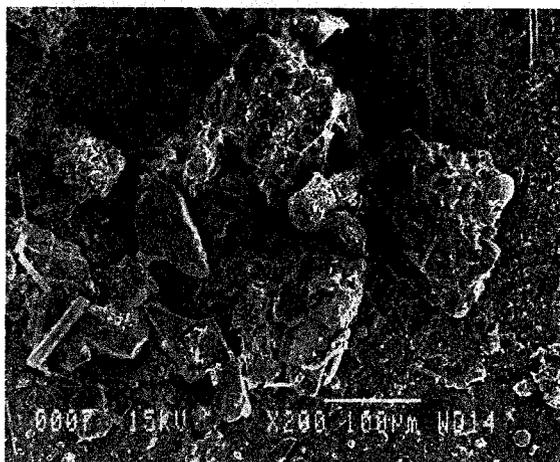


Photo 1

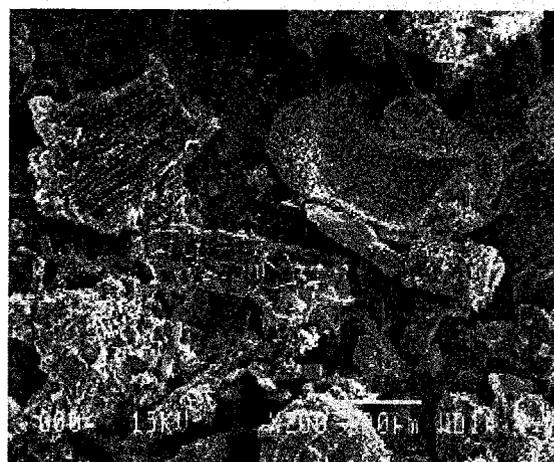


Photo 2

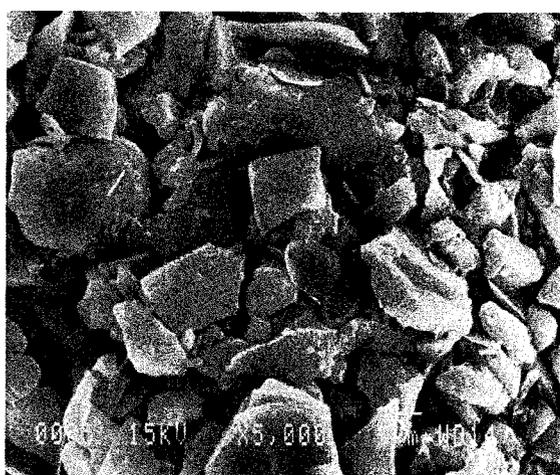


Photo 3

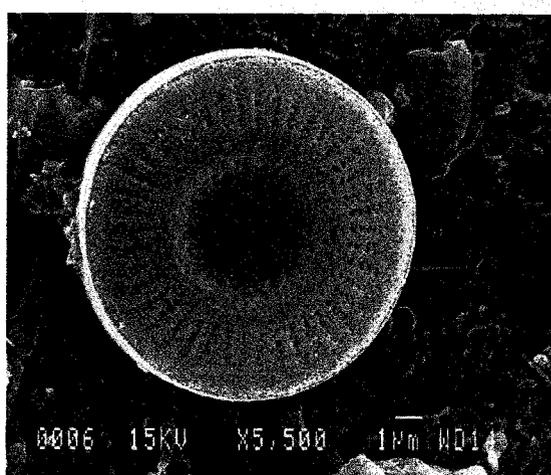


Photo 4

Figure 5.10 : Photos de la matière en suspension de l'échantillon de la station S4 (novembre 2000) . Photos prises au MEB en mode d'électrons secondaires.

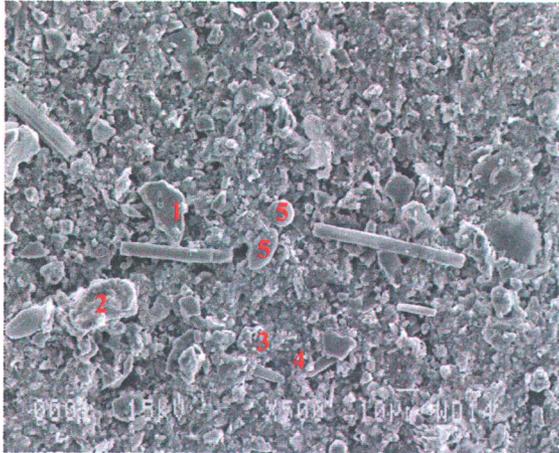


Photo 5

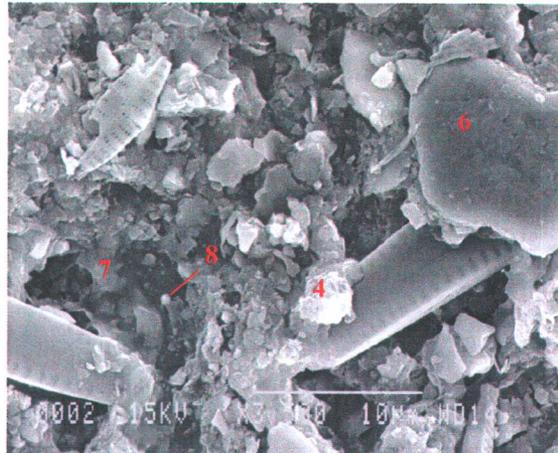


Photo 6

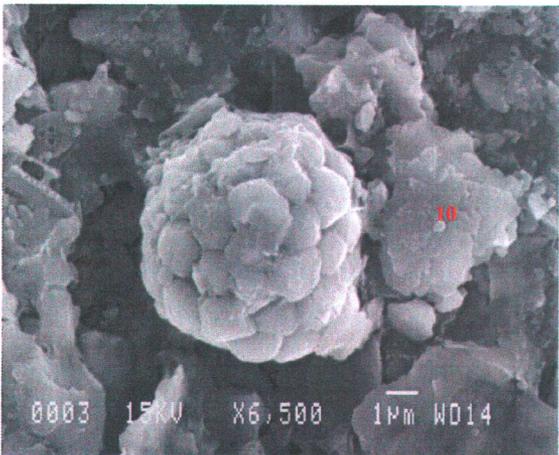


Photo 7

Figure 5.11 : Photos de la matière en suspension de l'échantillon de la station S20 (novembre 2000). Photos prises au MEB en mode d'électrons secondaires.

5.7 Éléments majeurs dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles

5.7.1 Les oxydes

La MES des eaux douces est généralement constituée d'un mélange de particules allochtones et détritiques. La MES contient entre autre de la matière organique et des particules authigéniques, comme les hydroxydes de Fe et Mn et les carbonates (Salomons et Förstner, 1984). Les particules très fines possèdent une capacité d'adsorption des métaux plus forte que les particules grossières dû à une plus grande surface spécifique et à leur nature souvent argileuse (Singh et al., 1999).

La rivière Saint-Charles est un cours d'eau à pH neutre à légèrement alcalin, peu profond et caractérisé normalement par un faible débit. Ces conditions pourraient favoriser les processus d'adsorption et la formation de revêtements d'oxydes amorphes sur les fines particules (LaFlèche M., comm. Pers, 2002.).

Parmi les éléments majeurs dosés pour ce projet, le fer est l'élément dominant dans la MES de la Saint-Charles. Compte tenu de la méthode de digestion utilisée pour l'analyse de la MES, il faut souligner que le silicium n'a pas été dosé dans la matière en suspension. Ce dernier constitue normalement l'élément majeur le plus abondant des sédiments détritiques et de la MES des rivières. Voici dans l'ordre décroissant les éléments les plus abondants dans la matière en suspension en novembre 2000 : Fe>Al>Ca>K>Mg>Na>Mn>Ti>P, ainsi qu'au mois de mai 2001 : Fe>Al>Ca>K>Na>Mg>Mn>P>Ti.

Les variations globales des concentrations en oxydes seront présentées en regroupant les différentes classes d'oxydes ensemble : les éléments basiques (MgO et CaO), les alcalino-terreux (Na₂O et K₂O), les éléments réfractaires (Al₂O₃ et TiO₂) ainsi que les oxydes potentiellement affectés par les processus d'oxydoréduction (FeO, MnO et P₂O₅).

Selon la figure 5.12, les tendances générales de variation des concentrations en oxydes en fonction de la distance (de l'amont vers l'aval) pour les échantillonnages de novembre et de mai sont semblables à l'exception de concentrations globalement plus élevées en novembre. Sur les figures, on voit des enrichissements par rapport au réservoir de roches crustales (NASC) pour les éléments influencés par les processus

d'oxydoréduction. On note de très fortes abondances en FeO en novembre 2000 et on remarque aussi un enrichissement considérable par rapport au NASC entre 20 et 40 kilomètres pour le MnO et le P₂O₅, ce qui suggère un apport non-détritique anormal. Les concentrations de Al₂O₃, K₂O, TiO₂ et MgO sont plus élevées en mai et particulièrement dans la zone urbaine à partir de la rivière Lorette. Pour le MgO, les concentrations aux deux périodes suivent la même tendance et deviennent trois fois plus concentrées après la jonction avec la rivière du Berger. Notons que pour le CaO, MnO, Na₂O et le TiO₂, les concentrations observées dans la MES du fleuve Saint-Laurent sont semblables à celles observées dans le réservoir de comparaison NASC.

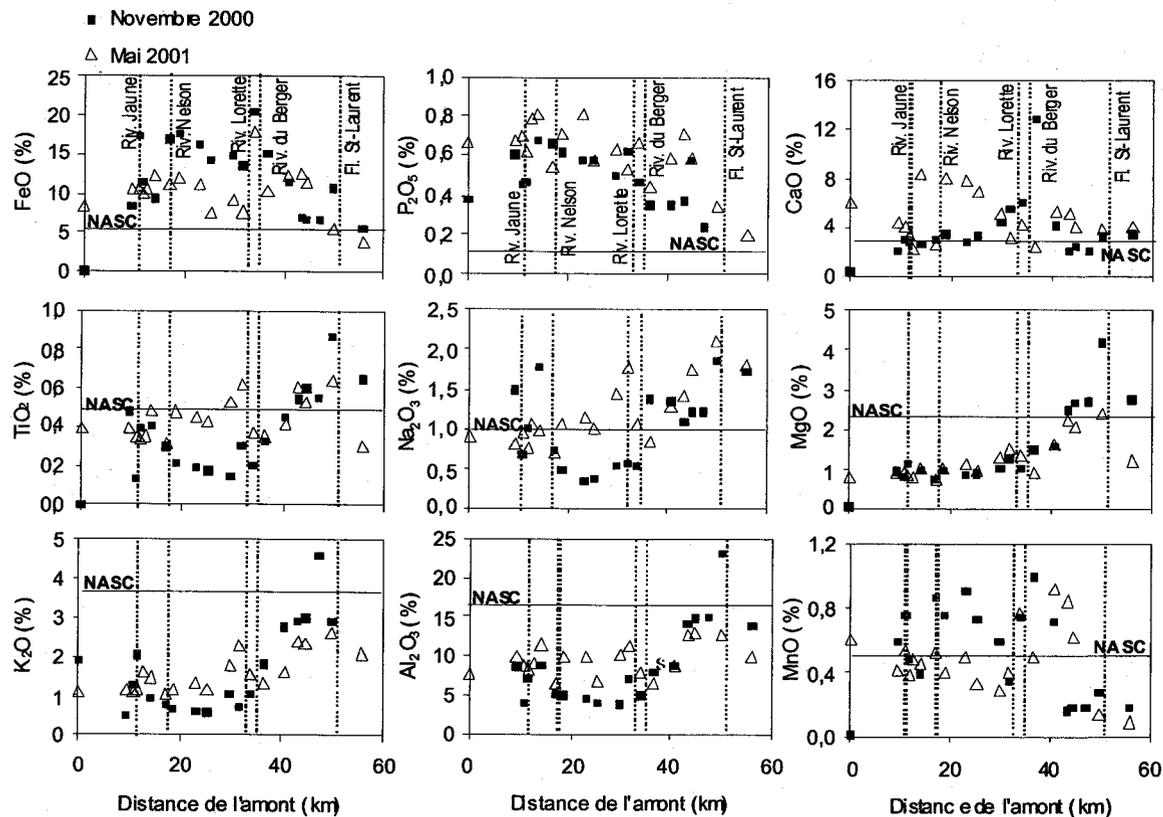


Figure 5.12 : Concentrations des éléments dans la matière en suspension de la rivière pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001. NASC : North American Shale Composite (Valeurs tirées de Rollinson; 1993).

5.8 Les éléments traces dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles

Les éléments traces sont présentés au chapitre 6 en raison de leur présentation normalisée à un réservoir de référence. Ce mode de présentation est un peu plus

représentatif et permet de mettre en évidence des phénomènes ou processus difficile à visualiser autrement.

5.9 Granulométrie des échantillons de formations superficielles et de sédiments du lit de la rivière Saint-Charles

En raison de la quantité insuffisante de MES récoltée aux deux périodes d'échantillonnage dans la rivière Saint-Charles, il nous a été impossible de faire une analyse granulométrique sur ce type d'échantillon.

Les échantillons de sédiments recueillis dans le lit de la rivière Saint-Charles sont presque tous des sables moyens à grossiers ayant une faible proportion de particules fines, silteuses ou argileuses (fig. 5.13). Le protocole de l'analyse granulométrique est expliqué à la section 4.2.2.7. La très faible proportion de particules fines est en partie due à la nature du sédiment. Les particules grossières (sables) des sédiments de fond de la rivière ne sont remobilisées que si la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment élevée (> 30 cm/s) (ex. LaFlèche et Camiré, 1996). Lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau est plus lente (< 6 cm/s), seule la matière en suspension telle que les argiles granulométriques peut parcourir de grandes distances pouvant excéder 100 kilomètres. À ces faibles vitesses, les particules plus grossières sédimentent de nouveau dans les zones où le courant est atténué.

On trouve à l'annexe 7 une description des échantillons représentés à la figure 5.11. L'échantillon Séd. 1 a été prélevé dans le lac Saint-Charles. Les échantillons Séd. 2 et Séd. 3 ont été prélevés dans une zone où le courant est supérieur à 30 cm/s, ce qui peut expliquer la quasi absence de particules fines. L'échantillon Séd.4 a été prélevé dans le fleuve à marée basse. Il est probable que des particules fines aient été emportées par le courant induit par la marée.

Les échantillons de formations superficielles représentant les formations présentes dans le bassin versant de la rivière comportent beaucoup plus de particules fines que les échantillons de sédiments du lit de la rivière. Ceci est probablement dû au lessivage hydraulique des sédiments de fond par le courant de la rivière.

Dans le tableau 5.2, on peut voir la granulométrie moyenne des échantillons de formations superficielles et de sédiments de fond de la rivière Saint-Charles. Ce tableau

représente la dimension granulométrique où 50 % (% poids) de l'échantillon passe au travers du tamis (donc n'étant pas retenu) et donne des indications plus précises sur la granulométrie de l'échantillon. À la lecture de ce tableau, on peut remarquer que les échantillons provenant des formations superficielles ont un P_{50} beaucoup plus fins que les échantillons de sédiments prélevés dans le lit de la rivière Saint-Charles. Ce tableau est en concordance avec le diagramme ternaire cité précédemment à la figure 5.13.

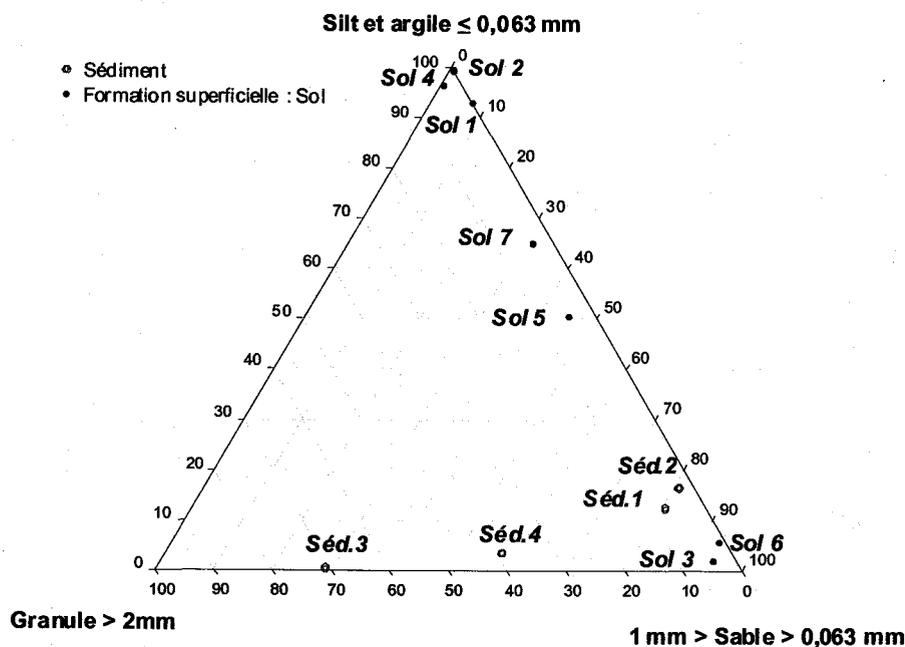


Figure 5.13 : Classification granulométrique des sédiments de fond et des formations superficielles dans un diagramme ternaire granule-silt-sable.

Tableau 5.2 Granulométrie de 50 % des échantillon passant dans les tamis

Échantillon	P_{50} (μm)	P_{50} (mm)
FS1	< 63	< 0.063
FS2	< 63	< 0.063
FS3	< 63	< 0.063
FS4	< 63	< 0.063
FS5	321	0.321
FS6	63	0.063
FS7	63	0.063
Séd.1	250	0.250
Séd.2	203	0.203
Séd.3	1500	1.5
Séd.4	203	0.203

FS : Formation superficielle en bordure de la rivière Saint-Charles

Séd. : Sédiment du lit de la rivière Saint-Charles

5.10 Diffraction-X

Comme le principal objectif de cette recherche repose sur l'étude de la matière en suspension (granulométrie très fine), l'analyse par diffraction-X a été faite précisément sur la fraction granulométrique argileuse et silteuse ($< 0,063$ mm) de certains échantillons de formations superficielles et de sédiments de la rivière Saint-Charles (tableau 5.3). Dans un contexte d'érosion des berges de la rivière, les particules fines sont plus susceptibles d'être entraînées dans la rivière Saint-Charles.

Principalement nous retrouvons dans la fraction $< 0,063$ millimètre en ordre décroissant pour les sédiments et les formations superficielles : du quartz, des feldspath Na-Ca, (albite) et parfois des amphiboles (actinolite). Ces minéraux reflètent la composition des minéraux essentiels constituant les roches granitiques et gneissiques de la province géologique du Grenville.

En raison de la présence de nombreuses zones de remblai en aval de la rivière Saint-Charles, l'analyse des échantillons de formations superficielles a été limitée au tronçon de la rivière traversant la province géologique du Grenville. La composition minéralogique de ces échantillons est similaire et reflète la minéralogie des roches grenvilliennes. La présence des clinochlores dans les échantillons de formations superficielles est discutable. Ce minéral laisse présager une altération chimique (intempérisme chimique) en raison de la faiblesse des pics sur les spectres de diffraction-X (annexe 24). Afin d'avoir une meilleure précision pour identifier le type de chlorite, il serait préférable d'effectuer une analyse plus approfondie en utilisant la méthode de préparation au glycol (Chagnon A., com. pers., 2003).

Dans l'ensemble, les deux échantillons de sédiments se ressemblent beaucoup du point de vue minéralogique. Ils sont riches surtout en albite et en quartz. Les amphiboles (actinolites) présentes dans l'échantillon Séd.1 sont très sensibles aux processus d'hydrolyse. La présence de ce minérale suggère que l'effet d'hydrolyse naturelle a été négligeable sur cet échantillon. Ce minéral serait probablement une composante des argiles granulométriques façonnées par la Mer de Champlain (Chagnon A., com. pers., 2003). La simplicité de leurs matrices suggère un tri hydraulique et l'érosion de particules fines riches en micas. Ceci expliquerait pourquoi nous retrouvons principalement du quartz et de l'albite avec un peu d'amphiboles dans ces unités.

Tableau 5.3 : Description minéralogique des formations superficielles et des sédiments de la rivière Saint-Charles prélevés respectivement dans le bassin versant et dans le lit de la rivière Saint-Charles

Échantillon	Minéraux trouvés
Sol 1	Quartz (SiO ₂) Albite (Ca(Na,Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈), Actinolite Ca ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) Clinochlore (Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{0.136} Al _{1.275})(Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀ (OH) ₈)
Sol 4	Quartz (SiO ₂) Albite (Ca(Na,Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈), Actinolite Ca ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) Clinochlore (Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{0.136} Al _{1.275})(Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀ (OH) ₈)
Sol 5	Quartz (SiO ₂) Albite (Ca(Na,Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈), Actinolite Ca ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) Clinochlore (Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{0.136} Al _{1.275})(Si _{2.622} Al _{1.376} O ₁₀ (OH) ₈) Illite (K,H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂
Séd. 1	Quartz (SiO ₂) Albite (Ca(Na,Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈)
Séd. 2	Quartz (SiO ₂) Albite (Ca(Na,Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈) Actinolite Ca ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH)

L'examen des échantillons Séd. 1 et Séd. 2 montre un impact évident de la granulométrie sur la constitution minéralogique des échantillons de sols et de sédiments. Notons que les deux échantillons de sédiments ont été prélevés sous une colonne d'eau. L'échantillon Séd. 1 a été prélevé dans le lac Saint-Charles où le fond était très sableux. De plus, le niveau de ce lac varie énormément (MENV, com. pers, 2003) durant la saison estivale, ce qui peut contribuer à transporter vers la partie profonde du lac les minéraux plus légers et plus fins. L'échantillon Séd. 2 a été prélevé au milieu de la rivière Saint-Charles dans le secteur où les fines et les particules plus légères ont été déplacées par le courant.

Dans les unités étudiées, plus la granulométrie des échantillons augmente plus les concentrations en quartz augmentent. Cet effet granulométrique reflète l'importance de normaliser les données géochimiques lorsque de très grandes variations granulométriques sont observées dans les cours d'eau.

5.11 Éléments majeurs dissous dans la rivière Saint-Charles

En moyenne, les concentrations des éléments majeurs dissous du mois de novembre 2000 ressemblent à celles du mois de mai 2001. Toutefois, l'abondance moyenne des cations majeurs au mois de novembre décroît selon l'ordre suivant : calcium (Ca^{2+}) > sodium (Na^+) > potassium (K^+) > magnésium (Mg^{2+}), et au mois de mai 2001 selon l'ordre: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

Les variations des teneurs en cations majeurs reflètent aussi la nature des régions géologiques érodées dans le bassin versant. Dans le territoire grenvilien, l'eau est généralement peu conductrice et pauvre en cations. Aux environs de 20 kilomètres de l'amont, dans le début du tronçon de la Plate-forme du Saint-Laurent, les concentrations en cations augmentent légèrement jusqu'à 32 kilomètres. Cette augmentation peut être principalement attribuée à la dissolution des carbonates et aux effets progressifs de l'urbanisation. La section de la rivière traversant le secteur urbain est plus enrichie en cations. Dans cette section, au mois de novembre, les valeurs les plus élevées sont atteintes et la composition chimique observée est attribuée aux ions provenant de sources anthropiques urbaines. L'enrichissement drastique apparaît quelques kilomètres après la jonction avec la rivière du Berger. Donc cette dernière n'est pas directement responsable de ce phénomène.

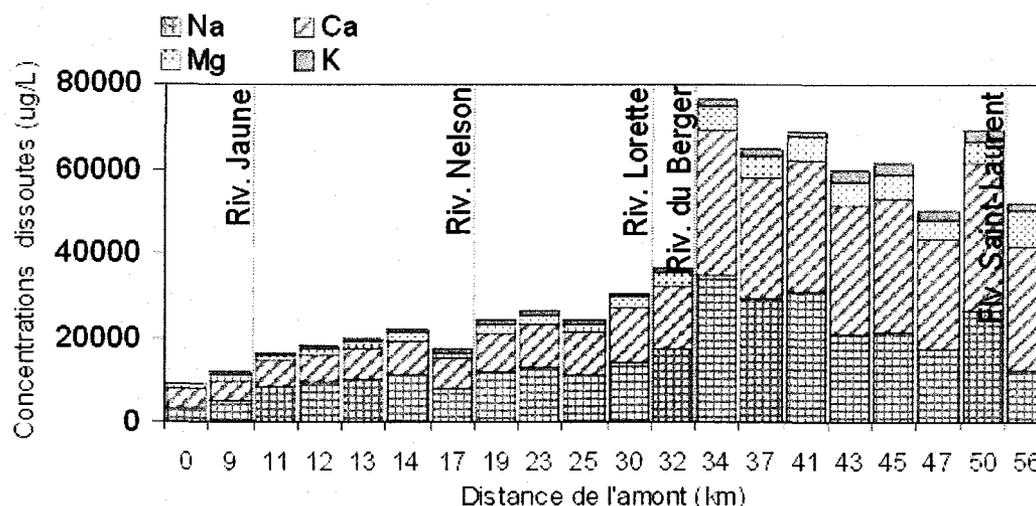


Figure 5.14 : Concentrations des principaux éléments majeurs dissous dans la rivière Saint-Charles au mois de novembre 2000. Notons que la zone bétonnée commence à 37 kilomètres de l'amont.

Une partie des ions calcium peut provenir aussi de la neutralisation des précipitations acides sur le béton et le mortier (ciment) des infrastructures urbaines. Ainsi la phase dissoute est acheminée dans les eaux de ruissellement vers la rivière.

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

6.1 Les éléments majeurs présents dans la matière en suspension

Dans ce mémoire nous utiliserons l'oxyde de titane (TiO_2) pour représenter l'apport des particules minérales dérivées des sols minéraux, des formations quaternaires et du substrat rocheux. Cet élément chimiquement réfractaire aux effets météoritiques est totalement insoluble dans l'eau et sa provenance peut être purement détritique et minérale. Dans cette section, les concentrations des éléments majeurs (fig. 6.1) de la MES sont donc portées en fonction de l'abondance en TiO_2 . Cette procédure permet d'évaluer rapidement les éléments associés à la composante minérale dérivée des formations géologiques et des sols.

Lors de l'analyse de nos résultats, les concentrations de deux échantillons (S1 et S5) ne concordaient pas avec la tendance générale de la variation des concentrations élémentaires en fonction de la distance. Nous avons donc écarté l'échantillon S5 (correspondant à une station située à 17 kilomètres de l'amont) du mois de novembre 2000 pour tous les éléments majeurs et traces. Cet échantillon a probablement été contaminé lors du prélèvement ou lors de manipulations au laboratoire. De plus, l'échantillon S1 (secteur du lac Delage), montre de très faibles concentrations par rapport à la tendance générale. Ces dernières sont souvent en dessous de la limite de détection de l'appareil utilisé pour doser les éléments (ICP-MS et ICP-AES). Cette analyse est probablement erronée en raison d'un problème de dilution lors de l'analyse. La faible quantité de MES récoltée au mois de novembre au lac Delage pourrait aussi contribuer à ces résultats anormaux.

Pour l'échantillonnage de novembre, les concentrations en Fe_2O_3 de la MES présentent une relation linéaire mais inverse (anticorrélation) avec le TiO_2 ($R^2 \geq 0,83$). Dans l'hypothèse où les concentrations en TiO_2 représentent effectivement la charge détritique minérale, les oxydes positivement corrélés avec ce dernier (ex. Al_2O_3 , K_2O et MgO) pourraient provenir en majeure partie des formations géologiques du bassin versant. Les corrélations négatives avec le TiO_2 pourraient entre autre refléter un phénomène de

dilution du TiO_2 par l'enrichissement secondaire en oxyhydroxides de Fe et Mn sur les particules. Les corrélations observées sur la figure 6.1 suggèrent que des proportions importantes de CaO, de P_2O_5 , de Na_2O et de MnO ne sont pas associées à la fraction alumino-silicatée détritique. Par exemple, la présence de calcite ou de dolomite particulaire provenant de sources géologiques carbonatées, peut enrichir la MES en Ca et/ou Mg et appauvrir cette dernière en TiO_2 car le titane n'entre pas dans la composition des carbonates. Par exemple, dans la section de la rivière drainant la Plate-forme du Saint-Laurent (à partir de 23 kilomètres de l'amont), les concentrations en TiO_2 sont nettement inférieures à celles mesurées en amont. Une accumulation de calcite ou de dolomite pourrait expliquer la diminution des abondances en TiO_2 . La figure 6.1 montre une corrélation positive avec le MgO et l'absence de corrélation avec le CaO. Cette observation pourrait suggérer une accumulation de carbonates de calcium (CaCO_3) dominée par les carbonates magnésiens (dolomites). Notons toutefois que certaines corrélations soulignent des processus de mélange à plusieurs composantes (ex. oxydes amorphes, silicates, carbonates et matière organique). Ceci pourrait expliquer les mauvaises corrélations avec le TiO_2 .

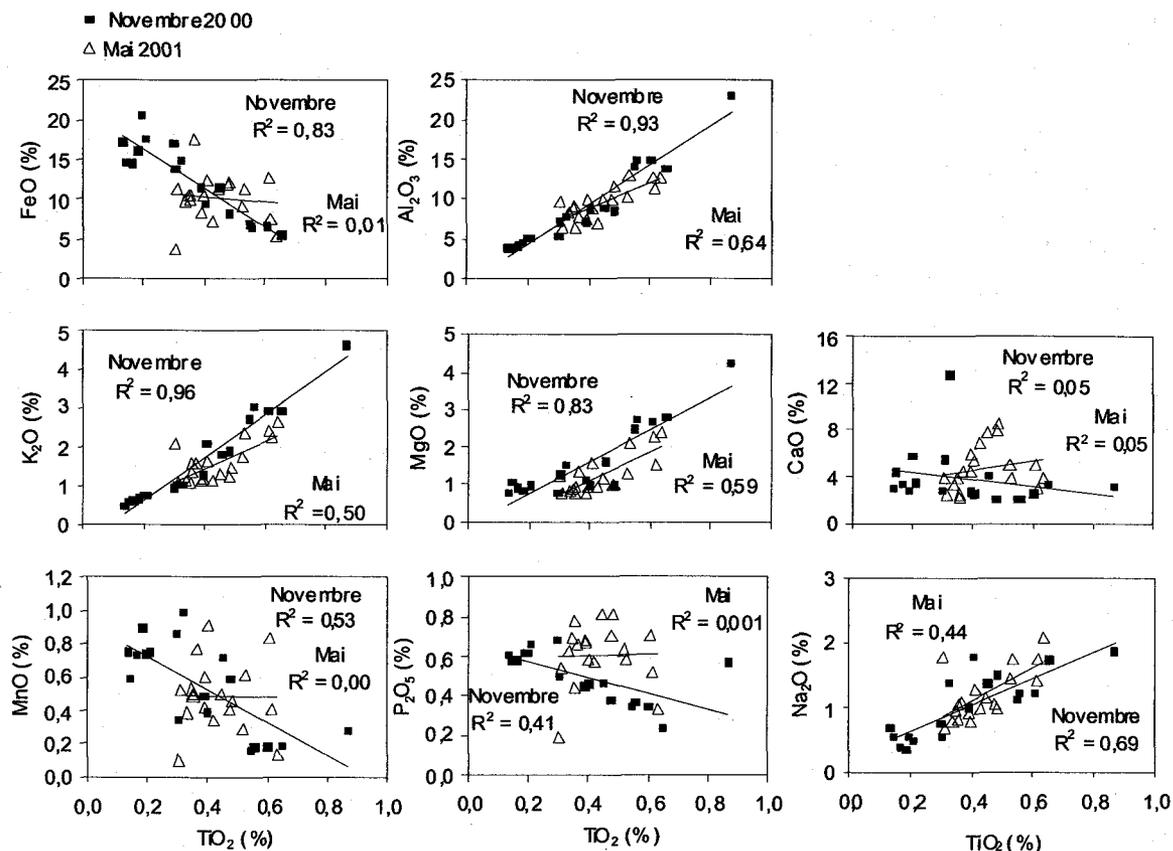


Figure 6.1 : Relation entre les oxydes des éléments majeurs et le TiO_2 dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles aux périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.

6.1.1 Normalisation des concentrations des éléments majeurs au TiO_2 et variations en fonction de la distance

Compte tenu de la possibilité de phénomènes importants de dilution par les oxyhydroxides de fer et de manganèse et par la matière organique et la silice biogénique particulaire, la normalisation des résultats analytiques est préférable dans l'étude de caractérisation et de provenance de la MES. Pour ce faire nous avons utilisé le TiO_2 pour normaliser les données car il est présent dans la plupart des roches et minéraux dérivés des formations géologiques. De plus, il est considéré comme un élément fortement immobile (ex. Duzgoren-Aydin et al. , 2002; Ndzangou, 2003). Le TiO_2 est aussi présent en concentrations négligeables dans la matière organique et dans les revêtements d'oxyhydroxides de Fe et Mn amorphes recouvrant les particules de MES.

À la figure 6.2, les concentrations en oxydes normalisées au TiO_2 sont portées en fonction de la distance de l'amont vers l'aval. Les résultats montrent un enrichissement

d'origine non-minérale entre 20 et 40 kilomètres de l'amont. Ce phénomène particulièrement important en novembre 2000 est caractérisé par de forts enrichissements des rapports FeO/TiO_2 , MnO/TiO_2 , $\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ et CaO/TiO_2 : en comparaison aux résultats obtenus en mai 2001. Au mois de mai 2001, la MES de la rivière Saint-Charles ne montrait plus ce phénomène d'enrichissement. Au contraire, à cette période, la signature géochimique de la MES évolue d'une façon plus régulière. En comparant les figures 6.1 et 6.2, il semble évident que les abondances en TiO_2 sont entre autre affectées par la dilution occasionnée par la présence de revêtements de Fe et de Mn sur les fines particules sédimentaires. Les autres oxydes (K_2O , Al_2O_3 et Na_2O) ne montrent pas d'enrichissement particulier.

L'enrichissement en oxyhydroxides de fer et de manganèse, probablement d'origine non-détritique, peut suggérer un apport en Fe et Mn dissous provenant de la décharge d'eaux souterraines (milieu réducteur) dans cette section de la rivière. Cet apport favoriserait la formation de revêtements d'oxyhydroxides de fer et manganèse sur les particules de matière en suspension lors du mélange des eaux souterraines réductrices avec les eaux oxydantes et alcalines de la rivière Saint-Charles. Les revêtements d'oxyhydroxides des surfaces chargées négativement dans des conditions de pH neutre à alcalin favoriseraient l'adsorption ou la complexation des métaux à valence positive (ex. terres rares, Ni^{2+} , Cd^{2+} etc...) présents sous une forme dissoute dans la colonne d'eau.

On observe clairement sur les figures 6.1 et 6.2 une dynamique distincte du Fe, du Mn, du P et du Ca entre l'automne (novembre 2000) et le printemps (mai 2001). Une hypothèse qui pourrait expliquer cette différence impliquerait une dynamique complexe de décharge des eaux souterraines du bassin forestier bordant la rivière. À l'automne, les eaux souterraines pourraient librement recharger la rivière, tandis qu'au printemps, le sol n'étant pas complètement dégelé en profondeur, il est probable que l'apport en « eaux souterraines » au débit de la rivière Saint-Charles soit nettement inférieur. Ceci pourrait expliquer les faibles abondances en fer et manganèse observées dans la MES du printemps. Donc au printemps précoce, les sols gelés favorisent le ruissellement des eaux de fonte des neiges tandis qu'à l'automne, les eaux percolent profondément dans les sols forestiers et sont drainées par les eaux souterraines jusqu'à la rivière. Notons que l'hypothèse suggérée implique une recharge relativement rapide des nappes phréatiques

peu profondes. Dans le cas contraire, les nappes phréatiques impliquant des eaux anciennes ne seraient pas influencées par les conditions climatiques saisonnières.

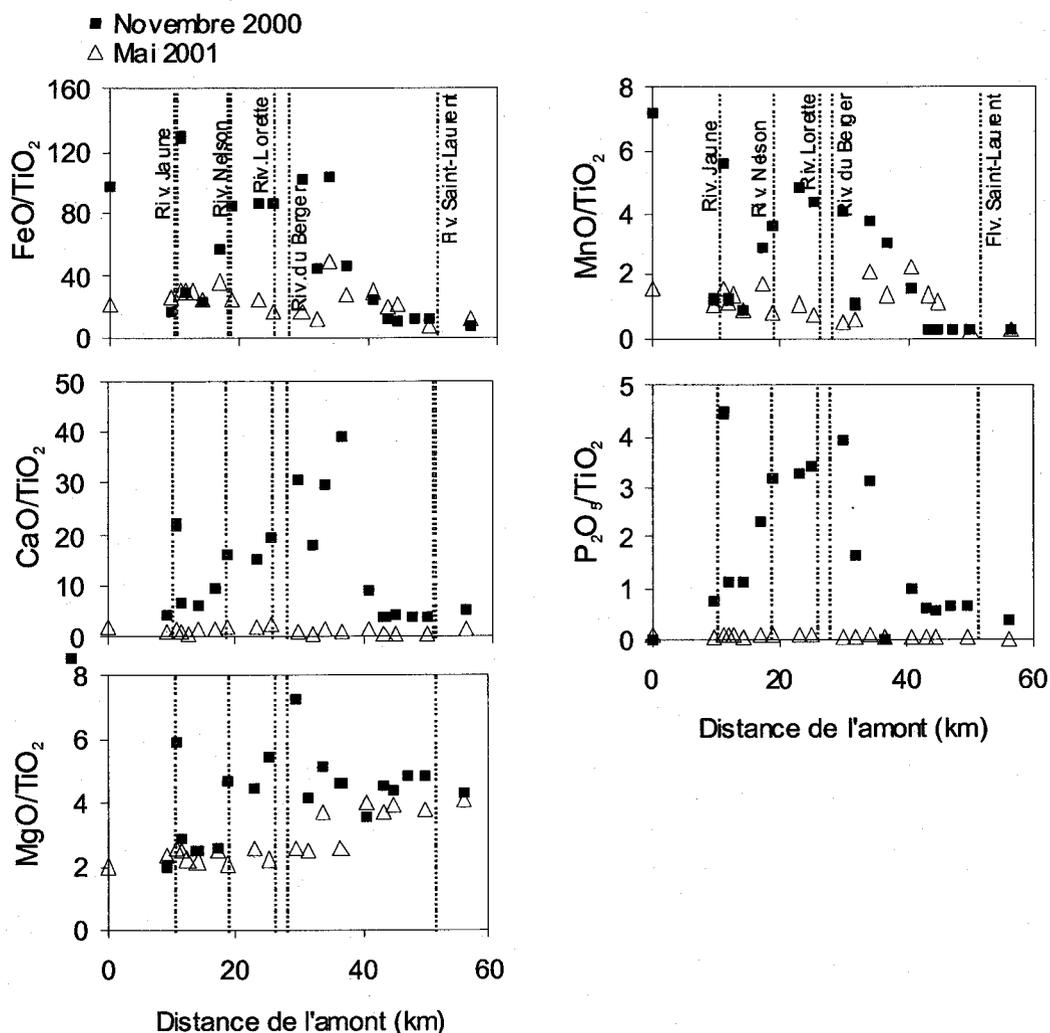


Figure 6.2: Concentrations en oxydes normalisés au TiO_2 dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour novembre 2000 et mai 2001. La normalisation vise à mettre en évidence les phénomènes de dilution par les hydroxydes de Fe et de Mn et la matière organique.

6.1.2 Normalisation des concentrations en éléments majeurs par rapport aux valeurs suggérées pour la croûte continentale supérieure (UCC)

La figure 6.3 présente les concentrations moyennes en pourcentage oxydes de la MES normalisées aux valeurs suggérées pour la croûte continentale supérieure (*Upper Continental Crust : UCC*) pour les échantillonnages de novembre 2000 et mai 2001. UCC est un réservoir de référence reflétant la composition chimique moyenne de la partie

supérieure de la croûte continentale. Généralement, les sédiments des grands fleuves ont une composition chimique se rapprochant beaucoup de celle du *UCC*. Au mois de novembre 2000, on observe un enrichissement en FeO, en MnO et en P₂O₅ plus important qu'au mois de mai 2001. Notez de plus que sur la figure 6.3, l'échelle des concentrations normalisées est en échelle log et conséquemment les différences observées sont significatives.

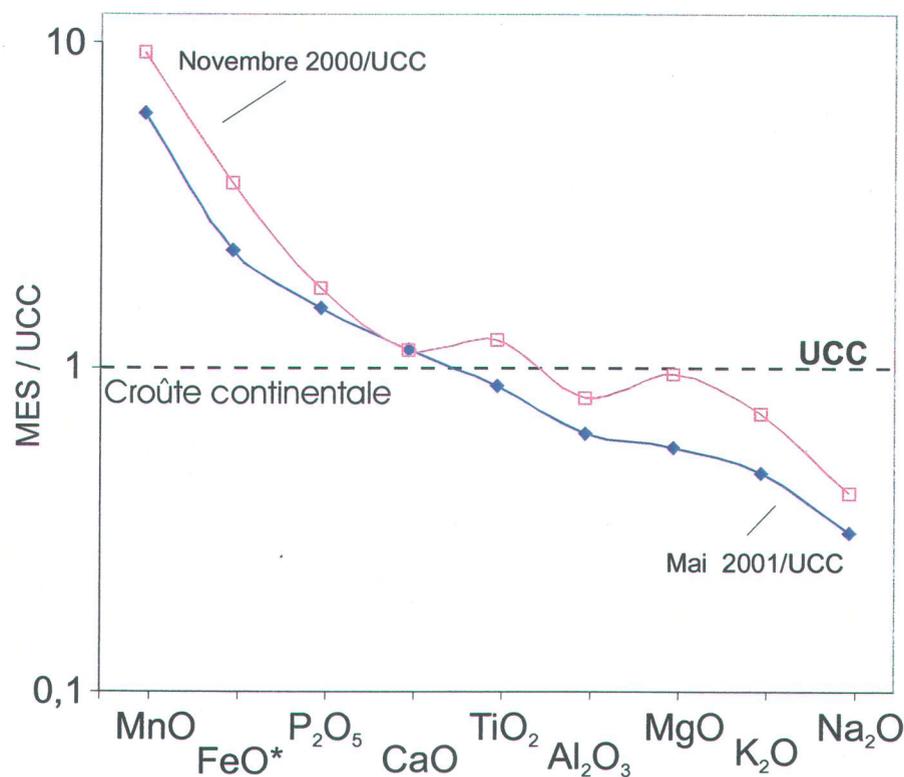


Figure 6.3 : Variation des concentrations en oxydes normalisés au *Upper Continental Crust* (UCC) pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et mai 2001. Valeurs de normalisation selon Taylor et McLennan, 1981. Notez les abondances moyennes en CaO et TiO₂ de la MES de la rivière Saint-Charles qui sont semblables à celle du UCC.

La figure 6.4 montre les concentrations des oxydes contenus dans la MES de la Saint-Charles normalisées à l'*Upper Continental Crust* (UCC) pour chaque site d'échantillonnage de novembre 2000. On voit que la partie de la rivière comprise entre les stations S1 et S17 est beaucoup plus enrichie en oxydes de Fe, Mn, P et Ca que les stations influencées par le fleuve Saint-Laurent (S19 et S20). L'enrichissement en Fe et Mn peut être relié au drainage vers les eaux souterraines de composés humiques présents

dans les sols forestiers et formation superficielles bordant le cours d'eau. Les échantillons des stations influencées par le fleuve (S19 et S20) ont une signature géochimique qui se rapproche beaucoup de la composition du UCC. Ceci n'est pas étonnant car la MES du fleuve Saint-Laurent est composée d'environ 70 % d'argile marine provenant d'anciens dépôts de la Mer de Champlain et d'environ 30 % de sédiments provenant de différents bassins versant de ses affluents (Rondeau, B., Env. Canada, com. pers., 2003).

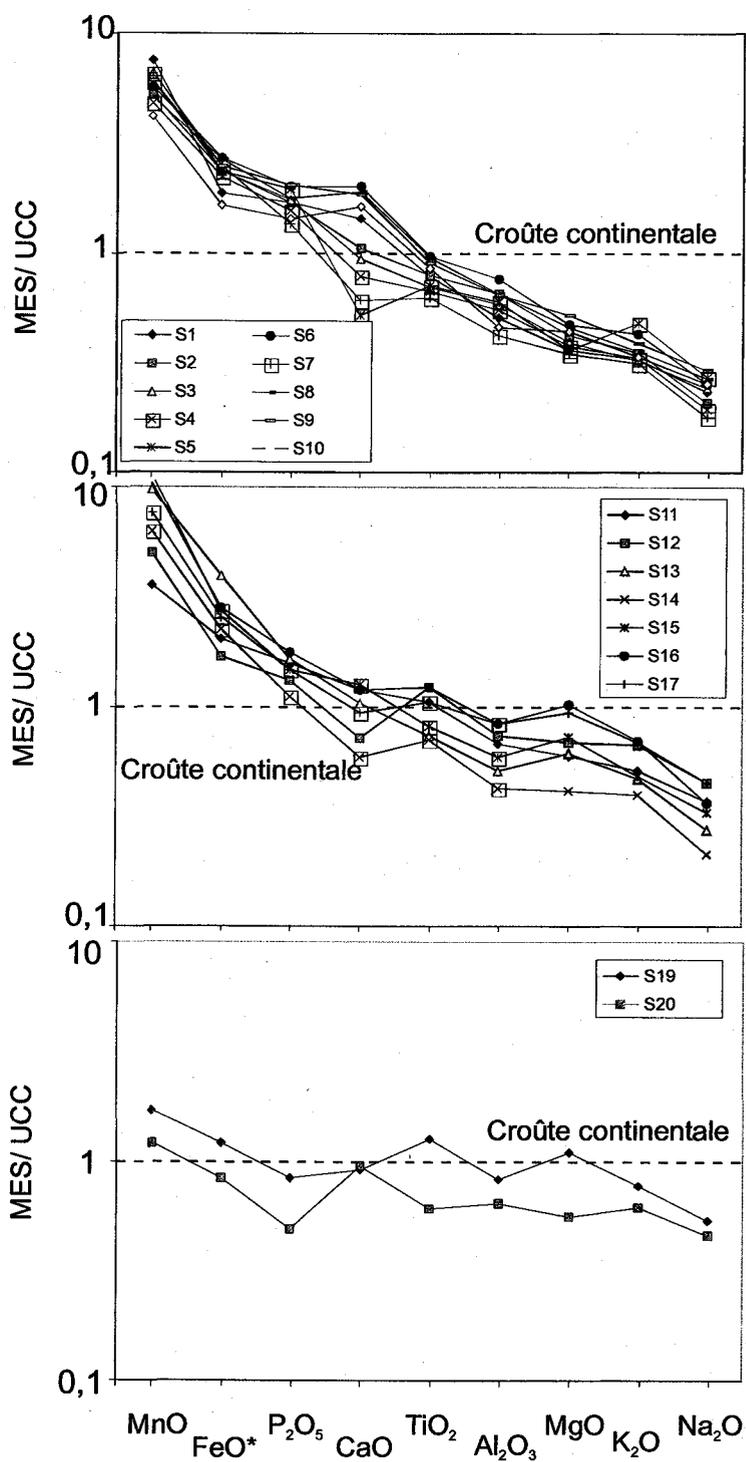


Figure 6.4: Variations des concentrations en oxydes contenus dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles normalisés au *Upper Continental Crust* (UCC) pour la période d'échantillonnage de novembre 2000. Valeurs de normalisation selon Taylor et McLennan, 1981.

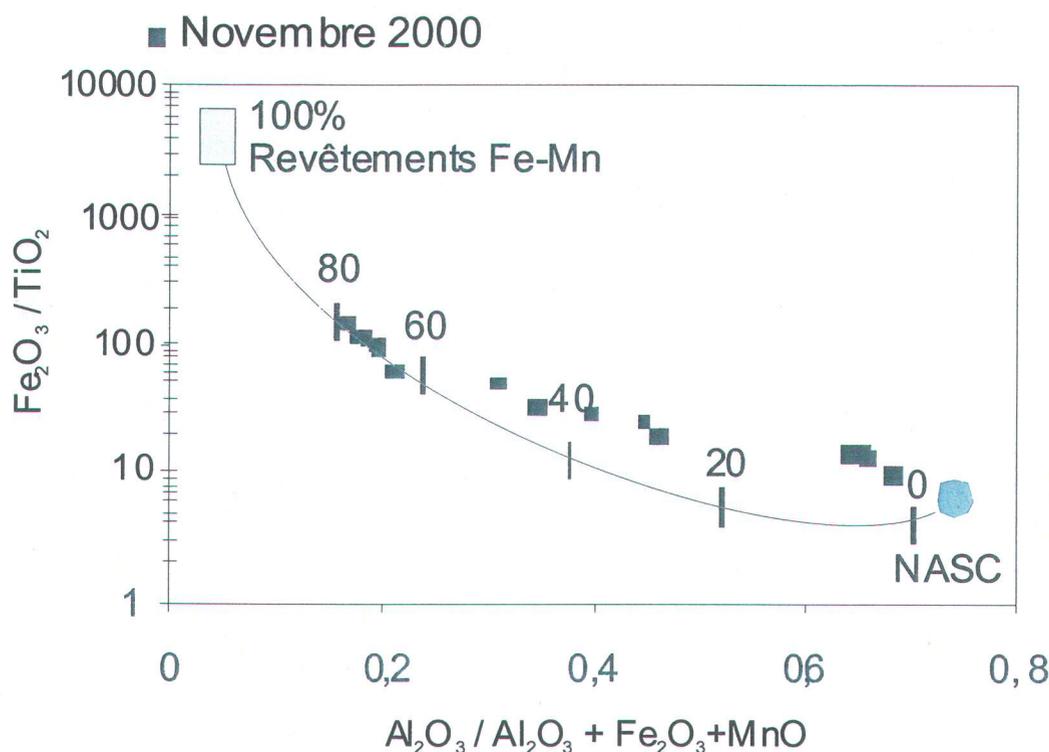


Figure 6.5 : Estimation de la proportion (%) de revêtement de fer-manganèse sur la matière en suspension de la rivière Saint-Charles en novembre 2000. La courbe calibrée de 0 à 100% correspond à un mélange binaire entre un revêtement d'oxyhydroxides de Fe-Mn et les particules détritiques silicatées de dérivation géologique approximée par la composition *North American Shale Composite* (NASC) (fig. 6.5).

Les échantillons de MES du mois de novembre 2000 sont distribués le long d'une courbe de mélange (fig. 6.5) qui souligne l'importance des revêtements de Fe (et de Mn) sur les particules de la MES. Notez que sur cette figure, les données de la section aval de la rivière Saint-Charles s'approchent de la valeur de référence *North American Shale Composite* (NASC) (fig. 6.5). Le pôle riche en Fe (hydroxydes de Fe et Mn) est représenté par de très fortes valeurs du rapport Fe_2O_3/TiO_2 (La Flèche et Camiré, 1996). À l'aide des graphiques de la figure 6.2, on peut postuler que la composition de la matière en suspension pour les échantillons situés entre 17 et 41 kilomètres de l'amont semble contrôlée par un ajout d'oxyhydroxides de Fe (et Mn) dans une proportion relativement importante (probablement entre 40% et 80%). Notez ici que l'estimation du % est seulement indicative car nous n'avons pas isolé le pôle Fe-Mn pour l'analyse. La composition chimique de la majorité des autres échantillons suggère la présence de moins

de 30% d'oxyhydroxides de Fe et Mn. La composition des échantillons de MES des deux échantillonnages semble plutôt être contrôlée par la fraction détritique silicatée.

La présence de revêtements d'oxyhydroxides de Fe et Mn sur la MES peut contrôler le comportement hydrogéochimique de plusieurs métaux traces qui ont la propriété de s'adsorber sur ce type de revêtements (Tessier et al., 1979, Salomons et Förstner, 1984, Tessier et al., 1996, Demong et al., 2001; Stummeyer 2002). C'est ce sujet qui est traité dans la prochaine section.

En mai 2001, les proportions d'oxyhydroxides de Fe et de Mn dans la MES sont inférieures à celles observées en novembre 2000. Elles varient entre 10 % et 45 %. Cette plus faible proportion est probablement due aux sols encore localement gelés au printemps et par conséquent à une alimentation réduite en eaux souterraines dans la rivière Saint-Charles et aussi par un facteur de dilution par les eaux de fonte.

6.2 Présentation des éléments traces dans la MES de la rivière Saint-Charles pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et mai 2001.

Les formations géologiques des Appalaches ne semblent pas beaucoup affecter la composition de la MES de la rivière Saint-Charles en raison de l'urbanisation, du bétonnage et de la présence de zones de remblais qui stabilisent les berges. De plus, cette partie de la rivière est marquée par un très faible dénivelé topographique. Ce faible dénivelé tend également à diminuer les processus d'érosion. Pour faciliter l'interprétation des données et en raison du positionnement des stations d'échantillonnage, nous employons le terme «fleuve» afin de représenter les stations positionnées en aval de la rivière respectivement à 45 et 56 kilomètres de l'amont (station S19 et station S20). Cette partie de la rivière, bien qu'elle coule sur la Plate-forme du Saint-Laurent, draine des eaux qui proviennent du socle précambrien et de la province géologique des Appalaches.

Selon Saint-Julien (1995), c'est aux environs de 21 kilomètres (station S9) de l'aval du Lac Delage que les formations géologiques de la Plate-forme du Saint-Laurent débutent (voir aussi la carte de la délimitation des provinces géologiques au chapitre 2). À cet endroit, les gneiss précambriens sont en contact de faille normale avec les calcaires du Groupe de Trenton.

Dans cette section du mémoire, en supposant que les différentes unités des provinces géologiques contribuent à la production de la MES, nous regroupons les échantillons en fonction de la province géologique du site où ils ont été prélevés.

Les éléments chimiques d'une même famille ou d'un même groupe ont habituellement des propriétés physiques (configuration électronique, grandeur du rayon ionique, force ionique, etc...) semblables et conséquemment des comportements chimiques semblables (ex. K, Rb et Cs ou Ca et Sr). Ceci est démontré par les très fortes corrélations entre le K et le Rb ($R^2 = 0,85$) et le Ca et Sr ($R^2 = 0,88$) dans la MES de la Saint-Charles. Les données géochimiques sont donc présentées par groupes du tableau périodique des éléments ou en fonction de leurs familles d'appartenance. Pour les besoins de l'étude, nous aborderons à nouveau quelques éléments majeurs afin de comparer leurs comportements avec ceux d'autres éléments traces de leurs groupes ou de leurs familles.

Rappelons ici que lors de la fusion du manteau terrestre, les éléments qui ont la plus forte affinité avec les phases minérales sont décrits comme compatibles (ex. Cr, Ni et Mg). Les éléments ayant une préférence pour la composante magmatique sont décrits comme incompatibles (ex. Terres Rares, U, Th et Rb) c'est-à-dire qu'ils sont incompatibles dans la structure cristalline des minéraux et s'y détacheront à la première opportunité (Rollinson, 1993). La notion d'incompatibilité des éléments traces est d'autant plus importante qu'elle explique l'enrichissement considérable en Terres Rares, Th, K, U, Rb etc... observé dans la MES, dans les sols et dans les formations quaternaires reposant sur le socle précambrien (province géologique du Grenville). Dans cette province, les granitoïdes sont dominants et ces roches magmatiques sont très enrichies en éléments incompatibles.

6.2.1 Les métaux alcalins

C'est le groupe d'éléments du groupe 1A du tableau périodique composé entre autres de : Na, K, Rb et Cs. Ces éléments peuvent être très mobiles lors de l'altération hydrothermale des minéraux. Toutefois, dans des conditions de basses températures ces éléments seront fortement associés à des minéraux provenant de sources géologiques. Les minéraux argileux sont normalement enrichis en ces éléments. Comparativement aux

gaz rares, ils ont un électron de plus sur l'orbital S. Cette propriété leur confère une valence de +1 dans le milieu naturel. Ces éléments sont fortement concentrés dans les feldspath sodiques (Na) et potassiques (K) ainsi que dans les micas potassiques. Les anomalies négatives en K pour chaque section de la rivière ne démontrent pas nécessairement que c'est un élément immobile, mais que le NASC représente une moyenne continentale qui intègre des régions géologiques plus riches en roches potassiques que le Grenville.

6.2.2 Les métaux alcalino-terreux

Ces éléments font parti du groupe 2A du tableau périodique et ont deux électrons de plus sur l'orbital S que les gaz rares. Dans le milieu naturel, ces éléments ont une valence de +2. Les éléments présentés sont : le Ca, le Ba et le Sr. Ces derniers sont considérés comme mobiles lors de l'intempérisme chimique des roches et minéraux. Ils sont abondants dans les roches calcaires et aussi dans les roches volcaniques mafiques.

6.2.3 HFSE (*High field strength elements*)

C'est une famille particulièrement intéressante car elle est composée d'éléments chargés très positivement et ayant un potentiel ionique plus grand que 2. Ce sont donc des éléments très réfractaires et relativement peu mobiles. Ces cations incluent les lanthanides : Sc et Y, ainsi que Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb et Ta. Les paires d'élément Hf et Zr ainsi que Nb et Ta ont des rayons ioniques de grosseurs similaires et on leur attribue un comportement géochimique semblable (Rollinson, 1993). Dans cette section nous présenterons seulement les Terres rares, le Ti et le Zr.

6.2.4 Les métaux de transition

Les éléments ayant une couche d'électrons incomplète sur l'orbitale-d sont les éléments de transition. C'est le groupe d'éléments du tableau périodique composé entre autre de : Ti, Cr, Mn et Fe. En géochimie de basse température, le Ti et le Cr sont des éléments immobiles tandis que le Fe et le Mn sont plus mobiles. Le Fe et le Mn peuvent être mobilisés en milieu réducteur et précipités de nouveau en milieu oxydant (Tessier et al., 1979 ; Salomons et Förstner, 1984; Tessier et al., 1996 et Lambs L., 2004).

À la figure 6.6, on observe que les spectres des éléments traces de l'échantillonnage de novembre 2000 ressemblent beaucoup à celui du mois de mai 2001. La figure 6.6 est intéressante car elle permet une comparaison rapide avec les valeurs suggérées pour le NASC.

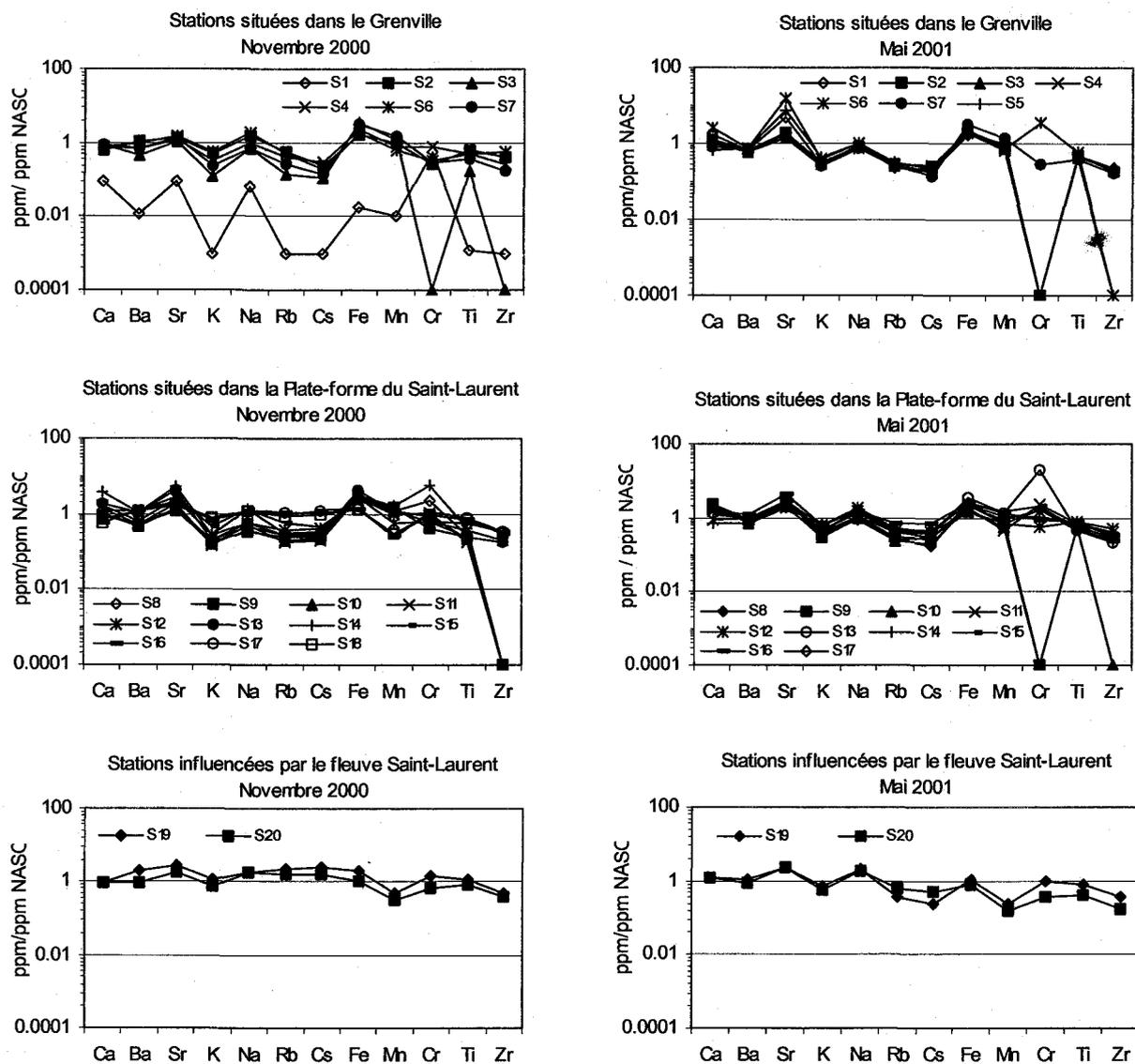


Figure 6.6 : Variation des concentrations des éléments traces normalisées au réservoir de référence NASC (*North American Shale Composite*), contenues dans la MES pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. : Métaux alcalins K, Na, Rb et Cs, métaux alcalino-terreux : Ca, Ba et Sr, métaux de transition : Fe Mn et Cr et HFSE : Ti et Zr. Valeurs de normalisation selon Gromet et al. (1984).

Cependant, l'échelle log tend à compresser les données. Ainsi, il faut souligner que la MES échantillonnée en novembre 2000 montre un enrichissement de 100% à 500% du contenu en Fe et ce malgré la présence d'un léger pic positif en Fe sur la figure 6.6. Donc, nous présentons cette figure pour souligner une certaine cohérence des données et pour justifier la normalisation des données en Terres Rares par rapport à des réservoirs crustaux.

6.2.5 Les terres rares (TR)

La théorie reliée aux processus de fractionnement des terres rares (lanthanides) dans la lithosphère terrestre a été présentée au chapitre 2 (section 2.2.1). Dans un premier temps, nous présenterons les données de ces éléments suite à une normalisation à un réservoir de référence chondritique. Ce réservoir cosmochimique représente la composition de la nébuleuse solaire primitive lors de la formation de notre système planétaire. De plus, les spectres de terres rares (TR) des chondrites-C1 sont parallèles à celui du manteau primitif terrestre.

Lorsque les données analytiques sont normalisées aux chondrites-C1, cette normalisation permet de visualiser la présence d'anomalies positives ou négatives ainsi que de juger l'enrichissement en TR légères (La au Sm) et lourdes (Gd au Lu) des échantillons. En premier lieu, la normalisation permet d'éliminer l'effet «Oddo-Hackins» qui explique l'enrichissement systématique des éléments de numéro atomique pair. La normalisation permet aussi de visualiser l'enrichissement en TR des roches et des matériaux crustaux par rapport aux roches primitives de la Terre (ex. manteau primitif). Toutefois notons que les abondances absolues en TR sont plus élevées dans le manteau primitif terrestre en raison de l'extraction du noyau métallique de la Terre lors de la différenciation interne de la Terre primitive (> 4 Ga).

Nous retrouvons de plus faibles valeurs au lac Saint-Charles. Ce lac est un bassin de décantation pour la MES, ce qui peut minimiser le transport des particules minérales. De plus, il est probable que dans ce bassin, la MES soit dominée par une composante biogénique, ce qui diluerait l'abondance en TR. À la figure 6.7, on voit que les échantillons de MES prélevés dans le Grenville sont plus enrichis en TR que le réservoir chondritique. Dans la MES, le rapport La/chondrite (La_N) varie de 207 à 337 en

novembre tandis qu'en mai ce dernier varie de 108 à 351. Notez que ces valeurs sont supérieures à celles observées dans la croûte continentale supérieure où dans le réservoir NASC. En éliminant l'échantillon du lac Saint-Charles, la valeur minimale de La_N augmenterait à 227. En raison de l'échelle exponentielle de la figure 6.7, il n'est pas facile de mettre en évidence la différence de signatures entre la MES du tronçon recoupant le Grenville et celui recoupant la Plate-forme du Saint-Laurent. C'est pour cette raison que les chiffres sont présentés dans cette partie.

Une forte anomalie négative en europium caractérise la signature en TR de la MES de ces sections (fig. 6.7). Ceci suggère une contribution détritique dominée par une source granitique ou gneissique. Les pics négatifs en europium sur les spectres de terres rares apparaissent dans la majorité des roches felsiques, tels que les rhyolites et les granites. Ils soulignent un appauvrissement en Eu par rapport aux autres terres rares trivalentes adjacentes sur les spectres. L'anomalie négative est normalement créée lors de la cristallisation fractionnée de plagioclases dans les magmas ou lors de la fusion anatexique de la base de la croûte continentale. Dans ce cas, le plagioclase est stable dans les résidus de fusion et retient une proportion importante de l'Eu. Normalement, les roches granitiques du Grenville sont caractérisées par d'importantes anomalies négatives en Eu (Tremblay, 1997). Le fractionnement de l'europium nécessite des processus géologiques impliquant des températures supérieures à 350°C. En phases aqueuses, il faut faire intervenir un pH acide, un faible potentiel d'oxydoréduction et des températures > 300°C pour fractionner l'europium des autres terres rares. Ce processus implique une réduction de Eu^{3+} en Eu^{2+} , ce qui transforme l'ion en un élément de rayon ionique et de valence semblable au Sr^{2+} et au Ca^{2+} . Une fois transformé en Eu^{2+} , l'europium devient soluble dans les fluides hydrothermaux. Normalement, ce découplage est observé au voisinage des fumerolles noirs (*black smokers*) sous-marines sur les dorsales médio-océaniques. Ainsi, les processus hydrogéochimiques de basses températures ne peuvent découpler l'europium des autres TR trivalentes (ex. Sm et Gd). Ce phénomène enregistré dans la composition de nos échantillons s'est nécessairement produit lors de la formation des roches grenvilliennes.

Le rapport La/chondrite de la MES de la section de la Plate-forme est compris entre 133 et 258 pour novembre et entre 143 et 245 pour le mois de mai. Il est à noter que

ces valeurs recourent légèrement celles observées dans le tronçon grenvillien. Les anomalies négatives en europium sont légèrement plus faibles dans la section de la Plateforme probablement en raison de la présence des principales formations sédimentaires carbonatées naturellement pauvres en TR.

En mai, la similarité entre le spectre de TR de l'échantillon S18 et les stations influencées par le fleuve suggère l'influence des fortes marées printanières (fig. 6.7). Toutefois, il faut noter que le niveau de marée maximal le jour de l'échantillonnage était de 3,7 mètres. Selon Grantham (2001), seules les marées hautes de pleine mer réussissent à influencer la rivière car elles ont une élévation géodésique de 5,1 mètres ce qui est bien au-dessus des portes du barrage Joseph-Samson qui ont une hauteur de 3,05 mètres. Ceci montre que les marées du Fleuve Saint-Laurent ont pu influencer partiellement cette section de la rivière située en amont du barrage.

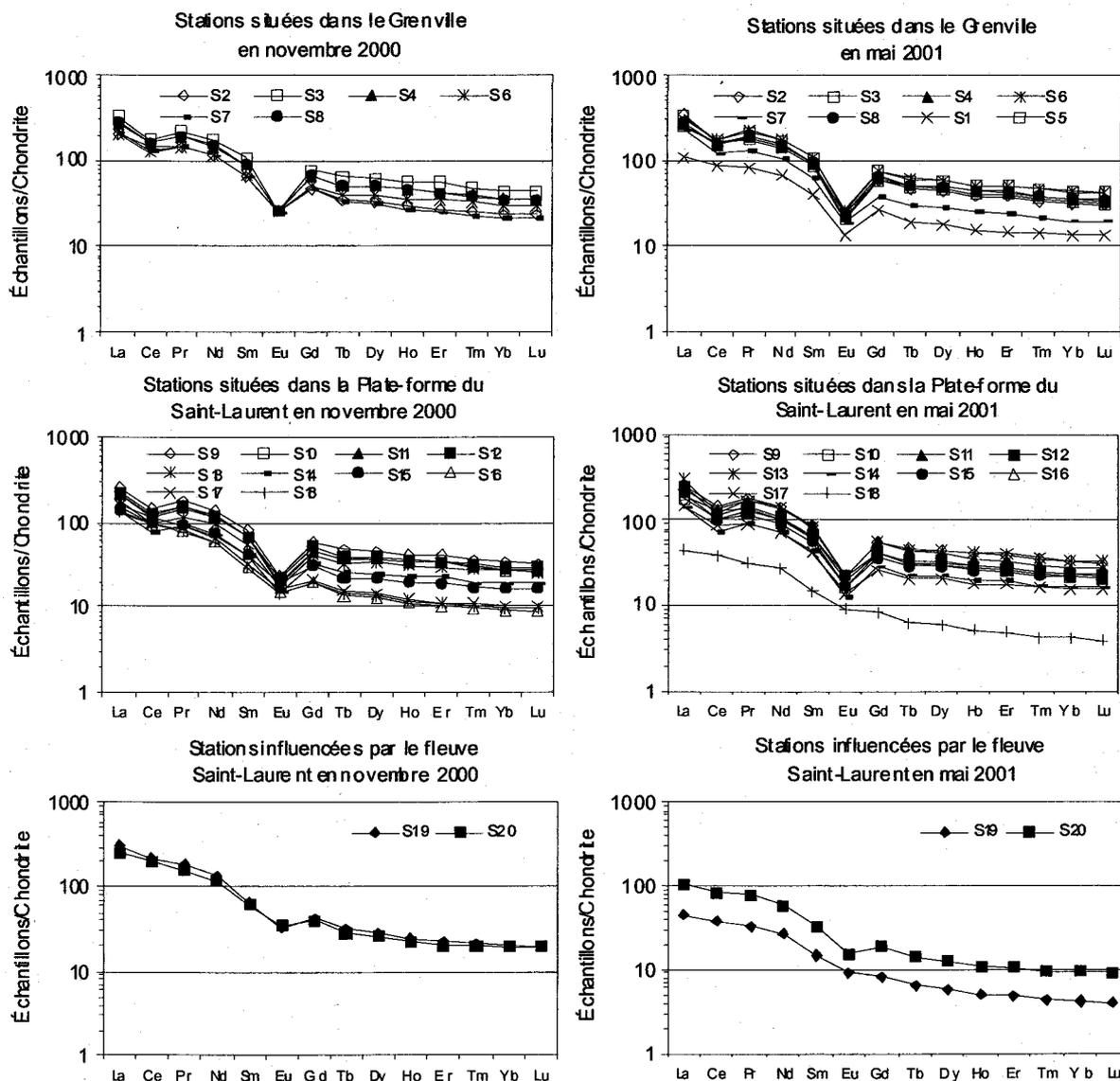


Figure 6.7 : Diagrammes des terres rares normalisées à la valeur moyenne des chondrite de type C1 pour la MES de la rivière Saint-Charles. Les échantillons de MES sont regroupés selon la province géologique respective de la station d'échantillonnage. Les stations S19 et S20, qui sont influencées par le fleuve, sont regroupées à part. Valeurs de normalisation selon Taylor et McLennan (1985).

Les échantillons de MES des stations S19 et S20 sont moins enrichis en TR que les échantillons des deux autres sections de la rivière en raison de leurs emplacements dans la zone de marnage influencée par le fleuve. Cette différence de composition pourrait s'expliquer par la présence de la MES fluviale provenant de formations géologiques contenant de plus faibles concentrations en TR. Par exemple, les eaux provenant des Grands Lacs drainent des terrains riches en roches carbonatées et le secteur de Montréal est dominé par la présence de roches calcaires. Ces dernières sont appauvries en TR par rapport aux roches granitiques et gneissiques du bouclier précambrien. De plus, il est possible que la signature en terres rares de la MES du fleuve soit dominée par l'érosion de sédiments provenant de l'ancienne Mer de Champlain.

La figure 6.8 montre les diagrammes des teneurs moyennes en TR normalisées aux chondrites pour les trois tronçons de la rivière : le Grenville (les sites S1 à S9; de 0 à 23 kilomètres de l'amont), la Plate-forme du Saint-Laurent (les sites S10 à S18; de 25 à 47 kilomètres de l'amont) et la section influencée par le fleuve (les sites S19 et S20; de 50 à 56 kilomètres de l'amont). En plus cette figure présente des valeurs suggérées pour le réservoir de référence *Post Archean Average Australian Shale* (PAAS).

La moyenne des concentrations en TR de la MES prélevée dans le tronçon grenvillien est plus élevée en raison de la présence de formations géologiques riches en TR. Dans le tronçon recoupant la séquence de Plate-forme, la MES montre des spectres de TR parallèles à ceux observés dans le tronçon grenvillien. Dans la séquence de la Plate-forme, l'abondance absolue des TR est légèrement inférieure à celle du tronçon grenvillien. Cette dilution apparente pourrait refléter une augmentation de la composante biogénique ou de la composante oxyhydroxides de Fe-Mn. De plus, normalement l'érosion des roches du tronçon de la Plate-forme du Saint-Laurent, constituée principalement de roches sédimentaires (ex. roches carbonatées) et terrigènes (ex. grès siliceux), devrait produire des particules relativement appauvries en TR. Ainsi, dans l'hypothèse d'une forte contribution de particules provenant de l'érosion des roches de la Plate-forme, nous devrions observer des abondances en TR beaucoup plus faibles. Cependant, ce n'est pas un phénomène observé dans le tronçon de la rivière recoupant cette province géologique.

Les concentrations en TR du fleuve s'éloignent de la tendance générale observée dans la MES de la rivière Saint-Charles et montrent des spectres de TR semblables à la valeur du réservoir du PAAS pour l'échantillonnage du mois de mai 2001. En novembre 2000, le spectre de terres rares moyen de la MES provenant du fleuve tend à se rapprocher de celui observé dans la MES du tronçon de la Plate-forme du Saint-Laurent (fig. 6.8). Ceci pourrait suggérer une dynamique sédimentaire fluviale différente par rapport au printemps.

Les concentrations en TR aux sites influencés par le fleuve représentent probablement la contribution de la MES provenant des argiles marines de la Mer de Champlain et des principaux tributaires du Saint-Laurent qui se mélangent uniformément lors des marées hautes. Rappelons ici que la MES des principaux tributaires du Saint-Laurent provient de diverses régions géologiques telles que la Plate-forme du Saint-Laurent, les Appalaches, le Grenville et les Adirondacks (Tremblay, 1997). Ceci explique en partie les différences entre la rivière Saint-Charles et le fleuve pour mai 2001.

Dans la MES, la différence d'abondances en TR légères (La à Sm) par rapport aux TR lourdes (Gd à Lu) est observée aux deux périodes d'échantillonnage (fig. 6.8). La présence de minéraux lourds (zircon et grenat) dans la MES pourrait occasionner un enrichissement en TR lourdes. Cependant, en raison de la haute densité de ces minéraux, la MES comporte rarement des proportions significatives de minéraux lourds riches en TR. Dans la rivière Saint-Charles, ces minéraux devraient être concentrés dans les sables grossiers et dans les zones riches en galets. Plus on descend vers le fleuve, moins l'anomalie en Eu est importante (fig. 6.8). Ceci reflète probablement une importance moindre du Bouclier précambien. De S9 à S15, les signatures en TR sont presque identiques à celle de la MES du tronçon grenvillien. Ceci démontre une faible contribution de matériaux provenant de l'érosion du tronçon de la Plate-forme du Saint-Laurent (roches sédimentaires carbonatées).

Il est intéressant de souligner que le réservoir de référence PAAS suit relativement bien l'allure des spectres de TR de la MES de la rivière Saint-Charles, bien qu'il soit moins enrichi. Les constituantes sédimentaires utilisées dans la compilation de PAAS sont généralement plus grossières que la MES transportée par la rivière Saint-Charles (LaFlèche, comm. pers., 2003). Ainsi, il est probable que les concentrations plus faibles

en TR du PAAS reflètent une légère dilution par le quartz qui est plus abondant dans les shales que dans la MES de la rivière Saint-Charles. Les shales utilisés pour l'estimation du PAAS et du NASC sont constitués d'un mélange d'argiles et de silt (Gromet et al., 1984 ; Taylor et McLennan, 1981). La fraction silteuse est souvent enrichie en quartz et feldspath, deux phases minérales pauvres en TR.

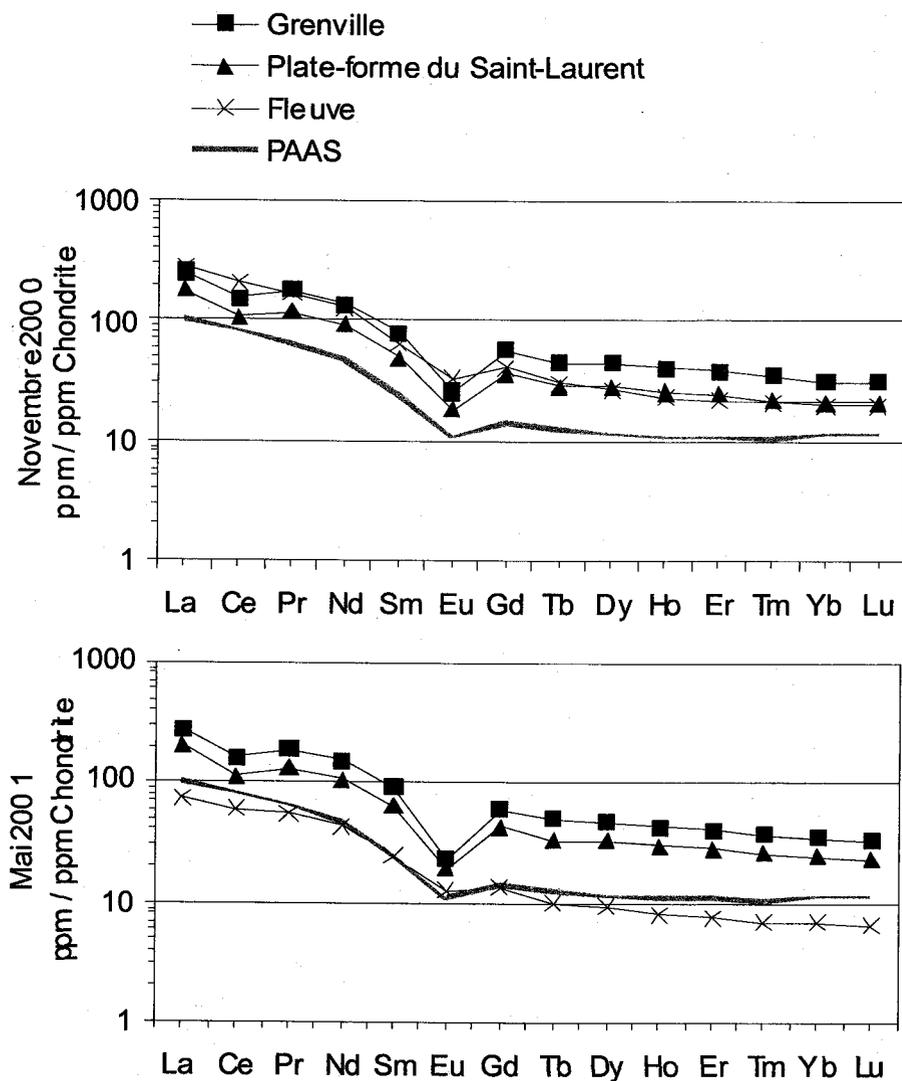


Figure 6.8 Diagrammes des concentrations en Terres Rares contenues dans la matière en suspension de l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. Valeurs normalisées aux Chondrites-C1. Valeurs de normalisation selon Taylor et McLennan (1985).

Les TR de la matière en suspension de la Saint-Charles normalisée au PAAS montrent des enrichissements moindres (allant de 0,6 à 4,0) comparativement à la normalisation au réservoir chondritique (allant de 8 à 500) (fig. 6.9). Ceci reflète le fait

que les météorites de type Chondrite-C1 ne représentent plus adéquatement les abondances en TR terrestres car la Terre s'est différenciée depuis plus de 4,4 milliards d'années. Les réservoirs NASC et PAAS sont semblables à la croûte continentale supérieure. Donc, il n'est pas étonnant de constater que la MES de la rivière Saint-Charles et du fleuve Saint-Laurent montrent des similitudes avec les valeurs observées dans les shales protérozoïques et phanérozoïques. En effet, le réservoir PAAS est issu d'une compilation statistique de la géochimie de 23 shales Post Archéen de l'Australie. Bien que le réservoir *North American Shale Composite* (NASC) lui ressemble beaucoup (fig. 2.2), le PAAS est aussi représentatif de la composition moyenne de la croûte continentale exposée à la surface de la Terre et des matériaux détritiques transportés par les rivières vers les océans (ex. Condie, 1991).

Comme on le voit à la figure 6.9, le spectre des TR du PAAS reflète relativement bien celui des sédiments de rivière Saint-Charles. Le spectre du réservoir PAAS est également enrichi en TR légères lorsqu'il est normalisé aux chondrites et montre un fractionnement relativement plat des TR lourdes. Il montre de plus une faible anomalie négative en europium. Le faible fractionnement relatif des TR à la figure 6.9 suggère une certaine similarité entre les données géochimiques des échantillons de MES de la rivière Saint-Charles et celles ayant servi à l'estimation de la valeur du réservoir PAAS.

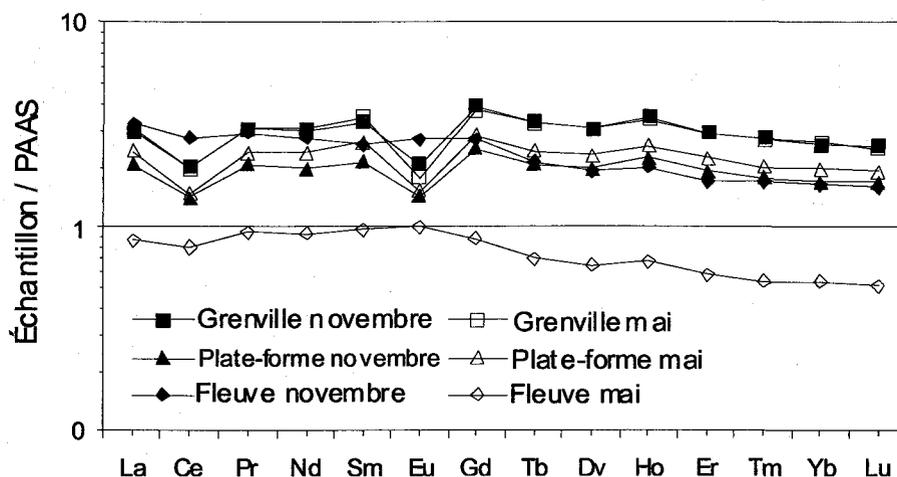


Figure 6.9 Diagramme des TR contenues dans la matière en suspension normalisées au PAAS. Valeurs de normalisation selon McLennan (1989).

Dans l'ensemble les TR de la MES de la Saint-Charles sont 2 à 4 fois plus concentrées que dans le PAAS.

L'enrichissement est plus accentué dans la MES du tronçon grenvillien, probablement dû à la présence de particules de formations granitiques riches en TR (contenus dans les minéraux). La constance des spectres des TR de MES du tronçon grenvillien peut se voir à la superposition des spectres moyens pour l'échantillonnage de mai et de novembre.

Les stations du secteur fluvial en mai montrent des spectres de TR relativement plats avec de très faibles anomalies positives en europium par rapport au PAAS. La présence de feldspaths (plagioclase) caractérisés par une anomalie positive en europium, pourrait expliquer cet enrichissement (ex. Taylor et McLennan, 1985). Rappelons ici que, lors de la formation de ces minéraux en milieu réducteur, l' Eu^{2+} se substitue au Sr^{2+} dans la structure cristalline des feldspaths en raison de leurs rayons ioniques semblables, permettent ainsi un enrichissement considérable dans la phase minérale comparativement aux autres TR trivalentes (ex. Sm et Gd). De plus les feldspaths alcalins possèdent souvent des concentrations en TR légères plus élevées que les TR lourdes (ex. Taylor et McLennan, 1985). Une plus grande proportion en particules de quartz et de feldspath en mai dans le fleuve pourrait expliquer la dilution des spectres de TR tout en créant un enrichissement en Eu. Aussi la dynamique sédimentaire est probablement différente en mai car les macrophytes ne peuvent retenir la MES dans les lacs fluviaux du Saint-Laurent. Ainsi, il est possible que des particules carbonatées (calcaires) soient plus abondantes à ce moment. Dans leur article, Leleyeter et al. (1999) montre que les carbonates peuvent avoir de légères anomalies positives en Eu. Il est probable qu'en mai les très hauts débits du Saint-Laurent permettent une plus grande érosion des sédiments de la Mer de Champlain. En novembre, les précipitations sont plus localisées et l'apport de particules de MES des tributaires grenviliens peut être dominant sur la rive nord du fleuve (secteur S18 et S19)

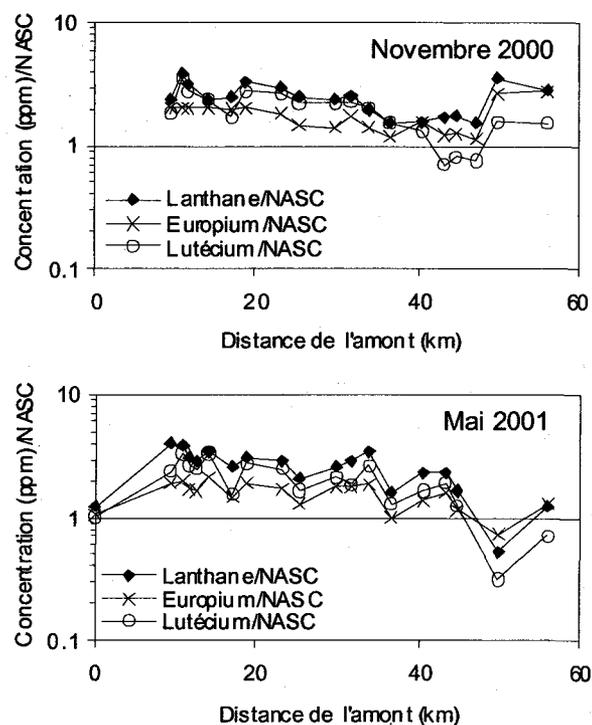


Figure 6.10 Diagramme des abondances en La, en Eu et en Lu de la MES normalisés au NASC pour les échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001 portées en fonction de la distance. Valeurs de normalisation selon Gromet et al. (1984).

À la figure 6.10 on peut observer qu'en novembre les sites S19 et S20 de la zone influencée par le fleuve sont enrichis par rapport au NASC, tandis qu'en mai les mêmes stations sont appauvries. Ces variations reflètent probablement une différence de dynamique sédimentaire du fleuve en novembre et en mai. Par exemple, en mai, la MES fluviale s'éloigne le plus de la composition de la MES de la rivière Saint-Charles. Les forts courants du fleuve au printemps pourraient plus fortement éroder le lit du fleuve. De plus, le processus de rétention de la MES par les macrophytes du Lac Saint-Pierre est minimum, ce qui permet l'arrivée de particules carbonatées des grands lacs et possiblement de la région de Montréal. En novembre, avec un débit fluvial modéré, il est possible que la MES soit dominée par des sources provenant des tributaires de la rive nord.

6.2.5.1 Anomalies en europium de la MES de la rivière Saint-Charles

Dans la MES, l'appauvrissement ou l'enrichissement relatif en Eu par rapport aux TR adjacentes sur les diagrammes de TR normalisées aux chondrites, peut être utilisé afin de préciser certaines caractéristiques géochimiques des régions sources des sédiments

(voir section 5.9). Plus le rapport Eu_N/Eu_N^* est près de 0 (fig 6.11), plus l'anomalie en Eu est négative sur les spectres de TR. L'anomalie en europium peut être calculée de la façon suivante (McLennan ; 1995) :

$$Eu_N/Eu_N^* = Eu_N / (Sm_N * Gd_N)^{0.5}$$

Eu_N : Concentration en ppm de l'Eu dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

Sm_N : Concentration en ppm de Sm dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

Gd_N : Concentration en ppm de Gd dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

Eu_N^* : Valeur interpolée d'Eu normalisée au Chondrite-C1 par rapport aux abondances en Sm et en Gd normalisées au chondrite-C1.

Normalement, les roches granitiques du Grenville sont caractérisées par d'importantes anomalies négatives en europium de l'ordre de 0,6 (Tremblay, 1997). Sur la figure 6.11, plus on descend vers le fleuve moins l'anomalie en Eu est importante en raison de l'éloignement de la région source grenvillienne et d'un apport progressif en MES fluviale dans la partie aval de la rivière. Comparativement aux données présentées par Tremblay (1997), les anomalies négatives en europium de la matière en suspension de la rivière Saint-Charles provenant du tronçon grenvillien ont une moyenne de 0,39 en novembre et de 0,30 en mai, ce qui témoigne d'une anomalie négative en Eu plus importante que celles rapportées par Tremblay (1997) pour d'autres tributaires de la rive nord du Saint-Laurent. Il faut souligner que l'échantillonnage de Tremblay a été fait aux embouchures des rivières. Il est probable que certaines de ses analyses aient été influencées par les unités géologiques phanérozoïques et quaternaires (ex. sédiment de la mer de Champlain) qui bordent localement la rive nord du fleuve Saint-Laurent.

Les anomalies d'europium sont plus constantes dans la partie amont et plus prononcées dans la partie aval de la Saint-Charles en mai qu'en novembre. Ces différences pourraient être dues au phénomène de dilution des particules non-minérales. Ces dernières pourraient entre autre atténuer certaines signatures géochimiques en TR. Une autre possibilité intéressante consisterait en un processus d'adsorption important de TR dissoutes sur les revêtements d'hydroxyde de Fe et de Mn sur la MES d'automne, en amont particulièrement.

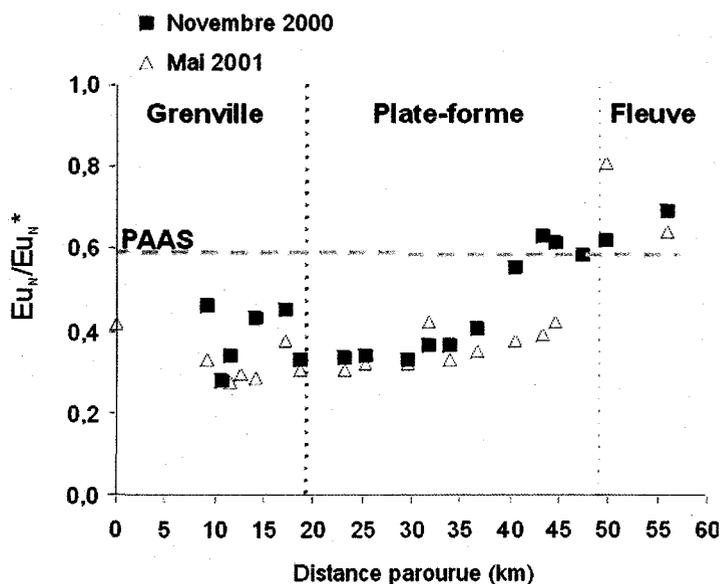


Figure 6.11: Rapport Eu_N/Eu_N^* dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. Valeurs de normalisation selon McLennan (1989).

Il est peu probable que les TR dissoutes soient caractérisées par de fortes anomalies négatives en Eu. Dans ce modèle, les TR dissoutes proviendraient de sources d'eaux souterraines se jetant dans la rivière Saint-Charles. Il a été démontré que les hydroxydes de fer peuvent adsorber de fortes concentrations de TR dissoutes et ce sans fractionnement préférentiel des TR légères ou lourdes. Ce phénomène a été démontré en laboratoire et aussi lors de l'étude des formations de fer précambriennes (LaFlèche M., com. pers., 2003). Donc, si la MES de la rivière Saint-Charles contient une fraction minérale grenvillienne caractérisée par de fortes anomalies négatives en Eu et une composante en TR adsorbée sur les revêtements de Fe-Mn, alors le mélange des 2 sources de TR pourrait atténuer les anomalies en Eu de la MES.

6.2.5.2 Anomalies en cérium de la MES de la rivière Saint-Charles

Normalement les roches granitiques et gneissiques du Bouclier ne montrent pas d'anomalies négatives ou positives en cérium. Pour la rivière Saint-Charles, la MES montre dès le début la présence d'une anomalie négative qui n'est pas caractéristique des roches grenvilliennes.

Plus le rapport Ce_N/Ce_N^* est près de 0 à la figure 6.12, plus l'anomalie en Ce est négative sur les spectres de TR. L'anomalie en cérium peut être calculée de la façon suivante (McLennan, 1995) :

$$Ce_N/Ce_N^* = Ce_N / ((La_N + Pr_N) / 2)$$

Ce_N : Concentration en ppm de Ce dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

La_N : Concentration en ppm de La dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

Pr_N : Concentration en ppm de Pr dans l'échantillon / concentration en ppm dans la chondrite-C1

Ce_N^* : Valeur interpolée de Ce normalisée au chondrite-C1 par rapport aux abondances en La et en Pr normalisées au chondrite-C1.

L'anomalie négative en cérium sur les spectres de TR s'explique par l'oxydation du cérium³⁺ en cérium⁴⁺ qui est une forme chimiquement plus stable (Bau, 1999) en milieu oxydant. Sous cette valence tétravalente, le cérium peut s'adsorber sur des surfaces d'oxyhydroxides (FeOOH ou MnO₂) ou plus fréquemment rencontré en milieu marin précipiter sous la forme de CeO_{2(s)}. Selon Bau (1999) la présence de surface d'oxyhydroxides de fer favorise l'oxydation de Ce³⁺ en Ce⁴⁺. C'est à un pH supérieur à 7 que l'on retrouve la plus grande proportion de Ce⁴⁺ adsorbé sur les surfaces d'oxyhydroxides de fer ou sur les oxyhydroxides de manganèse (Bau, 1999; Heinen de Carlo et Wen., 1998).

On peut voir à la figure 6.12 que les anomalies en cérium sont relativement constantes pour les deux périodes d'échantillonnage. La plus forte anomalie de cérium dans la MES en aval peut s'expliquer en partie par la conductivité plus élevée de l'eau de la rivière en milieu urbain qui varie de 300 à 450 μ S/cm (fig. 5.4) et par la présence de l'eau du fleuve pour ce qui est des stations S18 et S19. Selon Heinen de Carlo et Wen (1998), plus la force ionique de l'eau augmente plus l'adsorption du Ce⁴⁺ sur les surfaces d'oxyhydroxides de fer et de manganèse diminue. Il est à noter que c'est en amont, de 0 à 30 km de l'amont, que la force ionique de l'eau de la rivière Saint-Charles est plus faible (fig. 5.4). Cette propriété favoriserait donc l'adsorption du Ce sur les revêtements. Dans la rivière Saint-Charles, les plus fortes proportions de revêtements d'oxyhydroxides de Fe et Mn semblent se former entre 20 et 40 kilomètres de l'amont (voir fig. 5.11, fig. 6.1 et fig. 6.2) où le pH se situe entre 7,5 et 8, ce qui favoriserait aussi grandement l'adsorption.

Il est à noter que les valeurs des anomalies de cérium sont en-dessous de la valeur de référence de PAAS.

On note un gradient de la force ionique de l'amont vers l'aval. Il est probable que l'augmentation de force ionique défavorise aussi l'adsorption de, non seulement le Ce, mais en général tout les cations (compétitivité ionique).

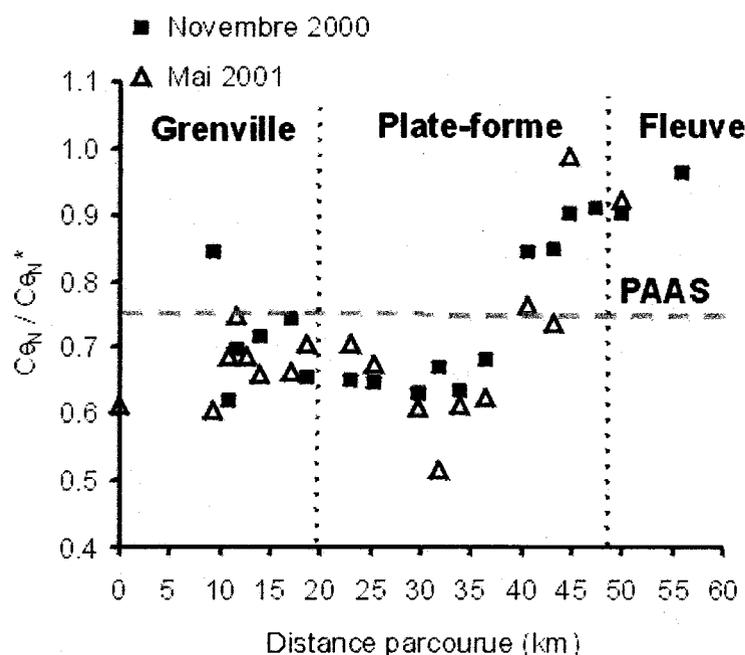


Figure 6.12: Rapport Ce_N / Ce_N^* dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour des échantillonnages de novembre 2000 et de mai 2001. Valeurs de normalisation selon McLennan (1989).

La figure 6.13 montre que le fractionnement du cérium est particulièrement important en novembre 2000. Plus les concentrations en oxyhydroxides de fer augmentent dans la MES, plus le rapport en lanthane sur cérium augmente et ce plus particulièrement pour les stations d'échantillonnage situées entre 20 et 40 kilomètres de l'amont. Pour la période de novembre 2000, la fraction non-détritique du fer contenu dans la MES semble influencer très fortement les concentrations en Ce et pourrait favoriser l'adsorption de cet élément sur ses revêtements.

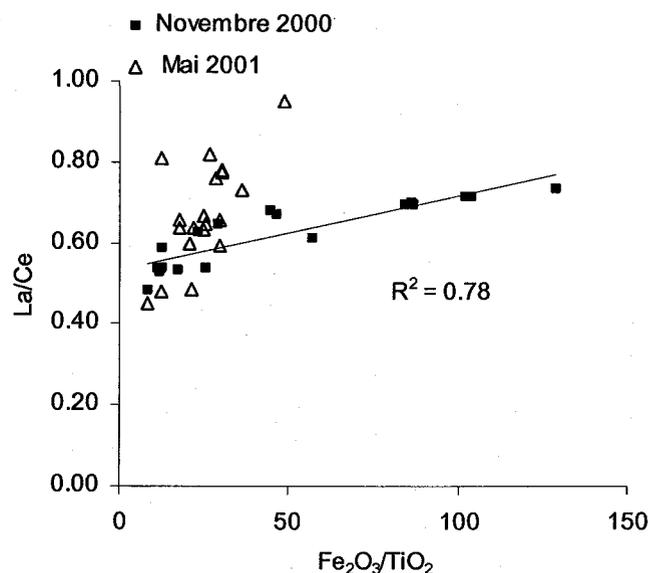


Figure 6.13: Variation du rapport La/Ce en fonction des concentrations d'oxyhydroxides de fer approximé par le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ présente dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.

La figure 6.14 démontre que le degré de l'anomalie en europium et le degré de l'anomalie en cérium dans la MES au mois de novembre 2000 varient ensemble de l'amont vers l'aval de la rivière Saint-Charles ($R^2 = 0.93$). On peut donc voir un mélange entre des processus géologiques (anomalies en Eu) et des processus hydrogéologiques (anomalies en Ce). Les anomalies en europium sont dus au fractionnement des plagioclases, un minéral présent principalement dans les gneiss et les granites; deux constituant du Grenville. C'est une des raisons pour lesquelles elles sont plus fortes en amont. Ce fractionnement s'affaiblit de l'amont vers l'aval (fig. 6.11). Les faibles anomalies négatives de l'Eu présentent dans la MES des eaux du fleuve Saint-Laurent sont reliées en partie à une dilution due au mélange de particules diverses et à la dynamique fluviale en fonction de la période. De plus, l'affinité de l'Eu pour les carbonates de la Plate-forme, en raison de la substitution de l'Eu avec Sr (même rayon ionique), peut réduire l'anomalie négative de l'Eu présent dans la MES (Leleyter et al., 1999).

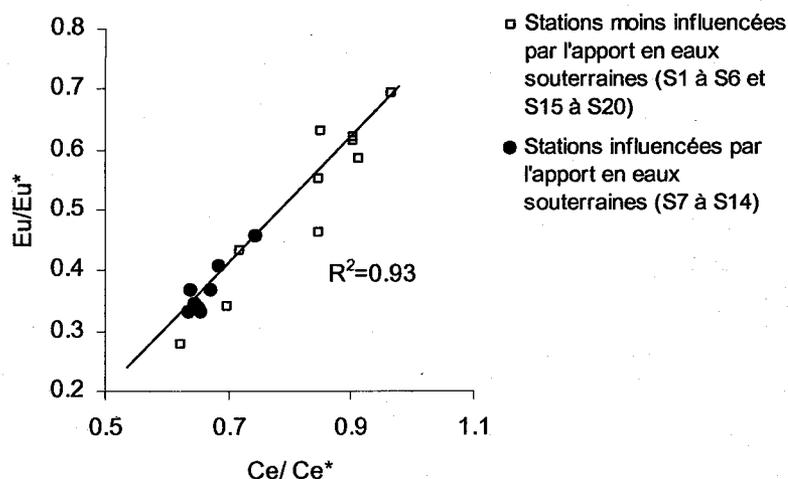


Figure 6.14: Variation des anomalies en cérium en fonction des anomalies en europium présent dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles pour l'échantillonnage de novembre 2000.

Pour leur part, les anomalies en cérium s'expliquent par le changement d'oxydoréduction du milieu qui transforme le Ce^{3+} dissous en Ce^{4+} particulaire adsorbé sur les revêtements. Les anomalies en Ce sont beaucoup plus accentuées en amont, en raison de l'apport en eau souterraine plus accentué de 17 à 40 kilomètres de l'amont. Cet apport favorise les formations d'oxyhydroxides sur les particules. Nous pouvons donc observer une variation qui est accentuée

6.2.5.3 Sommation des abondances en TR légères et lourdes dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles

La normalisation des concentrations en TR au Ti dans la MES permet de minimiser les phénomènes de dilution et permet de mieux voir certaines tendances géochimiques. L'approche repose sur le fait que dans les sédiments continentaux les TR et le Ti sont normalement associés à des sources détritiques minérales tandis que les particules de matières organiques et la silice biogénique contiennent généralement des concentrations négligeables de TR et de Ti. Donc, lors de la dilution par la matière organique, les abondances en TR et Ti devraient diminuer proportionnellement. Ainsi, en absence de processus de TR dissoutes dans l'eau, les rapports TR/Ti de la MES affectée par une dilution organique devraient être semblables à ceux de la MES détritique exempte de particules organiques.

À l'automne, les rapports TR/Ti sont plus élevés qu'au printemps (fig. 6.15). L'enrichissement considérable observé en novembre à la station S3 s'explique par une très forte diminution de la concentration en titane. À cette station les abondances en Ti sont 3 fois plus petites que la tendance observée ailleurs dans la rivière Saint-Charles (annexe 5.7). En normalisant à la moyenne des teneurs en titane mesurées dans la MES de la rivière, on obtient un rapport TR/Ti qui suit la tendance observée entre les stations S2 et S3. Ceci peut suggérer un problème lors de la détermination analytique du Ti. En novembre, c'est dans le tronçon longeant la Plate-forme du Saint-Laurent (entre S10 et S18) que les rapports en TR/Ti sont les plus élevés. En mai 2001, on observe une diminution progressive du rapport TR/Ti de l'amont vers l'aval. La MES du tronçon grenvillien montre de plus hauts rapports. Cette différence ne peut provenir d'un taux d'érosion plus prononcé en mai car on ne devrait pas observer de grandes variations des rapports TR/Ti. En réalité, une augmentation du taux d'érosion (et de transport de MES) devrait simultanément augmenter les abondances en TR et en Ti de la MES en diminuant la proportion de particules non-minérales.

La figure 6.16 montre les fortes corrélations entre la sommation des TR normalisée au titane et à l'aluminium avec les fractions non-détritiques (oxyhydroxides) de fer et de manganèse dans la MES du mois de novembre 2000. Les fortes corrélations suggèrent un phénomène d'adsorption des TR dissoutes sur les revêtements d'oxyhydroxides de fer et de manganèse. Ce phénomène semble particulièrement présent entre 20 et 40 kilomètres de l'amont où se forment les revêtements de Fe et Mn sur les particules. Les échantillons influencés par le fleuve Saint-Laurent contiennent moins d'oxyhydroxides, donc contribuent faiblement à la fraction des TR dissoutes. La normalisation à l'aluminium permet de valider que les corrélations ne sont pas uniformisées en raison de l'utilisation du même coefficient de normalisation (Ti) pour l'axe des X et l'axe des Y sur le graphique de la figure 6.16.

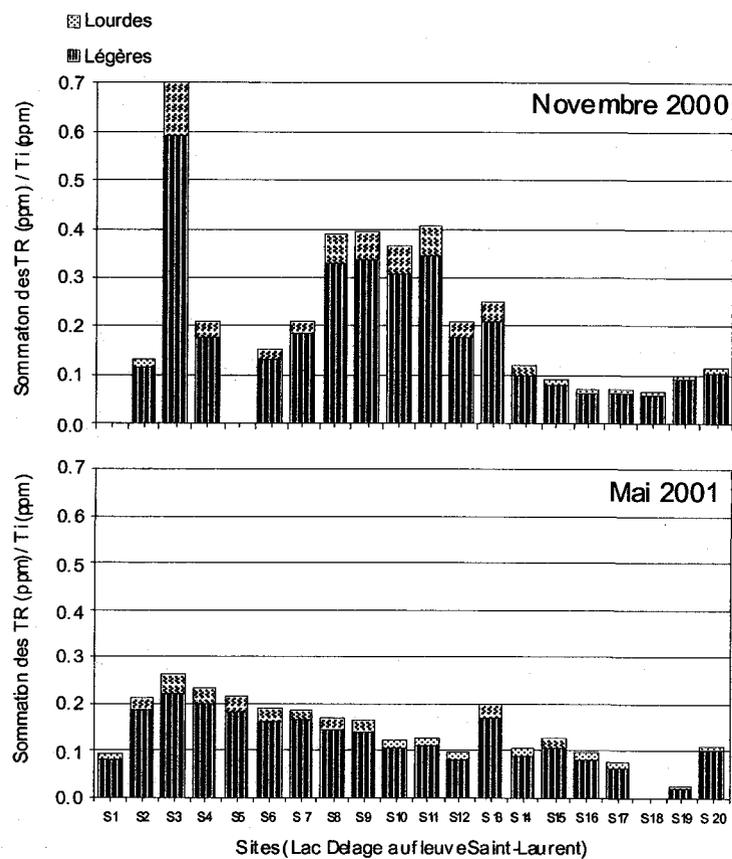


Figure 6.15: Sommaton des abondances en TR normalisées au titane dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles. Stations de l'amont vers l'aval, de 0 à 56 kilomètres. Notez que la normalisation au Ti a comme objectif de minimiser l'effet de dilution par la présence de la matière organique.

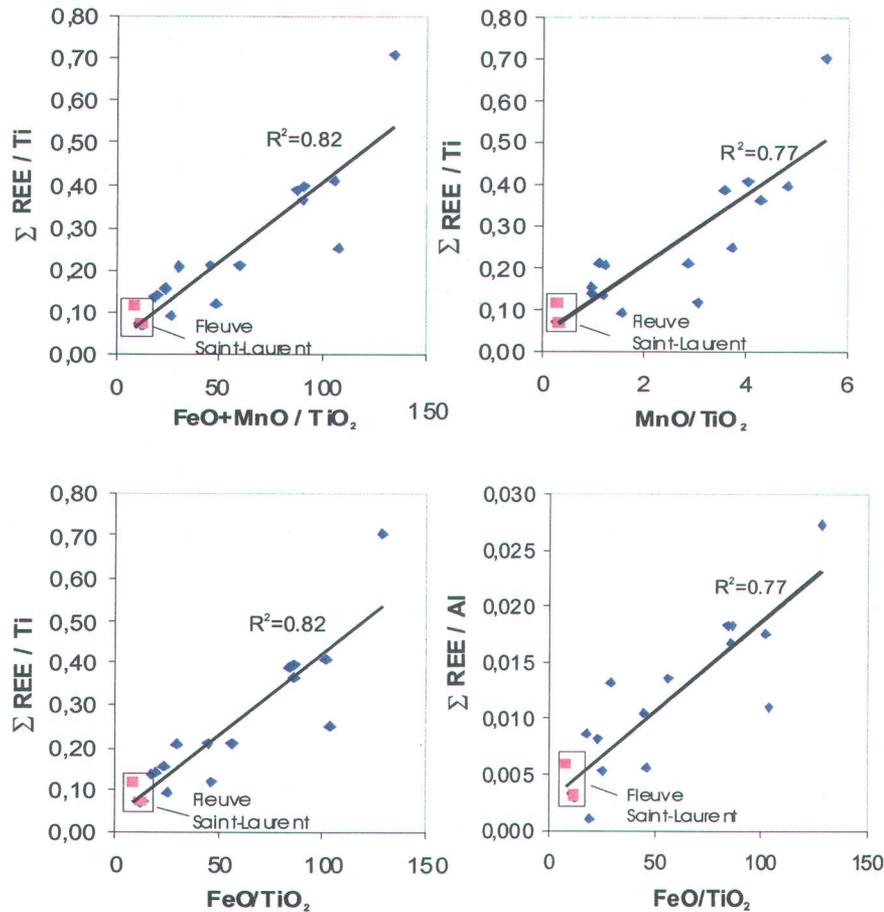


Figure 6.16: Somme des abondances en TR normalisées au titane en fonction des oxyhydroxydes de Fe et de Mn dans la matière en suspension de la rivière Saint-Charles.

6.3 Caractérisation chimiques des échantillons de formations superficielles et de sédiments de fond de la rivière Saint-Charles.

6.3.1 Caractéristique chimique totale des échantillons de formations superficielles et de fond de la rivière Saint-Charles

La figure 6.17 présente les concentrations en TR d'échantillons de formations superficielles (FS) du bassin versant et de sédiments de fond (Séd.) de la rivière Saint-Charles. Les sédiments de fond de la rivière sont constitués de minéraux provenant de multiples formations superficielles érodées et lessivées à divers degrés en bordure de la rivière ainsi que de particules organiques diverses (végétales et animales). Les particules fines des formations superficielles bordant la rivière peuvent être emportées par les divers

agents météoritiques et par le ruissellement vers la rivière. En fonction du débit du cours d'eau ces particules peuvent sédimenter ou être transportées vers l'aval (MES). Donc, il est probable qu'il y ait un certain effet d'homogénéisation par rapport aux formations superficielles du bassin versant lors de la sédimentation des particules fines.

A la figure 6.17, on voit que les échantillons de formations superficielles sont plus enrichis en TR par rapport au NASC comparativement aux échantillons de sédiments de fond de la rivière. Plus spécifiquement, les abondances en TR lourdes des formations superficielles montrent une plus grande variabilité. Cette dernière reflète possiblement l'influence des particules fines présentes dans les formations superficielles. Les minéraux pauvres en TR comme le quartz et les feldspaths et la présence de matières organiques diluent les concentrations en TR. Selon la minéralogie de sédiments obtenue par diffraction-X (tableau 5.3), la prédominance du quartz et des feldspaths suggère un tri hydraulique des particules fines et plus grossière comme les micas.

L'échantillon FS 7 situé près de la station d'échantillonnage S11 est le moins concentré des échantillons de formation superficielles. La granulométrie de cet échantillon indique des silts et des argiles à 60 % (voir fig. 5.12). Cet échantillon provient d'alluvions de terrasses fluviales. Les formations carbonatées pauvres en TR, pourraient expliquer ces faibles concentrations.

On observe à la figure 6.18 que les échantillons de sédiments de fond de la rivière sont plus riches en Ca, et moins riche en Al que les échantillons provenant des formations superficielles. Ces concentrations pourraient refléter la présence d'actinolite, un minéral trouvé en grande concentration dans les sédiments et un lessivage de fines particules alumineuses comme les micas.

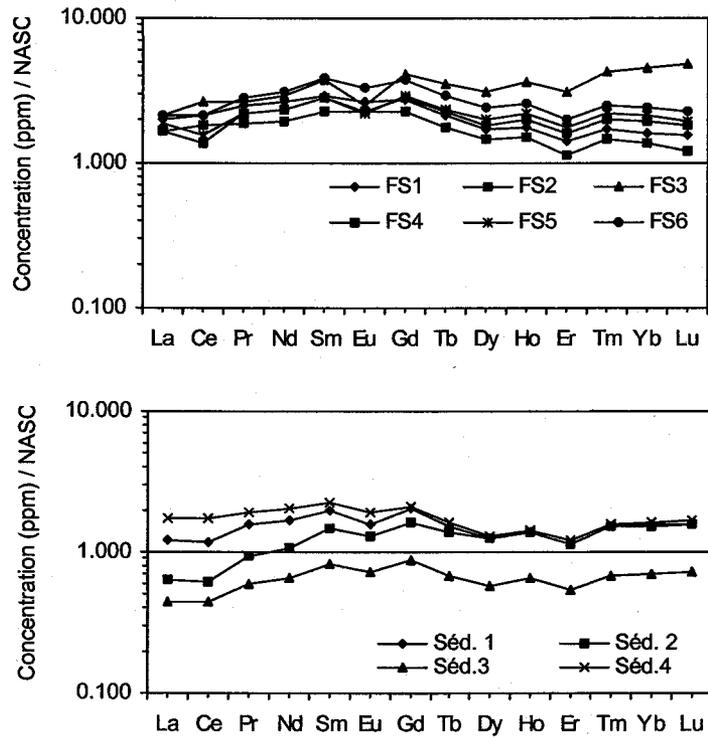


Figure 6.17: Diagrammes des terres rares normalisées au NASC pour les échantillons de formations superficielles (FS) présents dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles et de sédiments de fond de la rivière Saint-Charles. Les échantillons sont présentés en deux groupes distincts : les formations superficielles et les sédiments de fond. Valeurs de normalisation selon Gromet et al. (1984).

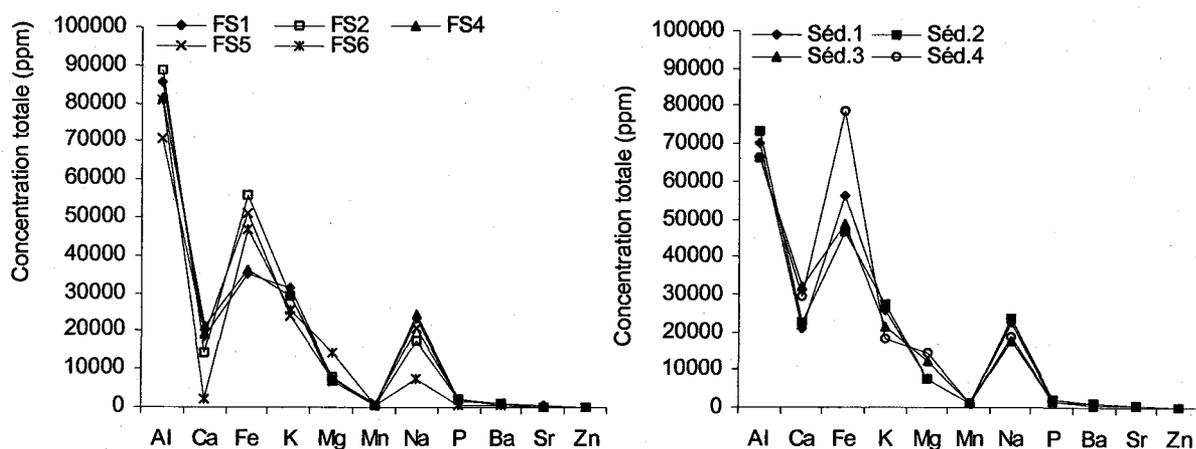


Figure 6.18: Concentration de certains éléments majeurs et traces contenus dans les échantillons de formations superficielles (FS) du bassin versant et de sédiments (Séd.) de fond de la rivière Saint-Charles.

6.3.2 Extractions partielles de certains éléments dans les échantillons de formations superficielles et de sédiments de la rivière Saint-Charles.

Les extractions partielles ont été réalisées à l'aide d'une solution de HCl 1N. La fraction granulométrique < 0.063 mm des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles a été utilisée. L'avantage de cette technique est de connaître la proportion des éléments qui sera libérée sous l'action d'une faible dose d'acidité (fraction labile), mais aussi aux changements des conditions rédox dans le cas des métaux associés aux oxyhydroxides (e.Fe-Mn). En raison de la technique utilisée (voir Chapitre 4), il a été difficile d'obtenir tous les éléments voulus pour l'analyse à l'ICP-AES.

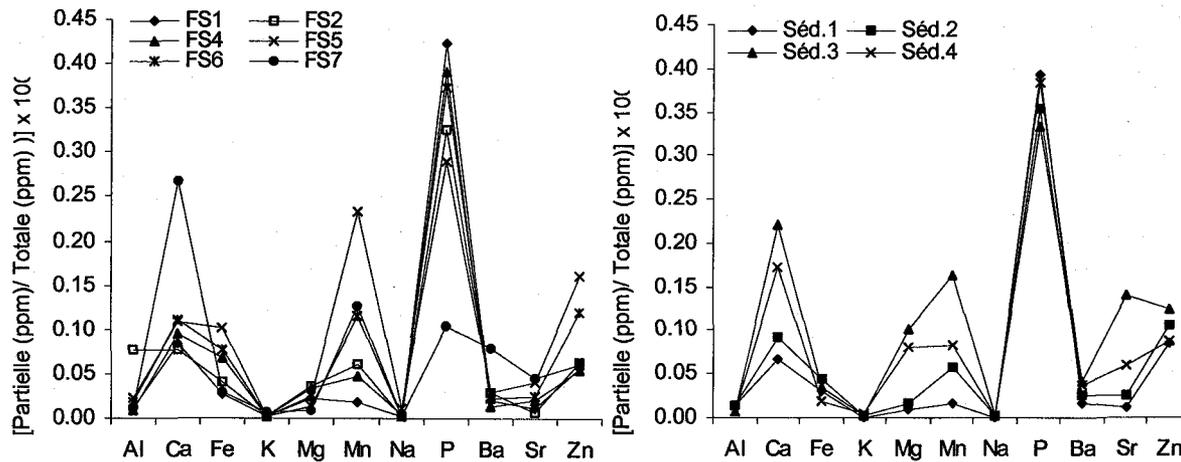


Figure 6.19: Proportion (%) des éléments extraits par une attaque partielle par HCl (1N) par rapport à l'analyse totale des échantillons de formations superficielles (FS) du bassin versant et des sédiments (Séd.) du lit de la rivière Saint-Charles.

On observe à la figure 6.19 que moins de 0.45 % du contenu total de certains éléments peut être mis en solution (dissous) par des solutions faiblement acides. Les éléments les plus facilement extractibles sont : le Ca, le Mn, le P et le Zn. Le P semble être l'élément le plus facilement extractible des éléments dosés tandis que le K et le Na semblent les moins mobiles. Une partie importante du Ca solubilisé proviendrait de l'apatite. L'apatite est un phosphate de calcium relativement soluble et une source très importante de TR dans les matériaux géologiques. Il est possible qu'une partie des TR dissoutes transportées par les eaux souterraines proviennent de la dissolution de phosphates de calcium.

6.4 Coefficients de partage (K_d) entre la fraction solide (MES) et la fraction dissoute des eaux de la rivière Saint-Charles

Le coefficient de partage (K_d) est un ratio entre un élément dosé dans la fraction solide (dans notre cas c'est la MES) et le même élément dosé dans la fraction dissoute à un même site d'échantillonnage dans la rivière.

$$K_d = [X_i]_{\text{Solide}} / [X_i]_{\text{Dissout}}$$

X_i : Élément dosé
 $[X_i]_{\text{Solide}}$: Concentration en ppm de l'élément dosé dans la MES
 $[X_i]_{\text{Dissout}}$: Concentration en ppm de l'élément dosé dans la fraction dissoute de l'eau (< 0.22 μm).
 (Source : Rollinson, H., 1993)

Ce calcul permet de mettre en évidence les processus de partage des éléments qui passent de la fraction dissoute à la fraction solide (Gaboury et Rozan, 1999). Ce coefficient de partage est influencé entre autre par le contenu en éléments traces présent dans les minéraux primaires des roches érodées. Indirectement, ce calcul peut aussi permettre d'évaluer les capacités des revêtements d'oxyhydroxides de fer et manganèse sur les particules pour fixer les éléments dissous. Il est à noter que nous n'avons pas pris en considération l'influence de la phase colloïdale (10^{-5}m à 10^{-8}m) comprise dans la phase dissoute analysée. Selon Gaboury et Rozan (1999), les calculs du K_d dans les cours d'eau sont souvent erronés car la phase dissoute (< 22 μm) analysée comprend également la phase colloïdale. Une certaine quantité de métaux est associée à la phase colloïdale et quand la concentration de MES augmente les phases colloïdales augmentent aussi.

L'objectif de cette section est de mettre en évidence qualitativement les variations de K_d mesurées dans la section de la rivière qui semble la plus affectée par les revêtements d'oxyhydroxides, soit les stations situées entre 17 kilomètres de l'amont (station d'échantillonnage S7) et 41 kilomètres de l'amont (station d'échantillonnage S15). Les données des stations S19 et S20 étant beaucoup trop élevées comparativement à l'amont de la rivière, n'ont pas été reportées sur les graphiques pour la période de novembre 2000 pour l'euprium (Eu), le terbium (Tb), l'holmium (Ho) et le lutécium (Lu).

À l'exception du Ce, on observe à la figure 6.20 que les K_d ne sont pas très différents entre les TR légères (La à Sm) et les TR lourdes (Gd à Lu). Cette observation est intéressante car les TR lourdes possèdent un plus petit rayon ionique et de plus grandes possibilités de former de meilleurs liaisons covalentes et électrostatiques. Par contre, on voit que les K_d sont plus élevés au mois de novembre 2000 qu'en mai 2001 particulièrement pour la zone affectée par la présence d'important revêtements de Fe et

Mn située entre 17 kilomètres de l'amont (station d'échantillonnage S7) et 41 kilomètres de l'amont (station d'échantillonnage S15).

Le Ce est l'élément du groupe des TR qui semble se comporter différemment des autres TR. Rappelons que cet élément est très sensible aux changements de potentiel d'oxydoréduction et peut passer plus facilement de la phase dissoute à solide. De plus, le Ce^{4+} a une très forte affinité avec les revêtements d'oxyhydroxides de fer. Dans le cas de la rivière Saint-Charles, les valeurs de coefficient de partage pour le cérium sont 10 fois plus élevées que celles des autres TR. Près du fleuve, en raison d'une proportion moindre d'oxyhydroxides de Fe et Mn, les valeurs de Kd sont plus faibles.

Afin de vérifier l'influence de la solubilité et l'affinité des TR avec les revêtements d'oxyhydroxides la figure 6.21 présente les valeurs de Kd du Ce et de Pr; représentant les TR légères, du Tb; représentant les TR lourdes, en fonction de la fraction non-détritique du fer présent dans la MES. On voit sur la figure qu'au mois de novembre lorsque les concentrations d'oxyhydroxides de fer augmentent dans la MES, les Kd augmentent aussi. Ce phénomène est encore plus accentué pour le Ce car c'est une élément très sensible à la présence des oxyhydroxides. Ainsi, lors de présence de fortes concentrations de revêtements d'oxyhydroxides, les éléments dissous s'adsorbent sur les revêtements augmentant ainsi les concentrations des éléments dans la MES.

Les limites de détection pour les TR dissoutes n'étant pas très bonnes, plusieurs valeurs du tableau sont non-détectées. On peut remarquer que les valeurs de Kd du fleuve en Mai 2001 sont beaucoup plus faibles que celles du Grenville ou de la Plate-forme du Saint-Laurent. Cette observation concorde avec les observations à la figure 6.7, où on voit que les valeurs de TR du fleuve dans la MES sont plus faibles.

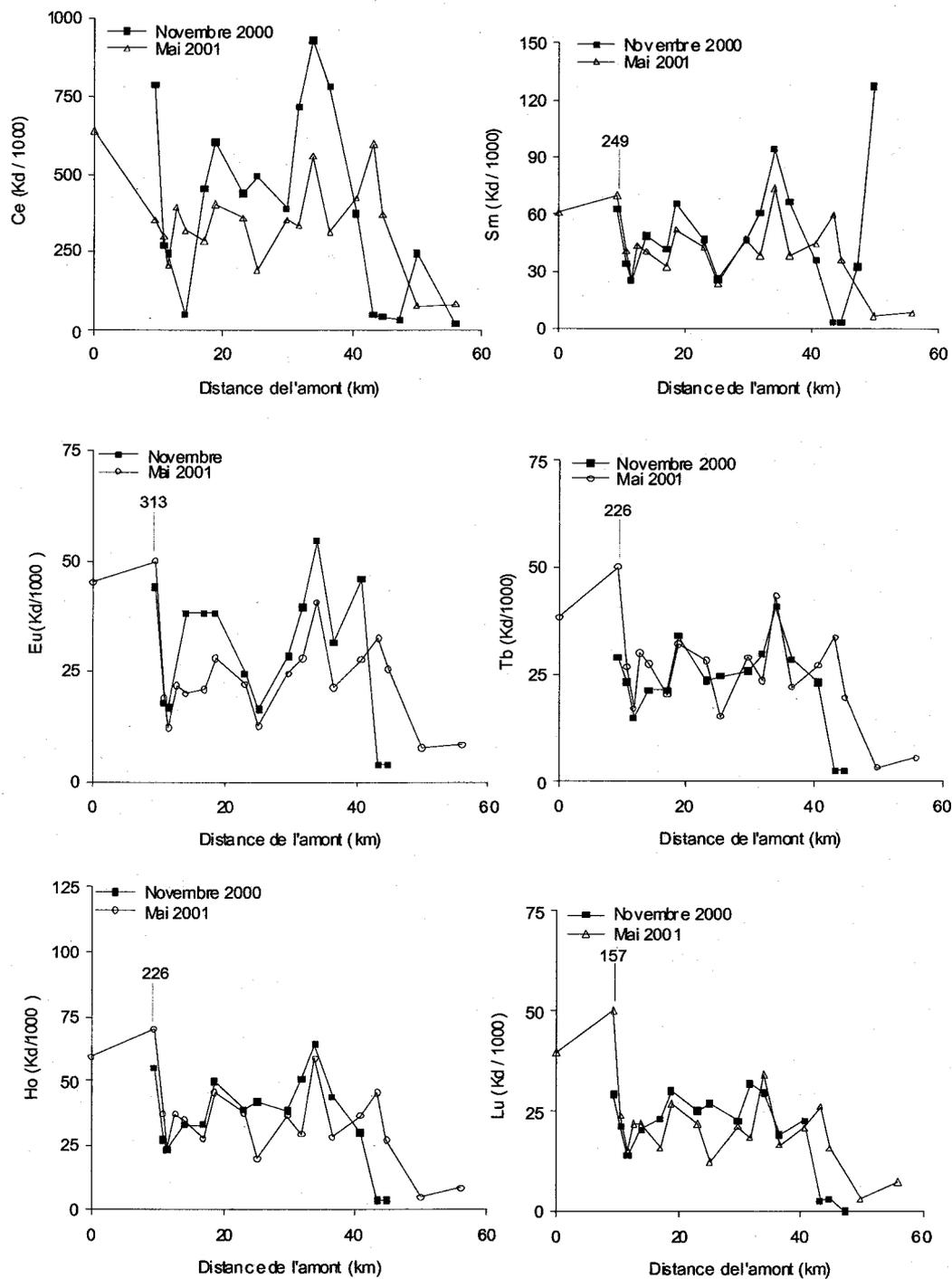


Figure 6.20: Coefficients de partage (Kd/1000) de l'euporium (Eu) des TR légères : cérium (Ce) et samarium (Sm) et des TR lourdes : terbium (Tb), holmium (Ho) et lutécium (Lu) pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.

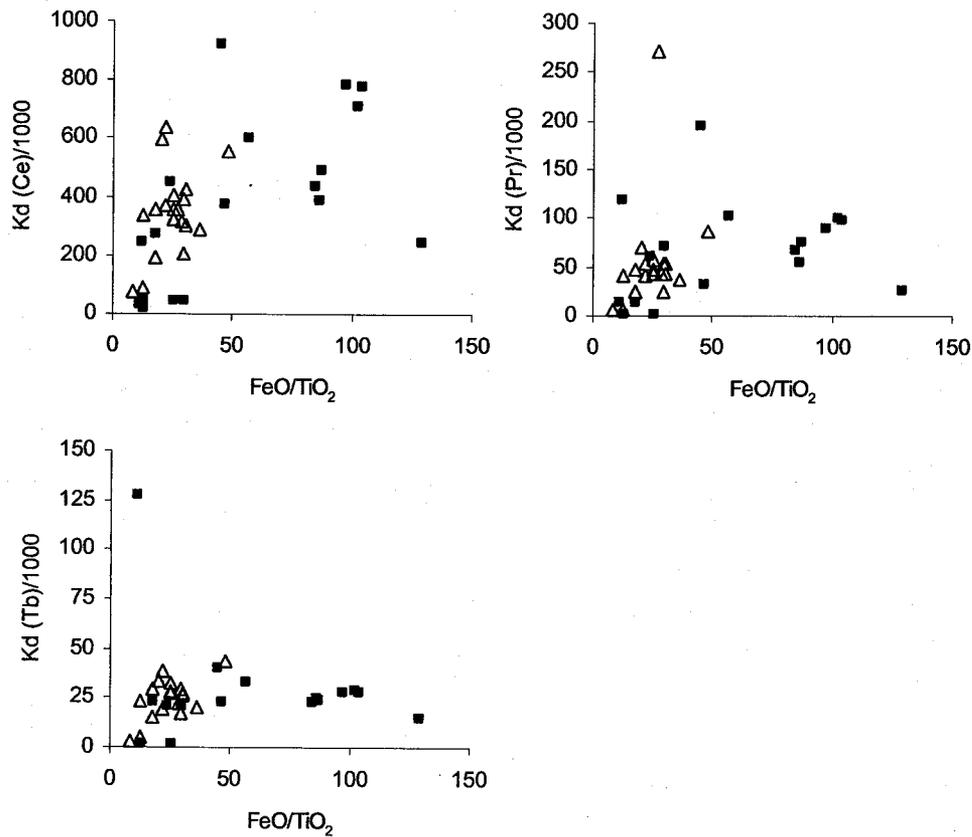


Figure 6.21: Coefficients de partage ($K_d/1000$) des TR légères : cérium (Ce) et praséodyme (Pr) et des TR lourdes : terbium (Tb), pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001.

Tableau 6.1 : Coefficients de partage ($K_d/1000$) des TR entre les fractions solide (MES) et dissoutes pour les différentes provinces géologiques et région présente dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

	Grenville	Plate-forme du Saint-Laurent	Fleuve	Grenville	Plate-forme du Saint-Laurent	Fleuve
	<i>Novembre 2000</i>	<i>Novembre 2000</i>	<i>Novembre 2000</i>	<i>Mai 2001</i>	<i>Mai 2001</i>	<i>Mai 2001</i>
La	n.d	n.d	n.d	n.d	11998.8	139.2
Ce	284.1	380.6	26.3	326.0	314.2	16.3
Pr	43.5	57.9	n.d	63.2	40.3	1.1
Nd	741.1	736.3	n.d	759.1	781.7	31.8
Sm	32.4	36.9	n.d	58.9	36.0	1.4
Eu	21.7	37.3	n.d	50.1	21.2	1.6
Gd	n.d	n.d	n.d	1861.1	1715.1	39.9
Tb	16.6	30.4	n.d	47.5	21.2	0.9
Dy	n.d	n.d	n.d	1057.5	971.1	40.4
Ho	26.0	48.5	n.d	52.9	28.1	1.3
Er	313.3	450.4	n.d	443.0	376.6	19.1
Tm	16.7	63.8	n.d	38.4	16.4	0.9
Yb	n.d	n.d	n.d	820.6	698.3	43.6
Lu	16.3	16.0	n.d	34.4	16.5	1.0

n.d : non-déTECTÉ

6.5 Analyse statistique multivariée

6.5.1 Analyse factorielle

Les diagrammes d'analyse factorielle, présentés aux figures 6.22 et 6.23, présentent le groupement des éléments dans l'espace factoriel F1-F2 qui explique plus de 84 % de la variabilité. Cette projection permet de souligner de très fortes corrélations entre certains éléments (ex. les TR). Les regroupements observés sur cette figure semblent correspondre à des associations géochimiques communément observées dans les roches, les sols et les sédiments.

Dans le cadran supérieur gauche de la figure 6.22, on peut voir les éléments relativement insolubles et intimement associés à la géologie comme les HFSE, le TiO_2 et le Al_2O_3 . Sur cette projection, les regroupements des TR et des oxydes de Fe, Mn et de P occupent les cadrans supérieurs et inférieurs droit. Le Ni, S et P_2O_5 semblent être influencés par la présence des revêtements d'oxyhydroxides. Le Ce et l'Eu sont dissociés des autres TR trivalentes. Ceci souligne leurs comportements différents. Rappelons que le Ce est très influencé par les processus d'oxydoréduction. L'euporium a un comportement spécifique en raison de sa forte concentration dans les feldspaths calciques (plagioclases). Il est très important de souligner que les TR ne sont pas corrélées aux abondances en titane. Par exemple, en novembre, le découplage entre les TR et les HFSE (incluant le Ti) est extrême et contraire à ce qui est normalement observé lors de la différenciation des roches magmatiques. En mai, le découplage persiste même s'il est beaucoup moins prononcé (fig. 6.23).

Le découplage entre les TR et des éléments comme le Ti, les HFSE et l'Al est une démonstration de la grande complexité du cycle géochimique des TR dans les rivières. Normalement, dans les roches sédimentaires silicilastiques, les TR sont corrélées aux autres éléments comme le Ti et les HFSE. Dans le cas présent, le découplage implique nécessairement un processus additionnel, celui de l'apport en TR de sources souterraines.

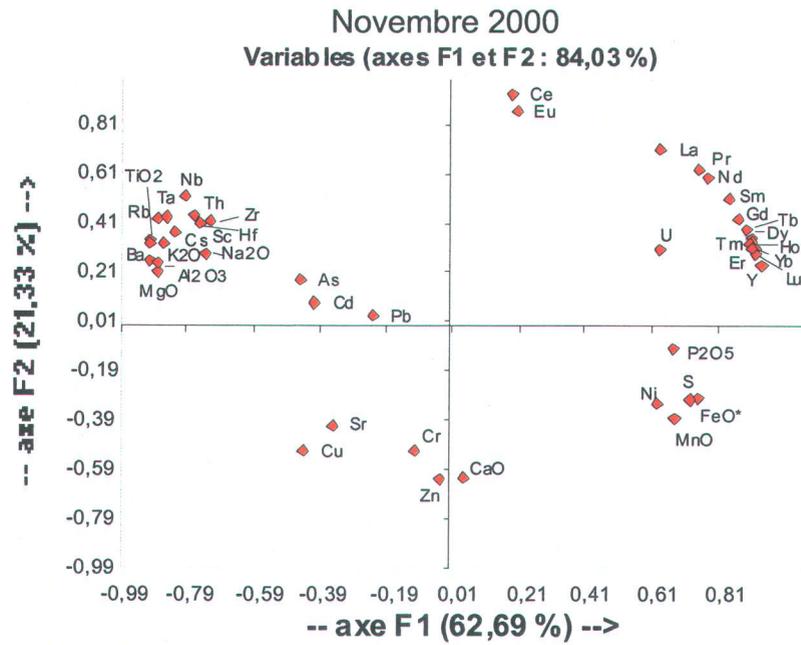


Figure 6.22: Analyse factorielle des éléments dosés dans la MES en novembre 2000. ETR signifie : terres rares.

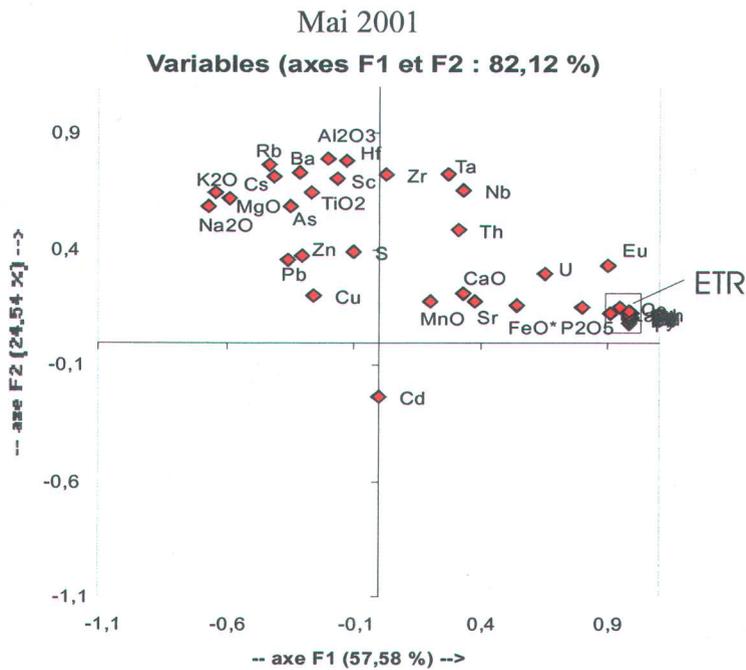


Figure 6.23: Analyse factorielle des éléments dosés dans la MES en mai 2001. ETR signifie : terres rares.

En mai on observe encore un regroupement d'éléments suggérant une association avec des minéraux silicatés provenant de l'érosion des roches et formations quaternaires (fig. 6.23). À cette période de l'année, le Cu, Zn et Pb semblent être associés à des phases sulfurées. Les HFSE :Ta, Nb, Th sont situés un peu plus à droite sur l'axe F1 que l' Al_2O_3 et le TiO_2 . Ils représentent les éléments immobiles. Sur cette figure les TR sont indiquées par le signe ETR et elles se démarquent beaucoup moins du reste des éléments qu'en novembre 2000.

Les différences observées entre novembre et mai pourraient s'expliquer par une dynamique des eaux souterraines différentes. L'apport en eaux souterraines dans la rivière semble beaucoup plus important à l'automne 2000 qu'en mai 2001. À cette période de l'année, le gel au sol n'est pas encore commencé, ceci permet aux précipitations, qui sont abondantes en cette saison, de s'infiltrer dans les fissures du sol et de percoler jusqu'à la rivière. L'arrivée de cette eau réductrice dans l'eau de la rivière, qui est oxydante, permet l'oxydation rapide du Fe et du Mn dissous provenant des eaux souterraines. Une proportion importante des TR dissoutes pourrait s'adsorber ou co-précipiter sur les revêtements chargés de fer et de manganèses formés autour des particules de MES. Le potentiel d'oxydoréduction d'une eau peut changer le comportement de certains éléments dissous et particulaires. Ce paramètre semble plus important dans la rivière au mois de novembre 2000. L'analyse factorielle permet d'analyser statistiquement les éléments, de les regrouper et permet de reconnaître les différentes phases présentes dans la MES.

La figure 6.24 représente une analyse des correspondances réalisées sur la même banque de données. Cette présentation permet de regrouper les MES semblables et de visualiser les éléments qui affectent le plus les échantillons. Les oxydes de Fe et de Mn influencent surtout les échantillons S7 à S13, tandis que les échantillons S2 à S9 semblent dominés par les TR. S15 à S17 ont un comportement à part et semblent dominés par le Sr et le Cu. Les échantillons influencés par le fleuve Saint-Laurent sont influencés par les HFSE.

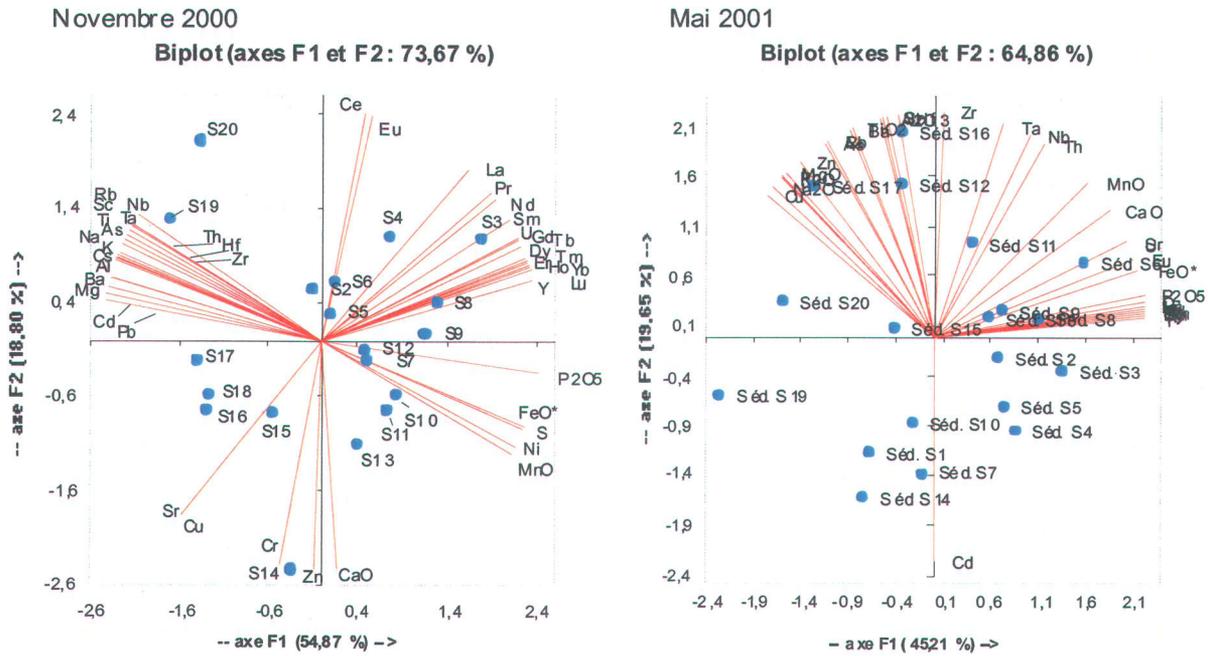


Figure 6.24: Analyse des correspondances pour les période d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001 regroupant les liaisons entre la constitution des échantillons de MES est les principaux éléments dosés. Il est à noter que sur la figure Séd. : MES.

En mai 2001, les échantillons semblent contrôlés par des phases beaucoup plus mélangées. Les échantillons de la partie négative de l'axe des Y ne semblent pas influencés pour une phase spécifiques mais par toutes les phases. Tandis que les échantillons S6, S8 et S9 semblent influencés par les oxydes.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les principaux objectifs de ce projet étaient de : 1) déterminer la provenance et l'origine de la matière en suspension transportés par les eaux de la rivière Saint-Charles en évaluant leur signature géochimique en métaux trace et terres-rares 2) déterminer les processus géochimiques et hydrogéochimiques présents dans les eaux de la rivière Saint-Charles et 3) évaluer l'importance de l'influence des différentes provinces géologiques sur la signature géochimique de la MES de la rivière Saint-Charles.

La charge sédimentaire en suspension dans la colonne d'eau de la rivière Saint-Charles provient principalement de l'érosion du substrat rocheux, des formations quaternaires et des berges. De plus, la dégradation forestière, les rejets urbains et industriels et la pollution atmosphérique contribuent significativement à cette charge sédimentaire. Les processus sédimentologiques naturels et hydrologiques de la rivière implique la présence de cinq barrages et l'effet d'un marnage important du fleuve Saint-Laurent dans la zone urbaine.

Nous pouvons retenir des précédents chapitres les points suivants :

- Les débits de la rivière Saint-Charles sont contrôlés par les barrages (5) situés au long de la rivière et par l'importance des précipitations et de certains processus saisonniers comme la fonte des neiges au printemps. Donc les hausses (période de crues) et baisses (période d'étiage) des débits ne sont pas facilement prédictibles.
- Les concentrations de MES, la conductivité, la dureté, l'alcalinité et les concentrations en chlorures, et en sulfates varient de l'amont vers l'aval en augmentant drastiquement aux environs de 35-40 kilomètres de l'amont (S15) et ce pour les périodes d'échantillonnage de novembre 2000 et de mai 2001. Au mois de novembre ces paramètres sont systématiquement plus élevés qu'en mai. Cette augmentation est aussi observable pour les concentrations des principaux éléments majeurs dissous (Na, Ca et Mg) pour l'échantillonnage de 2001. La pollution produite par les voitures, les sels déglaçants et les rejets industriels sont emportés par les eaux de ruissellement ou les égouts pluviaux jusqu'au cours d'eau. Ces sources de pollution influencent les paramètres physico-chimiques de la rivière dans la partie urbaine.

- On observe une dynamique distincte du Fe et du Mn, entre l'automne (novembre 2000) et le printemps (mai 2001). L'enrichissement en oxyhydroxides de fer et de manganèse, probablement non-détritiques, suggère un apport en eaux souterraines (milieu réducteur) dans la section de la rivière située entre 17 kilomètres et 40 kilomètres de l'amont. Cet apport pourrait favoriser la formation de revêtements d'oxyhydroxides de fer et manganèse sur les particules de matière en suspension lors du mélange des eaux souterraines réductrices avec les eaux oxydantes et relativement alcalines de la rivière Saint-Charles. Ces revêtements d'oxyhydroxides, qui sont des surfaces chargées négativement dans les conditions de pH neutre à alcalin, favoriseraient l'adsorption ou la complexation des métaux à valence positive (ex. terres rares, Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} etc...) présents sous une forme dissoute dans la colonne d'eau. À l'automne, les eaux souterraines pourraient librement recharger la rivière, tandis qu'au printemps, le sol n'étant pas complètement dégelé en profondeur, il est probable que l'apport en « eaux souterraines » au débit de la rivière Saint-Charles soit nettement inférieur. Ceci pourrait expliquer les faibles abondances en fer et manganèse, observées dans la MES du printemps. Donc au printemps précoce, les sols gelés favorisent le ruissellement des eaux de fonte des neiges tandis qu'à l'automne, les eaux percolent profondément dans les sols forestiers et sont drainées par les eaux souterraines jusqu'à la rivière.
- Pour la section de la rivière située entre 17 et 40 kilomètres de l'amont, on évalue que les revêtements de fer-manganèse sur les particules de MES au mois de novembre 2000 sont présents dans une proportion variant entre 40 % et 80 %. À cette période, les autres échantillons de MES de la rivière montrent la présence de moins de 30 % de revêtements d'oxyhydroxides. La faible proportion d'oxyhydroxides (entre 10 % et 45 %) dans la MES de mai 2001 est probablement due à une alimentation réduite en eaux souterraines à cette période de l'année.
- Des trois provinces géologiques présentes dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles, les formations géologiques associées à la province géologique du Grenville influencent le plus les TR mesurées dans la MES de la partie amont et centrale de la rivière. L'influence de l'érosion des unités la Plate-forme du Saint-

Laurent semble négligeable dans cette rivière au mois de novembre 2000 et de mai 2001 dû au faible débit de la rivière, du faible dénivelé et d'un faible taux d'érosion des berges dans cette section. Les concentrations en TR sont plus élevées dans la section de la rivière affectée par le Grenville (situé de 0 à 19 kilomètres de l'amont) probablement dû à la présence des formations granitiques et gneissiques riches en TR et du dénivelé de la rivière dans cette section qui favorise l'érosion. Les concentrations en TR de la MES provenant du fleuve sont plus enrichies pour la période de novembre 2000 qu'en mai 2001, probablement en raison des forts courants du fleuve au printemps qui pourraient plus fortement éroder le lit du fleuve et donc diluer les signaux des TR par d'autres minéraux. En novembre, avec un débit fluvial modéré, la MES semble dominée par des sources provenant des tributaires de la rive nord.

- L'effet d'adsorption sur les revêtements d'oxyhydroxides de fer et de manganèse des TR dissoutes est particulièrement présent entre 20 et 40 kilomètres de l'amont où on retrouve de fortes corrélations entre la sommation des TR normalisées au titane et la fraction non-détritique d'oxyhydroxides de fer et de manganèse dans la MES du mois de novembre 2000. De plus, les coefficients de partage plus élevés en novembre 2000 qu'en mai 2001 montrent que les TR sont fortement associées à la phase particulaire et appauvrie la phase dissoute de l'eau de la rivière.
- Les analyses factorielles confirment qu'au mois de novembre 2000 le cycle hydrogéochimique est très différent du mois de mai 2001 en raison de l'apport en eaux souterraines. En novembre, le gel au sol n'est pas encore commencé, ce qui permet à l'eau de s'infiltrer dans les fissures du sol et de percoler jusqu'à la rivière. L'arrivée de cette eau réductrice dans l'eau de la rivière, qui est oxydante, permet l'oxydation rapide du Fe et du Mn dissous provenant des eaux souterraines. Une proportion importante des TR dissoutes peut s'adsorber ou co-précipiter sur les revêtements chargés de fer et de manganèses formés autour des particules de MES.

Dans le but d'approfondir cette étude et de définir à plus grande échelle et à une plus grande précision les processus géochimiques présents dans la rivière voici les recommandations :

- Procéder à un échantillonnage de la MES et de la fraction dissoute à tous les mois pour une durée de 1 an.
- Faire des attaques séquentielles sur les échantillons de MES afin de déterminer les métaux liés aux différentes phases présentes: les carbonates, la matière organique, les oxyhydroxides de fer et de manganèse.
- Analyser au microscope électronique à balayage (MEB) tous les échantillons de MES afin de bien voir les variantes de la composition de la MES de l'amont vers l'aval.
- Déterminer les métaux présents dans la fraction colloïdale de l'eau afin de mieux évaluer les K_d .
- Poser des piézomètres au bord de la rivière entre 17 et 41 kilomètres de l'amont afin de mesurer l'élévation de l'eau souterraine et de mesurer les paramètres physico-chimiques (pH, potentiel d'oxydoréduction, conductivité, température) en eau souterraine et prélever des échantillons afin de procéder à des datations isotopiques au ^{14}C et des analyses en métaux traces (TR et autres traces) dans la phase particulaire et dissoute.
- Évaluer l'effet de l'augmentation de la charge en cations dans l'eau de la rivière sur la coagulation de la fraction colloïdale et sur la MES.

BIBLIOGRAPHIE

Audet, G., Bérubé, D., Ducruc, J-P. et Gerardin, V., 1997. Les cartes écologiques du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Ministère de l'Environnement et de la Faune. No. de cat. EN 970617. 40 p.

Barnabé, G. et Lapointe D., 1989. MENV. Étude hydrologique : Bassin de la rivière Saint-Charles. Direction générale des ressources hydriques. 35 p.

Bau, M., 1999. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochemica et Cosmochemica Acta*. Vol. 63, No. 1, pp. 67-77.

Baudo, R., Giesy, R. et Muntan, H., 1990. Sediments : Chemistry and toxicity of in-place pollutants. Lewis Publishers Inc., Michigan, 405 p.

Bolduc, A.M., Paradis, S., Parent, M. et Michaud, Y., 2000. Géologie des formations superficielles, région de Québec, Québec (partie de NTS 21 L/11; 21L/14 et 21L/15). Dossier public 3835, Commission géologique du Canada.

Condie, K. C., 1991. Another look to rare earth element in shales. *Geochemica et Cosmochemica acta*. Vol. 55., pp.2527-2531.

Cossa, D., Pham, T.-T, Rondeau, B., Quemarais, B., Proulx, S. et Surette, C., 1998. Bilan massique des contaminants chimiques dans le fleuve Saint-Laurent. Environnement Canada- Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Rapports scientifiques et techniques ST-163, 258 p.

CUQ, Bureau des relations avec la population, 1999. Imaginez...Nos rives à deux pas! La dépollution et la renaturalisation de la rivière Saint-Charles. Document publique de la Ville de Québec.

D'Allaire, F, 2001. « Québec est souillée ». Le Soleil (Québec), 16 décembre, p.A-9.

Daniel, M. H. B., Montebelo, A. A., Bernardes, M. C., Ometto, J. P. H. B., De Camargo, P. B. , Krushe, A. V. Ballester, M. V. , Victoria, R. L. et Martinelli, L. A., 2002. Effects of urban sewage on dissolved oxygen, dissolved inorganic and organic carbon, and electrical conductivity of small streams along a gradient of urbanisation in the Piracicaba river basin. *Water, air and soil pollution*. No. 136. pp.189-206.

Degrémont (Firme). Lyonnaise des Eaux (Firme). 1989. Memento technique de l'eau. 9e éditions. Degremont. Paris. 1381 p.

Deming Dong, Yu Li and Xiuyi Hua. 2001. Investigation of Fe, Mn oxides and organic material in surface coatings and Pb, Cd adsorption to surface coatings developed in different natural waters. *Microchemical Journal*. Vol. 70. No. 1. pp. 25-33.

Douglas, G. B., Hart, B. T., Beckett, R., Gray, C. M. et Illiver R. L., 1999. Geochemistry of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system: A conceptual Isotopic/geochemical model for the fractionation of major, trace and rare earth elements. *Aquatic Geochemistry*. no. 5. pp.167-194.

Dupré, B., Gaillardet, J., Rousseau, D. et Allègre, C. J., 1996. Major and trace element of river-borne material: The Congo Basin. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Vol. 60, No. 8, pp. 1301-1321.

Duzgoren-Aydin, N.S, Aydin A. et Malpas, J., 2002. Re-assesment of chemical weathering indices : case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*. Vol.63, pp.99-119.

Environnement Canada., 2002. Eaux usées municipales : Sources et caractéristiques. http://www.ns.ec.gc.ca/epb/issues/wstewtr_f.html (Dossier consulté en novembre 2002)

Feininger, T., St-Julien, P. et Bolduc, A.M., 1995. *Géologie pour tous, région de Québec./Popular geology*, 16 p.

Gaboury, B. Rozan, T. F., 1999. The influence of size distribution on the particule concentration effect and trace metal partitionning river. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Vol.63, pp. 113-127.

Grande, J.A., Borrego, J. et Morales J. A., 1999. A study of heavy metal pollution in the Tinto-Odiel estuary in southwestern Spain using factor analysis. *Environmental Geology*. no 39. pp.1095-1101.

Grantham, J., 2001. Mise en valeur et renaturalisation de la Saint-Charles, ville de Québec. Service de l'environnement, Ville de Québec. <http://sodaq.qc.ca/lectures/colloques-2001/gratham.html> (Consulté en mai 2002)

Gromet, L. P., R. F. Dymek, L. A. Haskin et R. L. Korotev., 1984. The North american shale composite : its compilation major and trace element characterstics. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol. 48, p. 2469-2482.

Grosbois, C., Négrel, P., Grimaud, D. et Fouillac C., 2001. An overview of dissolved and suspended matter fluxes in the Loire River basin : natural and anthropogenic inputs. *Aquatic geochemistry*. No.7. pp.81-105.

Hébert, S., 1995. Qualité des eaux du bassin Saint-Charles 1979-1995. Direction des écosystèmes aquatiques, Ministère de l'Environnement et de la Faune. No. de cat. EN 950532. 41 p. + 15 annexes.

- Heinen de Carlo, E. et Wen X. 1998. The influence of redox reactions on the uptake of dissolved ce by suspended Fe and mn oxide particules. *Aquatic geochemistry*. No.3. pp.357-389.
- Henderson, P., 1984. Rare earth element geochemistry, developments in geochemistry 2. *Elsvier*. 515 p.
- Horne, J. A. Goldman C. R., 1994. *Limnology*. McGraw-Hill Inc. USA. 576p.
- Ingri, J. et Widerlund A. 1994. Uptake of alkaline-earth elements on suspended iron and manganese in Kalix River, northern Sweden. *Geochemica et Cosmochemica Acta*. Vol. 58, No. 24, pp. 5433-5442.
- LaFlèche, M. R., 2001. *Géochimie de basse température*. Note de cours. INRS-ETE. Université du Québec.
- LaFlèche, M. R. et Camiré, G., 1996. Caractérisation de l'effluent final du parc à résidus miniers Solbec-Culpra (ruisseau du Troisième, Stratford, canton de Stratford). Rapport de recherche non-publié., 138 p.
- Lajeunesse, D., Bisonette, J., Gerradin, V. et Labrecque, J., 1997. Caractérisation écologique du lit majeur de la rivière Saint-Charles, Québec. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Ministère de l'Environnement du Canada, 151 p.; + annexe cartographique.
- Lambs, L., 2004. Interactions between groundwater and surface water at river banks and the confluence of rivers. *Journal of Hydrology*., Vol. 288, No. 3-4, pp.312-326.
- Lefebvre, Y., 1983. Impact de la pollution diffuse urbaine sur la qualité de l'eau de la rivière Saint-Charles à l'aide d'indice qualité. Mémoire de maîtrise. INRS-Eau. Université du Québec. 235 p.
- Leleyter, L., Probst, J.L, Depetris, P., Haida S., Mortatti J., Rouault R., Samuel J., 1999. Distribution des terres rares dans les sédiments fluviaux : fractionnement entre les phases labiles et résiduelles. *Géosciences de surface*. Vol. 329. pp. 45-52.
- Martin, J.M et Meybeck, M. 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chemistry*. Vol. 7. P. 173-206.
- McLennan, S. M., 1989. The post-archaeon average Australian sedimentary rock : its compilation major and trace element characteristics. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol. 25, pp. 2469-2482.
- McLennan, S. M. 1995. *Geochemistry and mineralogy of the rare earths elements*. Mineral society of America. *Rev. Mineral*. V.21. Chapitre 7.

Ministère de l'environnement du Québec (MENVIQ), 2003. Critère de qualité de l'eau. Ministère de l'environnement du Québec. Direction de la qualité des cours d'eau. Québec. 432 p.

Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1995. Saint-Charles 1979-1995. Ministère de l'Environnement et de la Faune. No. de cat. EN950535. 12 p.

Morneau, F., 1989. Contribution à une méthodologie de caractérisation et de cartographie écologique en milieu urbain : le cas de la basse-ville de Québec, Centre de recherche en aménagement et en développement. Vol.12. No.4.

Ndzangou, S. O., 2003. Évolution et impacts de la contamination anthropique dans les sédiments et les sols du bassin du lac Clair, Station Forestière de Duchesnay (Québec, Canada). Thèse de doctorat. INRS-ETE. Université du Québec. 205 p.

Odyssee Quebec, Geographie Quebec.: <http://www.odysseequebec.com/geographie.html> (Consulté mai 2002)

Pêche et Océan Canada, 2000. Table des marées et courants du Canada 2000, fleuve Saint-Laurent et rivière Saguenay. Volume 3, pp. 43.

Pêche et Océan Canada, 2001. Table des marées et courants du Canada 2001, fleuve Saint-Laurent et rivière Saguenay. Volume 3, pp. 45.

Petelet, E., Luck J., Ben Othman, D., Negrel, P. et Aquilina, L., 1998. Geochemistry of a medium-sized watershed : The Hérault. Southern France 1. Organisation of different water reservoirs as constrained by Sr isotopes, major, and trace elements. Chemical Geology, No.150, pp. 63-83.

Rhodes, A. L., Newton R. M. et Pufall A., 2001. Influences of land use on water quality of a diverse New England watershed. Environmental Science & Technology. Vol.35 No. 18, pp. 3640-3645.

Rollinson, H., 1993. Using geochemical data : evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and technical. New-York. 352 p.

Roy, S. Gaillardet, J. et Allègre, C. J.. 1999. Geochemistry of dissolved and suspended loads of Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 63. No. 9, pp. 1277-1292.

Saint-Julien, P., 1995. Géologie de la région de Québec. Ministère des Ressources naturelles, Québec. Rapport MB94-40., 62 p.

Salomons, W. et Förstner, U., 1984. *Metals in the hydrocycle*. Germany : Springer-Verlag Heidelberg., 349 p.

Sañudo-Whitley, S.A et Gill, G. A., 1999. Impact of the clean water act on the levels of toxic metals in urban estuaries : The Hudson river estuary revised. *Environmental Science and Technology*, Vol. 33, No. 20, pp. 3477-3481.

Sigg, L., Hanbin, X., Kistler, D. et Schronenberger, R., 1994. Size fractionation (Dissolved, Colloidal and Particulate) of Trace Metals in the Thur River, Switzerland. *Aquatic Geochemistry*, No.6. pp. 413-434.

Sigg, L., Stumm, W., Behra, P., 1992. *Chimie des milieux aquatiques*. Masson, Paris. 391 p.

Singh, A.K, Hasnain, S.I. et Banerjee, D. K. 1999. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of Damodar River-a tributary of lower Ganga, India. *Environmental Geology*, No. 39, pp. 90-98.

Statistique Canada, 1992. Recensement de l'agriculture de 1991, produits électriques des données, Ministère de l'industrie, des sciences et de la technologie du Canada. Statistique Canada, 2002.

Statistique démographique ; www12.statcan.ca/english/profil01/Détails/détails1pop.cfm? (Dossier consulté en avril 2002)

Strahler, A. N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. of American Geophysical Union*. no 38. p.913-920.

Stummeyer J., Marching, V. et Knabe, W. 2002. The composition of suspended matter from Ganges-Brahmaputra sediment dispersal system during low sediment transport season. *Chemical Geology*. no.185. pp. 125-147.

Szefer, P., Glasby, G. P., Pempkowiak, J. et Kaliszan, R. 1995. Extraction studies of heavy metal pollutants in surficial sediments from southern Baltic Sea off Poland. *Chemical geology*. no. 120. pp. 11-126.

Taylor, S. R. et McLennan, S. M., 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Vol. A 301, pp. 381-399.

Taylor, S. R. et McLennan, S. M., 1985. *The continental Crust : Its Composition and Evolution*. Blackwell. London. 312 p.

Tessier, A., Campbell, P.G.C. et Bisson, M., 1979. Trace metal speciation in the Yamaska and St-François rivers (Quebec). *Canadian journal of Earth Sciences*, No. 17, pp. 90-105.

Tessier, A., Fortin, D., Belzile, N., DeVitre R. R. et Leppard G. G. 1996. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurement. pp. 387-404.

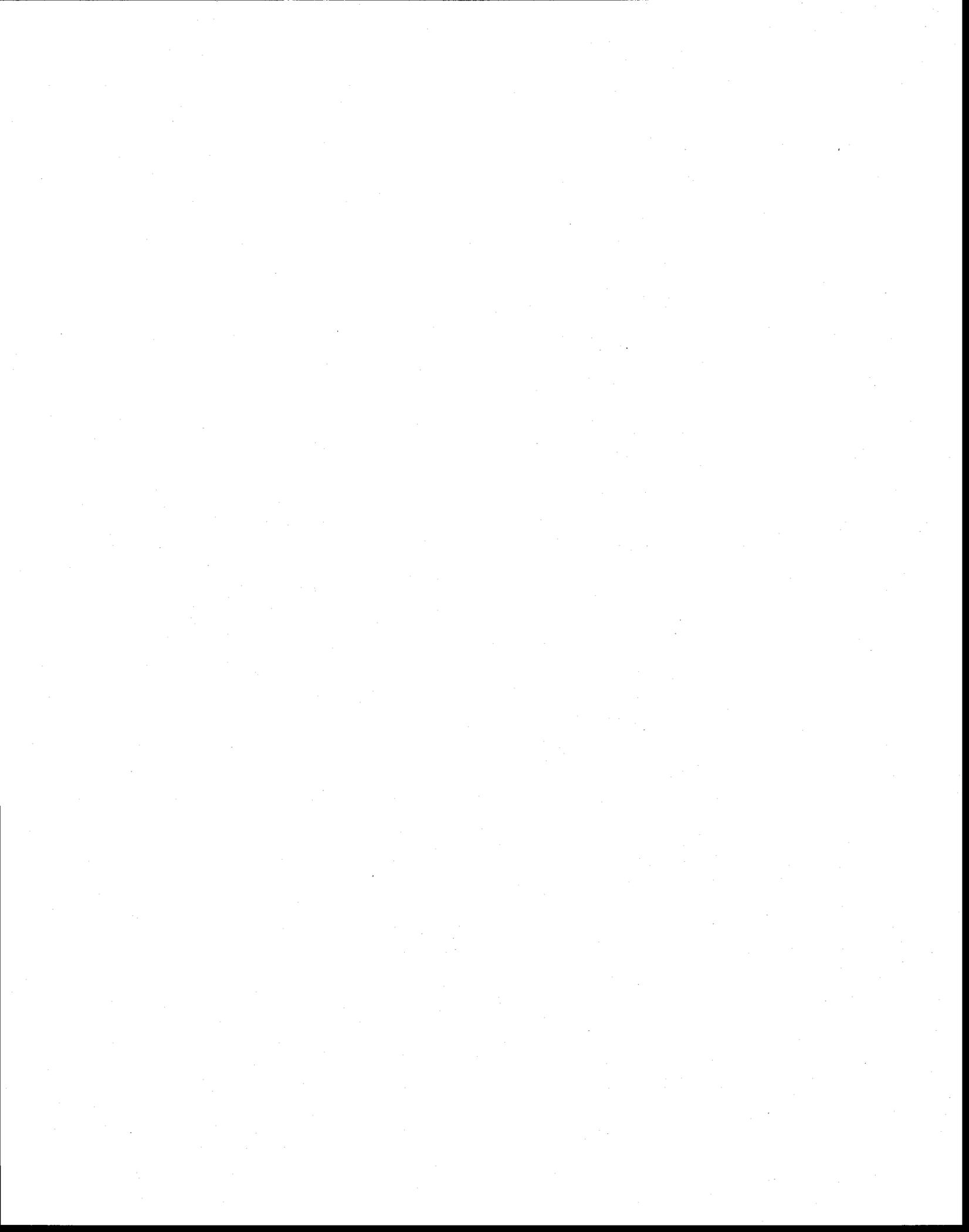
Tremblay, A., 1997. Caractérisation géochimique de la matière en suspension des principaux tributaires du Saint-Laurent : apport des éléments traces à l'étude de la provenance sédimentaire et à l'identification de traceurs. Mémoire de maîtrise. INRS-Géoresources. 212 p.

Vital, H. et Stattegger, K. 2000. Major and elements of stream sediments from the lowermost Amazon River. *Chemical Geology*, No.168, pp.151-168.

Zhang, C., Wang, L., Shen, W. et Zhang, W., 2002. Characteristics of sludge from sewage discharge channels of Tianjin, China. *Water, air, and soil pollution*, No. 134, pp. 239-254

Zhang, F., Yamasaki, S. and Kimura, K. 2001. Rare earth element content in various waste ashes and the potential risk to Japanese soils. *Environment International*, Vol. 27, No 5. pp. 393-398

Annexe 1
Correspondance entre les arrondissements et les anciennes villes et anciens quartiers de la
ville de Québec



Correspondance entre les arrondissements et les anciennes villes et anciens quartiers de la ville de Québec

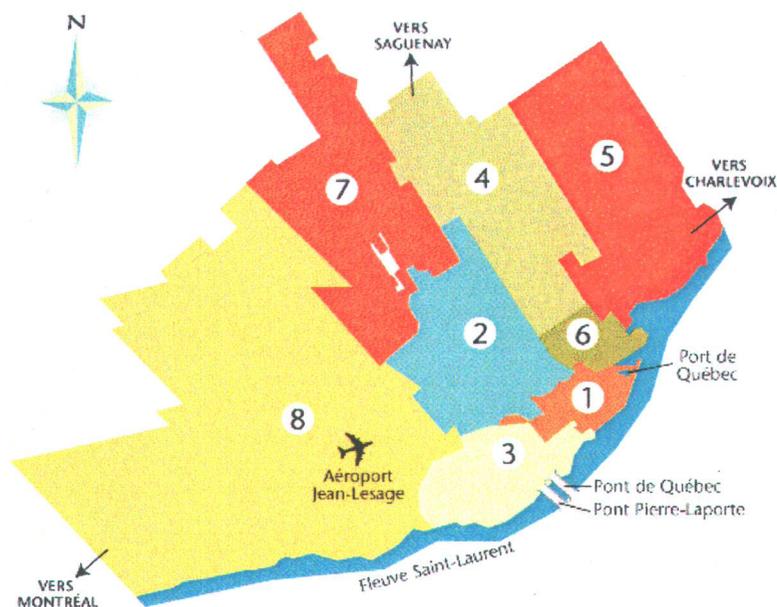
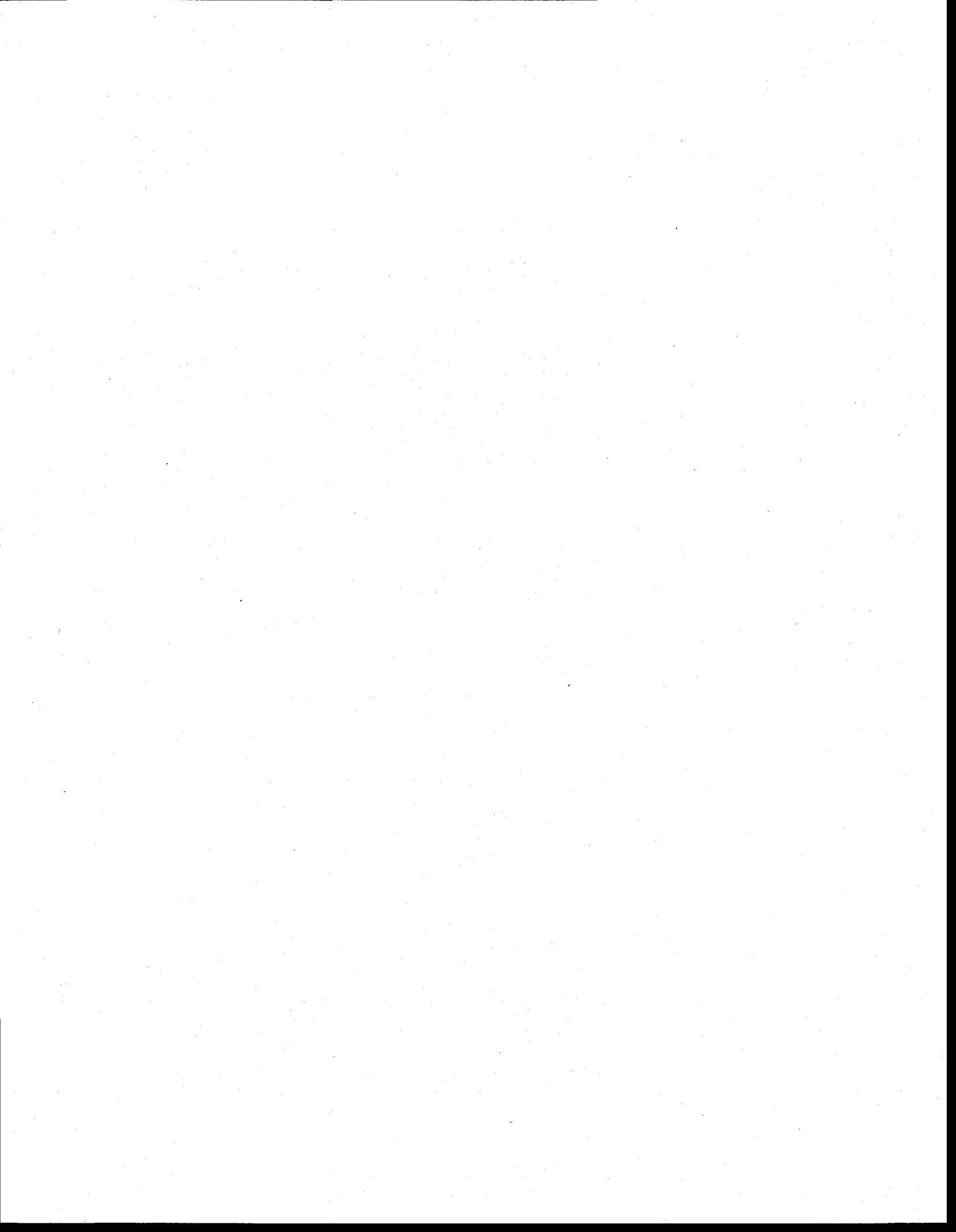


Figure tirée de www.ville.quebec.qc.ca (site consulté le 17 mai 2002)

Numéro d'arrondissement	Anciennes villes et anciens quartiers correspondants	Dénomination des arrondissements
1	Vieux-Québec	La cité
2	Ville de Vanier et les quartiers suivants de Québec : Duberger, Les Saules, Lebourgneuf ainsi qu'une grande partie de Neufchâtel.	Les rivières
3	Villes de Sillery et de Sainte-Foy, à l'exclusion des quartiers Champigny, Chauveau et Les Sources	Sainte-Foy -Sillery
4	Ville de Charlesbourg	Charlesbourg
5	Ville de Beauport	Beauport
6	Ville de Limoilou	Limoilou
7	Villes de Lac-Saint-Charles, de Loretteville et de Saint-Émile.	La haute-Saint-Charles
8	Villes de Val-Bélair, Saint-Augustin-de-Desmaures, Cap-Rouge, L'Ancienne-Lorette et une partie de Sainte-Foy	Laurentien

Source internet : http://www.ville.quebec.qc.ca/fr/ma_ville/arrondissement.shtm



Annexe 2
Industries retenues pour étude dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles



Industries retenues pour étude dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles

Municipalité	Raison sociale	Produits	Secteur industriel	Lieu de rejet	Avancement du PAEQ
Charlesbourg	Groupe Permacon inc., division Permacon Québec	Bordures, pavés, blocs de béton	Divers	Réseau municipal	À l'étude
Ancienne-Lorette	Les industries Pyrox inc.	Cheminées, fours crématatoires	Métallurgie	Réseau municipal	À l'étude
Ancienne-Lorette	Placage Royal	Placage bijoux, coutelleries, chandeliers	Métallurgie	Rivière	Retenue comme polluante
Ancienne-Lorette	Verrault-Frontenac onc., division Les Tuyaux vibrés	(Zn, Au, Ag, Cr, Sn) Regards d'égouts tuyaux, puisards	Divers	Réseau municipal	Travaux terminés
Loretteville	Faber et Compagnie inc.	Lanières de raquettes	Textiles	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Acry-Formes inc.	Article en acrylique, moules, plastique thermoforme	Chimie	Réseau municipal	À l'étude
Québec	Audet soudure (1989) inc.	Réservoirs, métal en feuille	Métallurgie	Réseau municipal	Rejetée
Québec	Béton Girard inc.	Béton préparé	Divers	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Béton Nordik inc.	Béton préparé, pierres concassées, gravier	Divers	Réseau municipal	Travaux terminés
Québec	Bomen inc.	Spectromètres, analyseurs d'hydrogène	Métallurgie	Réseau municipal	Rejetée
Québec	Ciment Saint-Laurent inc., division Béton Québec	Gravier pour routes de béton	Divers	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Compagnie d'optique Polaire inc.	Lentilles optalmiques	Divers	Réseau municipal	À l'étude
Québec	Domtar inc., division des Cartonnage ondulés	Boîtes de carton ondulé	Industrie du bois	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Électrométal inc.	Récupération d'argent	Métallurgie	Réseau municipal	Travaux en cours
Québec	Frokem inc.	Savon, produits de nettoyage	Chimie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Fortan inc.	Cuir retanné, teint, tannerie	Textiles	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Galvacor inc.	Galvanisation, immersion à chaud	Métallurgie	Réseau municipal	Travaux terminés
Québec	Glassine Canada inc.	Papiers spéciaux, cristallins et paraffinés	Pâtes et papiers	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Goodyear Canada inc.	Produits pour auto, pièces moulées, pièces tréfilées	Chimie	Réseau municipal	Retenue comme polluante

(suite)

Municipalité	Raison sociale	Produits	Secteur industriel	Lieu de rejet	Avancement du PAEQ
Québec	Groupe Unimédia inc. division Le Soleil	Journal quotidien, impression	Divers	Réseau municipal	À l'étude
Québec	Les Matériaux de pointe Précitech	Pièces métallurgiques	Métallurgie	Réseau municipal	Travaux terminés
Québec	Montenay inc.	Vapeur (déchets incinérés)	Divers	Réseau municipal	Travaux terminés
Québec	Natrel inc., division est usine #1	Lait, crème, fromage, beurre, jus	Agroalimentaire	Réseau municipal	À l'étude
Québec	Produits Agroalimentaire inc.	Détersif, bouteilles de plastique, acide sulfonique	Chimie	Réseau municipal	Travaux terminés
Québec	Produits Quatre Étoiles inc. division Bonne saveur	Charcuterie	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Rothmans, Benson and Hedges inc.	Cigarettes, tabac de coupe fine	Agroalimentaire	Réseau municipal	Rejetée
Québec	Service de pneus C.T.R. Itée, usine #2	Pneus réchapés	Chimie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Service de pneus C.T.R. Itée, usine #3	Pneus réchapés	Chimie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Québec	Tanbec	Apprêt, teinture et nettoyage de fourrure	Divers	Réseau municipal	Travaux en cours
Sainte-Foy	Daishowa inc., division Scierie Leduc	Bois scié, copeaux, planures	Industrie du bois	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Alex Coulombe Itée	Liqueurs douces, eau de source	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Les Aliments Krispy Kernels inc.	Transformation, emballage	Agroalimentaire	Réseau municipal	Travaux terminés
Sainte-Foy	Cantine mobile Itée	Préparation de mets	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Caractéria inc.	Photocomposition, télécommunication	Divers	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Gentec inc.	Centre régulateur, treillis métalliques, lasers	Métallurgie	Réseau municipal	Rejetée
Sainte-Foy	Lab-Volt (Québec) Itée	Équipement électronique, système électro-mécanique	Métallurgie	Réseau municipal	Travaux en cours
Sainte-Foy	Martin Déroit Diésel inc.	Groupe électrogènes, commutateur de transfert, cabinet de contrôle	Métallurgie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Les Matériaux de pointe Précitech	Métaux ferreux, non ferreux, en poudre	Métallurgie	Réseau municipal	À l'étude

(suite)

Municipalité	Raison sociale	Produits	Secteur industriel	Lieu de rejet	Avancement du PAEQ
Sainte-Foy	Mendes inc.	Affichage, pointage électronique, planteur de quilles	Métallurgie	Réseau municipal	Rejetée
Sainte-Foy	Les Radiateurs ACME inc.	Radiateurs, garde-fous	Métallurgie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Sainte-Foy	Les Radiateurs Roy liée	Radiateurs d'automobiles et industriels	Métallurgie	Réseau municipal	Rejetée
Vanier	Les Ateliers Haut-Registre inc.	Impression commerciale, photolithographie, séparation de couleurs	Divers	Réseau municipal	À l'étude
Vanier	Benett Fleet inc.	Fausse semelle, semelle de plastique	Textiles	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Bilopage inc.	Saucisse, jambon, cretons	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Coopérative fédérée de Québec, division des viandes	Charcuterie, congélation	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Les Cuisines Rochette (1976) inc.	Cretons, saucisses, rouleaux impériaux	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Groupe Québécois inc., division Le journal de Québec	Journal	Divers	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Les Industries Scriptam inc.	Moules d'aluminium, tableaux magnétiques, plaques signalétiques	Divers	Réseau municipal	À l'étude
Vanier	Légumes préparés Michel Lapointe inc.	Légumes préparés	Agroalimentaire	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Service d'eau douce Culligan (Québec) inc.	Équipement en traitement d'eau, atelier	Métallurgie	Réseau municipal	Retenue comme polluante
Vanier	Viande Surfine inc.	Transformations de viandes	Agroalimentaire	Réseau municipal	Travaux terminés

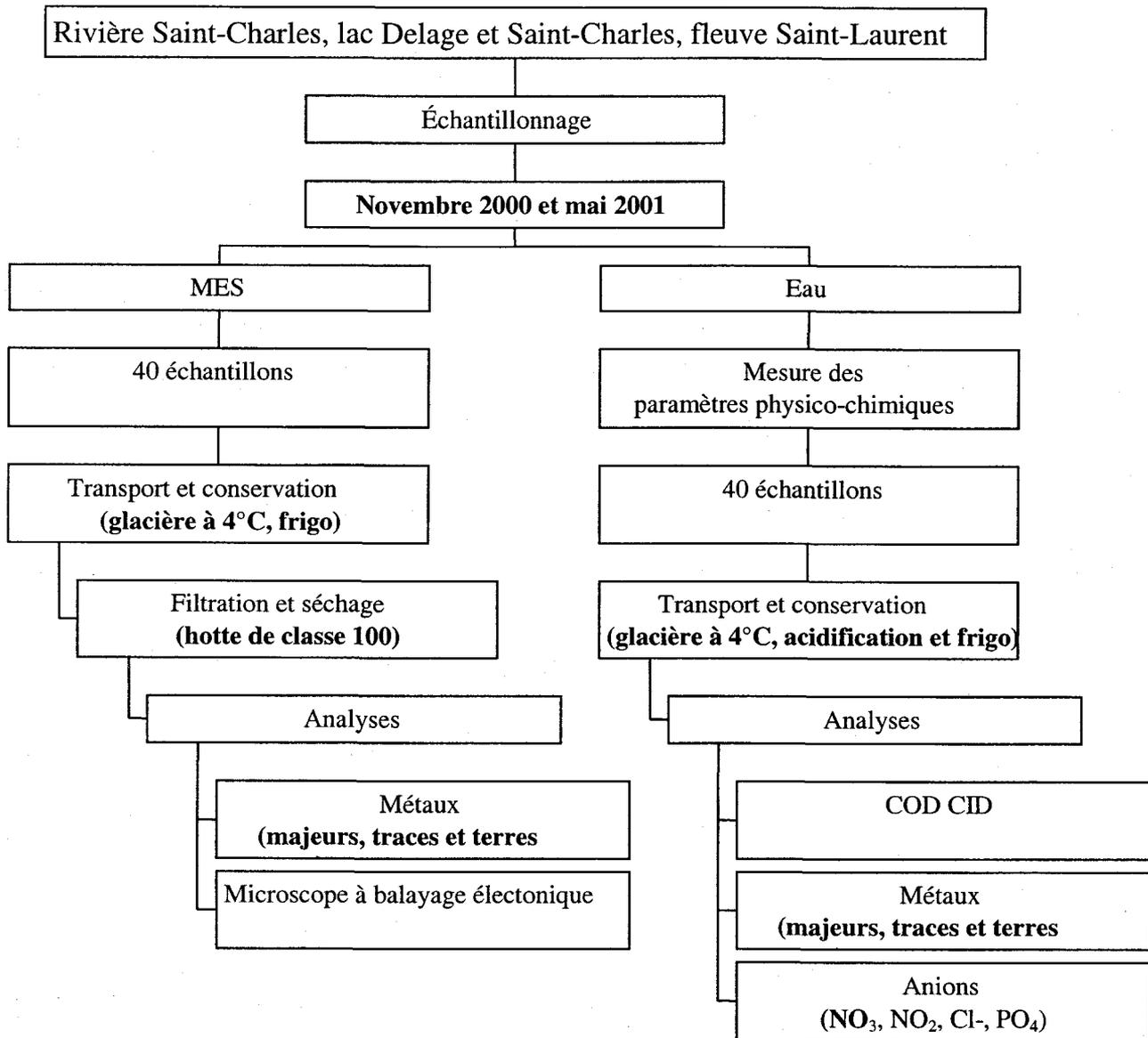
Tiré de : Hébert, 1995.



Annexe 3
Organigramme méthodologique : section 1



Organigramme méthodologique : section 1

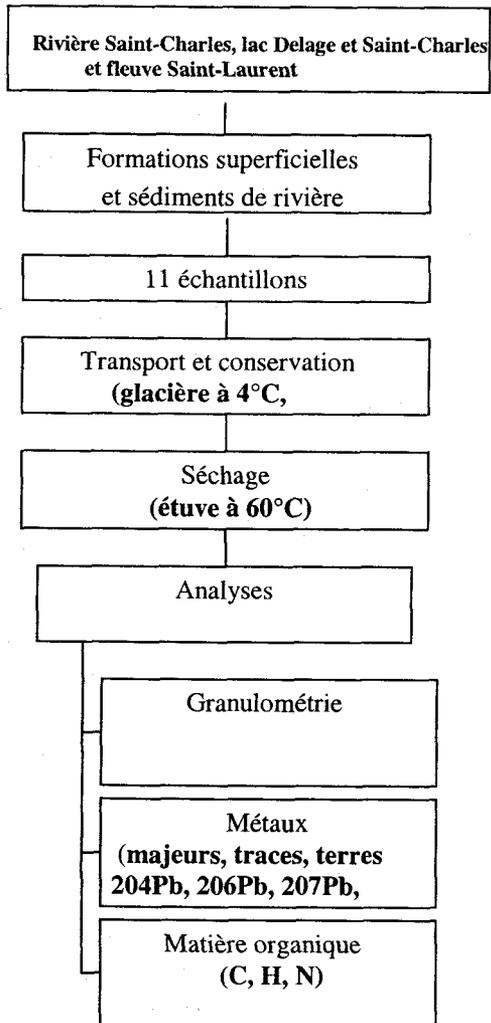


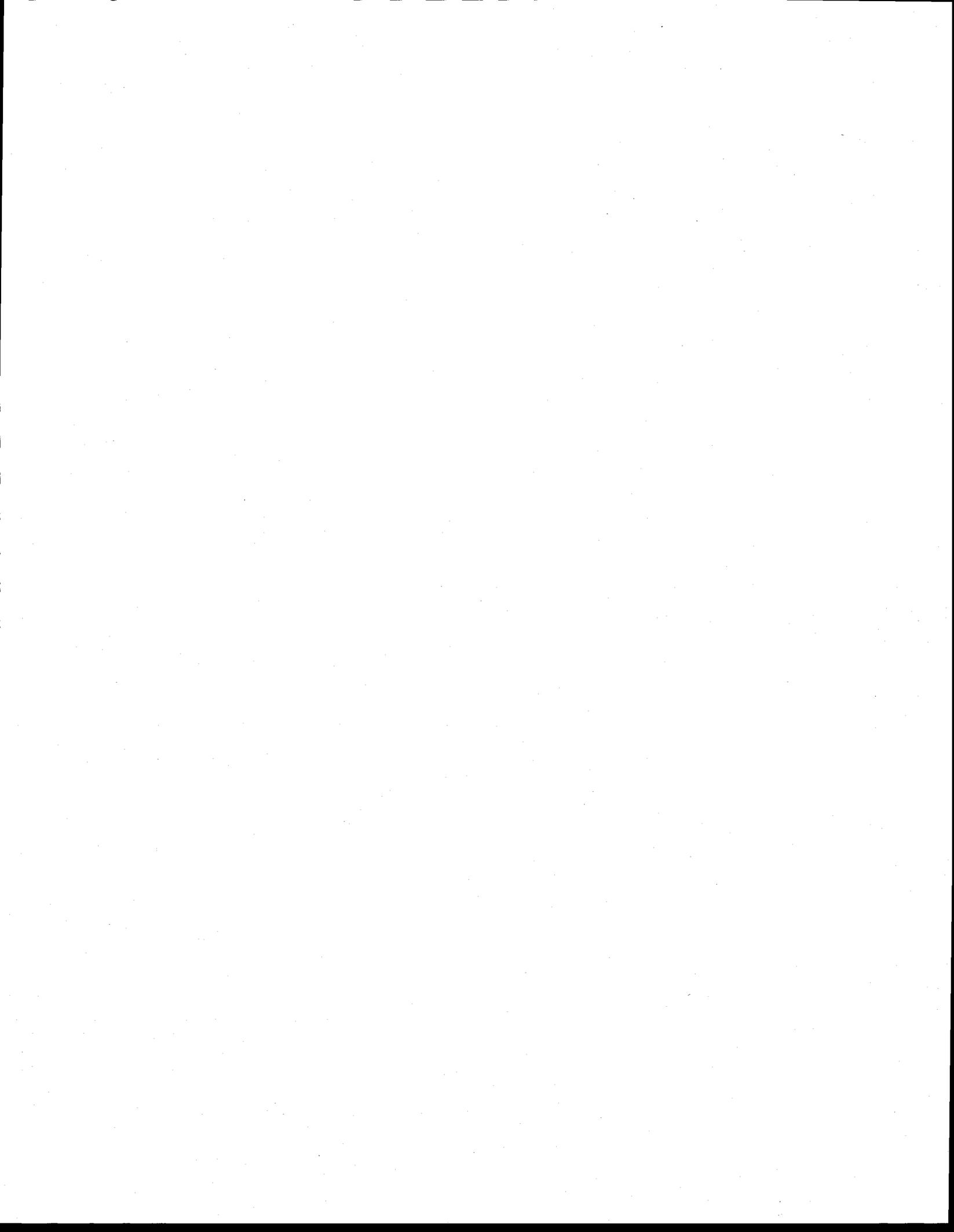


Annexe 4
Organigramme méthodologique : section 2



Organigramme méthodologique : section 2





Annexe 5
Coordonnées UTM des stations d'échantillonnage de MES et d'eau
du lac Delage au fleuve Saint-Laurent



**Coordonnées UTM des stations d'échantillonnage de MES et d'eau
du lac Delage au fleuve Saint-Laurent**

Sites	Coordonnées UTM Zone 19 NAD 83		Distance approximative du fleuve Saint-Laurent (km)
	Nord	Est	
S1	52 03 675	3 17 450	56
S2	51 97 700	3 19 450	50
S3	51 97 775	3 19 800	47
S4	51 96 200	3 20 125	45
S5	51 95 550	3 20 600	43
S6	51 94 750	3 19 600	41
S7	51 93 300	3 19 125	37
S8	51 92 750	3 19 825	34
S9	51 91 875	3 20 975	32
S10	51 89 300	3 21 400	30
S11	51 87 400	3 22 400	25
S12	51 86 650	3 23 150	23
S13	51 86 275	3 25 175	19
S14	51 86 250	3 25 275	17
S15	51 86 150	3 27 725	14
S16	51 86 850	3 28 900	13
S17	51 87 825	3 29 150	12
S18	51 87 600	3 29 700	11
S19	51 87 675	3 31 250	9
S20	51 81 900	3 28 400	0



Annexe 6
Description des échantillons de formations superficielles
et des sédiments de rivière et localisation des stations d'échantillonnage



Description des échantillons de formations superficielles et des sédiments de rivière et localisation des stations d'échantillonnage

Sites	Échantillons prélevés	Correspondance aux stations de la figure 1
FS 1	Sédiments marins argileux (silt-argileux) sous 20 cm d'humus prélevés à -75 cm.	Entre S1 et S2
FS 2	Sable moyen à grossier situé entre de gros blocs de gneiss.	S1
FS 3	Sables prélevés dans un talus sablonneux très homogène.	Hauteur de S3
FS 4	Sédiments marins profonds très argileux situé à environ 1,5 m du niveau de la rivière. L'échantillon a été prélevé -30 cm sous l'humus. C'est un faciès probablement érodable en période de crue.	Hauteur de S5
FS 5	Sédiments alluviaux récents situés à environ 50 cm de la ligne d'eau et verticalement situés à 3 cm de la ligne d'eau.	Hauteur de S6
FS 6	Sédiments sableux récents situés normalement sous l'eau en période de crue.	Entre S7 et S8
FS 7	Alluvions de terrasses fluviales prélevés à 60 cm sous l'horizon d'humus.	Hauteur de S11
Séd. 1	Sable uniforme sous une colonne d'eau de 30 cm prélevé à 10 cm sous l'interface eau-sédiment et à 7 m de la rive.	Hauteur de S2
Séd. 2	Silt-argileux dégageant une odeur prononcée prélevé sous une colonne d'eau de 40 cm à 10 cm sous l'interface eau sédiment et à 5 m de la rive.	Hauteur de S6
Séd.3	Zone d'accumulation derrière une roche prélevée à la cuillère sous une colonne d'eau de 40 cm à 5 cm sous l'interface eau-sédiment et à 1 m de la rive.	Hauteur de S12
Séd.4	Marée basse, prélevé sous une colonne d'eau de 30 cm à 10 cm de l'interface eau-sédiment à 20 m de la rive.	Hauteur de S20



Annexe 7
Méthode de digestion totale de la matière en suspension
prélevées sur des filtres de Téflon



Méthode de digestion totale de la matière en suspension prélevées sur des filtres de Téflon

Réactifs

Acides concentrés (qualité Seastar®) :

Nitrique (HNO_3)
Chlorhydrique (HCl)
Fluorhydrique (HF)
Perchlorique (HClO_4)

Eau déionisée (ED) de 18,2 megaohms, système Milli-Q- μV -Plus ®

Matériel

Bombes en Téflon (Savilex®, 15 mL)

Gants de protection, lunettes de sécurité, sarrau et manchons

Hotte

Micro-pipette

Plaque chauffante

Thermomètre à plaque chauffante

Mise en solution de l'échantillon

Note : Ce protocole est ajusté pour une masse moyenne de MES de 13,75 mg.

I. Numéroter chaque bombe à différents endroits. Par précaution, peser chaque bombe et noter le poids.

Décontamination des bombes de Téflon Savilex®

II. Ajouter 10 mL d'ED et 1 mL de HNO_3 dans chaque bombe. Chauffer à 150°C pendant 1 heure. Laisser refroidir 15 minutes avant d'ouvrir les bombes et rincer trois fois chaque bombe à l'ED. Sécher les bombes sur la plaque chauffante à 150°C afin d'accélérer les manipulations.

Oxydation de la matière organique

III. Ajouter 5 mL d'ED et 5 mL de HNO_3 dans chaque bombe. Ajouter les filtres contenant la matière en suspension (MES), les filtres pour les blancs (3) et les standards (3). Essayer de mouiller complètement la MES sur le filtre en dépliant ce dernier avec des pinces, refermer les bombes et chauffer pendant 12 heures à 150°C .

IV. Laisser refroidir avant d'ouvrir les bombes. Une fois refroidies, évaporer environ 80 % du liquide à 150°C .

V. Ajouter 4 mL d'ED, 1,5 mL de HCl , 0,5 mL de HNO_3 et 0,14 mL de HF . Refermer les bombes et chauffer pendant 12 heures à 150°C .

VI. Laisser refroidir environ 15 minutes avant d'ouvrir les bombes. Ouvrir les bombes, enlever le filtre de chaque bombe à l'aide de pinces en prenant soin de bien le rincer avec le moins d'eau possible. Ne pas oublier de rincer les pinces avec une à deux gouttes d'ED entre chaque échantillon. Ce volume d'ED restreint est nécessaire afin

de ne pas diluer les métaux. Si une partie de la matière en suspension n'est pas passée en solution, fermer les bombes et chauffer de nouveau pendant 12 heures. Rincer le couvercle de la bombe avec un petit volume d'eau pour éviter les pertes.

Neutralisation de HF à l'aide de HClO₄

VII. Ajouter 0,2 mL de HClO₄ aux bombes. Faire chauffer dans une hotte perchlorique pendant 12 heures. Ouvrir les bombes et chauffer à sec. Une fumée blanche se dégagera, ce qui est normal. Continuer à chauffer jusqu'à l'apparition d'une petite goutte jaune persistante qui ressemble à une matière plastique. Cette évaporation à sec nécessite près de 12 heures et ce à une température de 180°C. L'évaporation est terminée lorsqu'on ne voit plus de condensation de HClO₄ sur les parois de la bombe.

Note : La température de fusion du Téflon est voisine de 200°C, donc bien surveiller les plaques.

Mise en solution de l'échantillon pour l'analyse chimique

VIII. Cette étape se fait seulement lorsqu'on est prêt à doser les échantillons. Dans la situation contraire, les échantillons ne se conserveront pas et certains éléments pourront être sous-dosés.

IX. Pour mettre le résidu en solution, ajouter 1 mL d'ED et 0,5 mL de HNO₃. Noter les poids des volumes ajoutés. Chauffer ensuite à 150°C pendant une heure.

X. Laisser refroidir les bombes. Verser le digesta dans une éprouvette pré-décontaminée et identifiée, rincer la bombe avec l'ED et prendre le volume de digesta en note. Si l'échantillon est trouble ou montre la présence de particules en suspension, centrifuger 15 minutes. Recueillir le surnageant à l'aide d'une pipette Pasteur.

Annexe 8
Méthode de digestion partielle des métaux particuliers



Méthode de digestion partielle des métaux particulaires

(Adaptée de Szefer et al., 1995)

Réactifs

Acides concentrées (qualité Seastar®) :

Nitrique (HNO_3)

Chlorhydrique (HCl)

Eau déionisée (ED) de 18,2 megaohms, système Milli-Q- μV -Plus®

Matériel

Balance précise au 0,0001 g

Centrifugeuse

Gants de protection, lunettes de sécurité et sarrau

Hotte

Micro-pipette

Plateau agitateur

Tubes à centrifugation Falcon® (PP) de 50 mL

Dissolution de l'échantillon

Préparation de l'Eau régale: 1 HCl : 0,5 HNO_3

Attendre avant d'utiliser le mélange afin qu'il prenne un teinte orangée et dégaze un peu.

- I. Rincer les tubes Falcons avec l'Eau régale et laisser réagir pendant 30 minutes.
- II. Rincer trois fois les tubes à l'ED.
- III. Égoutter et mettre les tubes à l'étuve le temps du séchage.
- IV. Identifier les tubes, peser 200 mg d'échantillon sec (MES ou sédiment ou formation superficielle) dans leurs tubes respectifs.
- V. Peser 100 mg de standard afin de vérifier la répétitivité de la méthode.
- VI. Préparer un volume connu de HCl 1M.
- VII. Ajouter 10 mL de HCl 1M à chaque échantillon. Agiter pour bien mélanger et mettre en suspension l'échantillon.
- VIII. Refermer les tubes et laisser agiter 2 heures à température ambiante sur un plateau agitateur.
- IX. Ajouter 15 mL d'ED.
- X. Centrifuger les tubes à 3500 RPM.

XI. Récupérer le surnageant des échantillons à l'aide d'une pipette et transférer ce dernier dans une autre bouteille pré-décontaminée. Conserver les échantillons à 4°C à la noirceur jusqu'à l'analyse.

Annexe 9

**Méthode de digestion totale des formations superficielles et des sédiments de rivière
en utilisant les bombes hautes pressions**



Méthode de digestion totale des formations superficielles et des sédiments de rivière en utilisant les bombes hautes pressions

Réactifs

Acides concentrées (qualité Seastar®) :

Chlorhydrique (HCl)

Fluorhydrique (HF)

Nitrique (HNO₃)

Perchlorique (HClO₄)

Eau déionisée (ED) de 18,2 megaohms, système Milli-Q-μV-Plus ®

Matériel

Bombes en Téflon (Savilex®, 30 mL)

Bombes hautes pressions (PARR®, 60 mL)

Étuve à température uniforme

Gants de protection, lunette de sécurité, sarrau et manchons

Hotte

Micro-pipette

Plaque chauffante

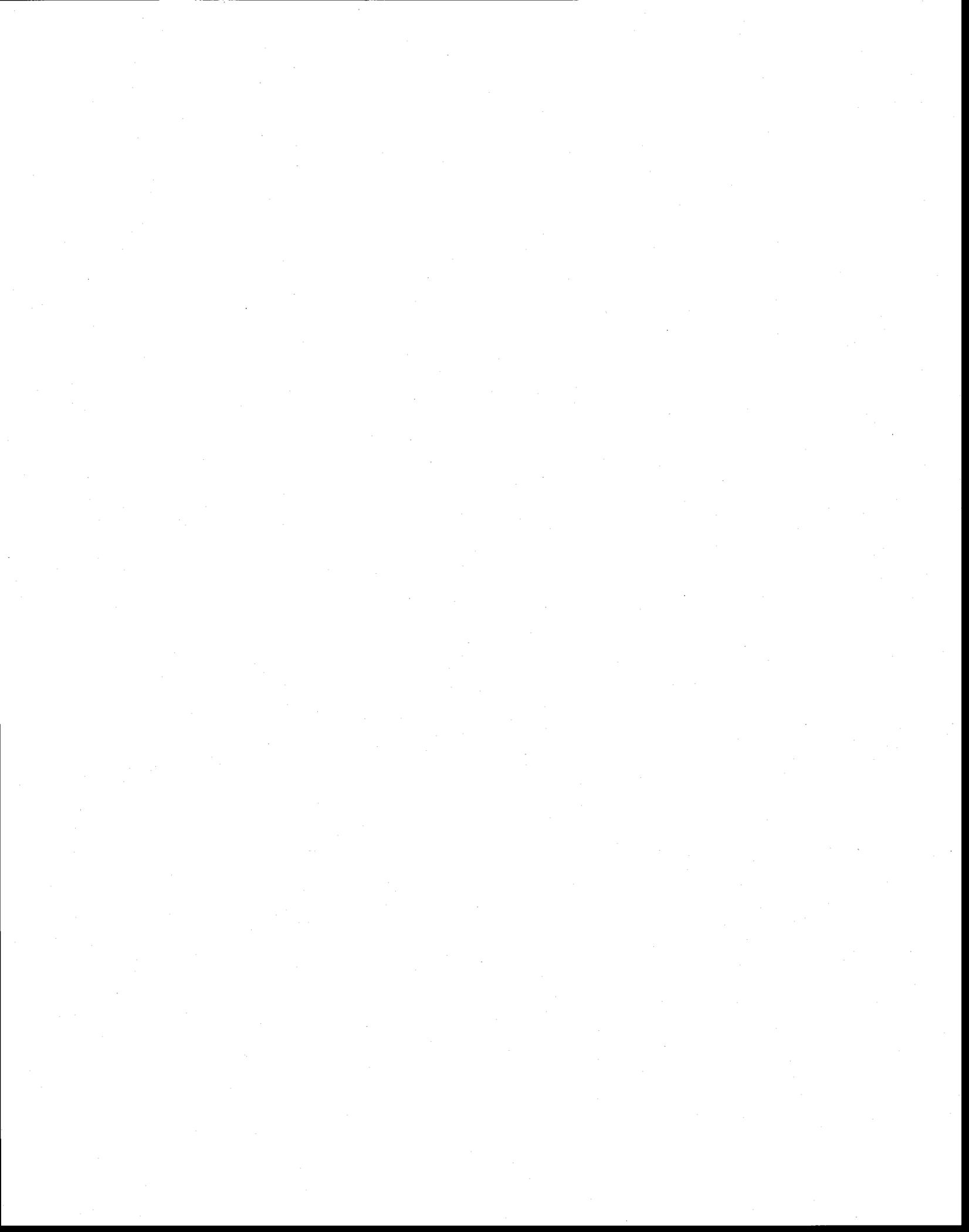
Thermomètre à plaque chauffante

Mise en solution de l'échantillon

- I. Numéroté chaque bombe de Téflon et d'acier inoxydable à différents endroits.
- II. Peser 0,1 g d'échantillon et de standard et mettre dans les bombes respectives.
- III. Préparer de l'Eau régale: 1 HCl : 0,5 HNO₃
- IV. Attendre avant d'utiliser ces réactifs que le mélange prenne un teinte orangée et se dégaze un peu.
- V. Ajouter dans chaque bombe 3,5 mL d'Eau régale / 0,1 g d'échantillon.
- VI. Ajouter dans chaque bombe 2 mL d'HF / 0,1g d'échantillon.
- VII. Insérer la bombe de Téflon dans la bombe en acier inoxydable et fermer les bombes en vissant assez serré.
- VIII. Chauffer dans une étuve à 140°C-150°C pendant 4 à 5 jours.
- IX. Laisser refroidir les bombes quelques heures puis ouvrir minutieusement.

- X. Transférer les digestas dans les bombes de 30 mL en Téflon Savilex® . Rincer l'intérieur des bombes Téflon à haute pression à l'aide d'un petit volume d'ED.
- XI. Ajouter 2,9 mL de HClO_4 aux bombes de 30 mL Savilex®. Fermer et chauffer pendant 12 heures.
- XII. Laisser refroidir, ouvrir les bombes et chauffer à sec. Une fumée blanche se dégagera ce qui est normal. Continuer à chauffer jusqu'à l'apparition d'une petite goutte jaune persistante qui ressemble à une matière plastique. Cette évaporation à sec nécessite près de 12 heures et plus de chauffage à 180°C . L'évaporation est terminée lorsqu'on ne voit plus de condensation de HClO_4 sur les parois des bombes.
- XIII. L'étape suivante se fait seulement lorsqu'on est prêt à doser les échantillons. Dans la situation contraire, les échantillons ne se conserveront pas et certaines concentrations de métaux peuvent être erronées. Pour mettre le résidu en solution, ajouter 1 mL d'ED et 0,5 mL de HNO_3 . Noter les poids des volumes ajoutés. Chauffer ensuite à 150°C pendant une heure.
- XIV. Laisser refroidir les bombes. Verser le digesta dans l'éprouvette respective, rincer la bombe avec l'ED et prendre poids en note. Si l'échantillon est trouble ou montre la présence des particules en suspension, centrifuger 15 minutes. Recueillir le surnageant à l'aide d'une pipette.

Annexe 10
Méthodologie “de particules en vrac ” pour l’analyse au microscope électronique à balayage (MEB)



Méthodologie “de particules en vrac ” pour l’analyse au microscope électronique à balayage (MEB)

- 1) Filtrer l’eau de rivière sur un filtre de 0,45 μm , en nitrocellulose de Millipore[®] jusqu’à colmatation.
- 2) Sécher le filtre sous une hotte à flux laminaire.
- 3) Découper une section d’environ 1 cm par 2 cm de filtre contenant la MES.
- 4) Coller la section sur une lame mince à l’aide de ruban gommé à double face.
- 5) Faire la minéralisation d’or-palladium sous vide afin de permettre la conductivité.
- 6) Déposer ensuite une goutte de peinture d’argent à chaque extrémité du petit rectangle d’échantillon afin de favoriser aussi la conductivité.
- 7) Balayer l’échantillon à l’aide d’un faisceau de 15 kV.
- 8) Mettre l’image en mode électron secondaire afin de connaître la texture de surface.
- 9) Observer au MEB la texture.
- 10) Identifier la composition des minéraux avec le spectromètre à dispersion d’énergie EDS des rayons x.
- 11) Enregistrer et interpréter les spectres des éléments chimiques contenu sur la surface analysée.



Annexe 11
Éléments analysés avec les différents spectromètres de masse
à source plasma (ICP)



Éléments analysés avec les différents spectromètres de masse à source plasma (ICP)

	ICP-MS	ICP-AES	ICP-AES
	VG-PQ ²⁺	Optima 3000	Varian Vista AX

Dosage de la MES, des formations superficielles et des sédiments de rivière :

<p>Novembre 2000 (MES)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, As, Ba Ca, Cd Co Cr, Cu Fe K, Mg Mg, Na Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr</p>	
<p>Mai 2001 (MES)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, As, Ba Ca, Cd Co Cr, Cu Fe K, Mg Mg, Na Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr</p>	
<p>Janvier 2002 (MES de rivière Lorette et du Berger, formations superficielle et sédiments de rivière)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, As, Ba Ca, Cd Co Cr, Cu Fe K, Mg Mg, Na Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr</p>	<p>²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb,</p>

Dosage de l'eau :

<p>Novembre 2000 (Eau)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, As, Ba Ca, Cd Co Cr, Cu Fe K, Mg Mg, Na Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr</p>	
<p>Mai 2001 (Eau)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, B, Ca, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Sr, Ti, Zn</p>	
<p>Janvier 2002 (Eaux des rivières Lorette et du Berger)</p>	<p>Rb, Nb Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Tl, U, Sr, Ba, Zn, Cd</p>	<p>Al, As, Ba Ca, Cd Co Cr, Cu Fe K, Mg Mg, Na Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr</p>	
<p>Équation utilisée pour calculer la limite de détection (L.D)</p>	<p>$L.D.=2\sqrt{2 * \text{Bruit de fond}}$</p>	<p>$L.D.=2\sigma$</p> <p>σ : Écart-type σ est fait sur 10 répliquats</p>	<p>$L.D.=2\sqrt{2 * \text{Bruit de fond}}$</p> <p>$L.D.=3\sigma$</p> <p>$\sigma$: Écart-type σ est fait sur 10 répliquats</p>



Annexe 12
Qualité des blancs analysés pour la MES en novembre 2000



Qualité des blancs analysés pour la MES en novembre 2000

	Blancs 1 papier MES	Blancs de réactifs	Limite de détection blanc de digestion	Blanc filtration pour métaux dissous
	Moyenne	Moyenne		Moyenne
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
	n=2	n=2		n=3
Al	n.d	n.d	43,00	73,00
Ca	n.d	n.d	25,32	87,00
Fe	494,50	n.d	10,73	n.d
K	93,50	n.d	178,04	n.d
Mg	7,85	n.d	0,76	10,67
Mn	n.d	n.d	2,71	13,20
Na	37,95	n.d	46,24	314,67
P	n.d	n.d	255,73	n.d
Ti	n.d	n.d	3,78	n.d
As	n.d	n.d	186,44	n.d
Ba	n.d	n.d	1,18	7,63
Cd	n.d	n.d	12,94	n.d
Co	n.d	n.d	35,17	n.d
Cr	n.d	n.d	18,03	n.d
S	n.d	n.d	238,70	n.d
Sc	n.d	n.d	1,49	n.d
V	n.d	n.d	22,33	n.d
Zn	13,50	n.d	9,02	395,40
Ni	n.d	n.d	32,86	51,33
Cu	121,87	n.d	6,91	n.d
Rb	0,29	7,00	0,26	
Y	0,22	n.d	0,27	
Zr	1,90	n.d	0,65	
Nb	0,08	n.d	0,13	
Cs	n.d	n.d	0,10	
La	n.d	n.d	0,38	
Ce	n.d	n.d	0,25	
Pr	n.d	n.d	0,07	
Nd	n.d	n.d	0,30	
Sm	n.d	n.d	0,23	
Eu	n.d	n.d	0,05	
Gd	n.d	n.d	0,22	
Tb	n.d	n.d	0,04	
Dy	n.d	3,35	0,21	
Ho	n.d	0,72	0,05	
Er	n.d	n.d	0,09	
Tm	n.d	n.d	0,04	
Yb	n.d	n.d	0,19	
Lu	n.d	n.d	0,06	
Hf	n.d	n.d	0,11	
Ta	0,02	0,56	0,04	
Pb	4,91	n.d	0,85	
Th	0,54	n.d	0,13	
U	n.d	n.d	0,03	
Sr	3,34	n.d	1,11	

n.d : Sous la limite de détection

Note : Pour connaître l'instrument utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 13
Qualité des standards pour les analyses de MES en novembre 2000



Qualité des standards pour les analyses de MES en novembre 2000

Éléments	SRM-1645	SRM-1645	SRM-1645	SRM-1646	SRM-1646	SRM-1646
	Moyenne	Certifiés et non-certifiés	Moyenne/Valeurs SRM	Moyenne	Certifiés et Non-certifiés	Moyenne/Valeurs SRM
	mg/L n=2	mg/L		mg/L n=2	mg/L	
Al	18084,80	22600	0,80	55416,60	62500	0,89
Ca	23164,30	29000	0,80	7623,40	8300	0,92
Fe	82659,40	113000	0,73	29615,40	33500	0,88
K	10006,70	12600	0,79	18254,90		
Mg	6291,29	7400	0,85	11458,62	10900	1,05
Mn	652,70	785	0,83	364,10	375	0,97
Na	4247,20	5400	0,79	17981,20		
P	432,60			561,80	540	1,04
Ti	482,00			3727,30		
As	62,86	66	0,95	15,47	11,6	1,33
Ba	265,00			407,90		
Cd	7,49	10,2	0,73	0,55	0,36	1,52
Co	n.d	10,1		n.d	10,5	
Cr	25128,70	29600	0,85	94,80	76	1,25
S	10951,40	11000	1,00	9468,30		
Sc	1,60	2	0,80	9,46	10,8	0,88
V	25,70	23,5	1,09	84,30	94	0,90
Zn	1449,80	1720	0,84	148,40	138	1,08
Ni	133,20	45,8	2,91	105,90	32	3,31
Cu	110,09	109	1,01	22,01	18	1,22
Rb	34,49			86,96		
Y	4,74			18,77		
Zr	21,46			81,61		
Nb	2,14			11,26		
Cs	1,61			3,72	3,7	1,00
La	8,01	9	0,89	38,48		
Ce	20,97			81,04	80	1,01
Pr	1,80			9,06		
Nd	7,36			34,90		
Sm	1,20			6,35		
Eu	0,38			1,54	1,5	1,03
Gd	1,21			5,88		
Tb	0,16			0,76		
Dy	1,06			4,60		
Ho	0,21			0,85		
Er	0,60			2,38		
Tm	0,09			0,34		
Yb	0,62			2,12		
Lu	0,09			0,32		
Hf	0,63			2,48		
Ta	0,05			0,67		
Pb	571,61	714	0,80	25,31	28,2	0,90
Th	1,38	1,62	0,85	8,82	10	0,88
U	0,87	1,11	0,78	2,41		
Sr	741,23			148,97		
		Moyenne:	0,96		Moyenne:	1,23

xxx : Élément qui n'a pas été dosé dans nos laboratoires

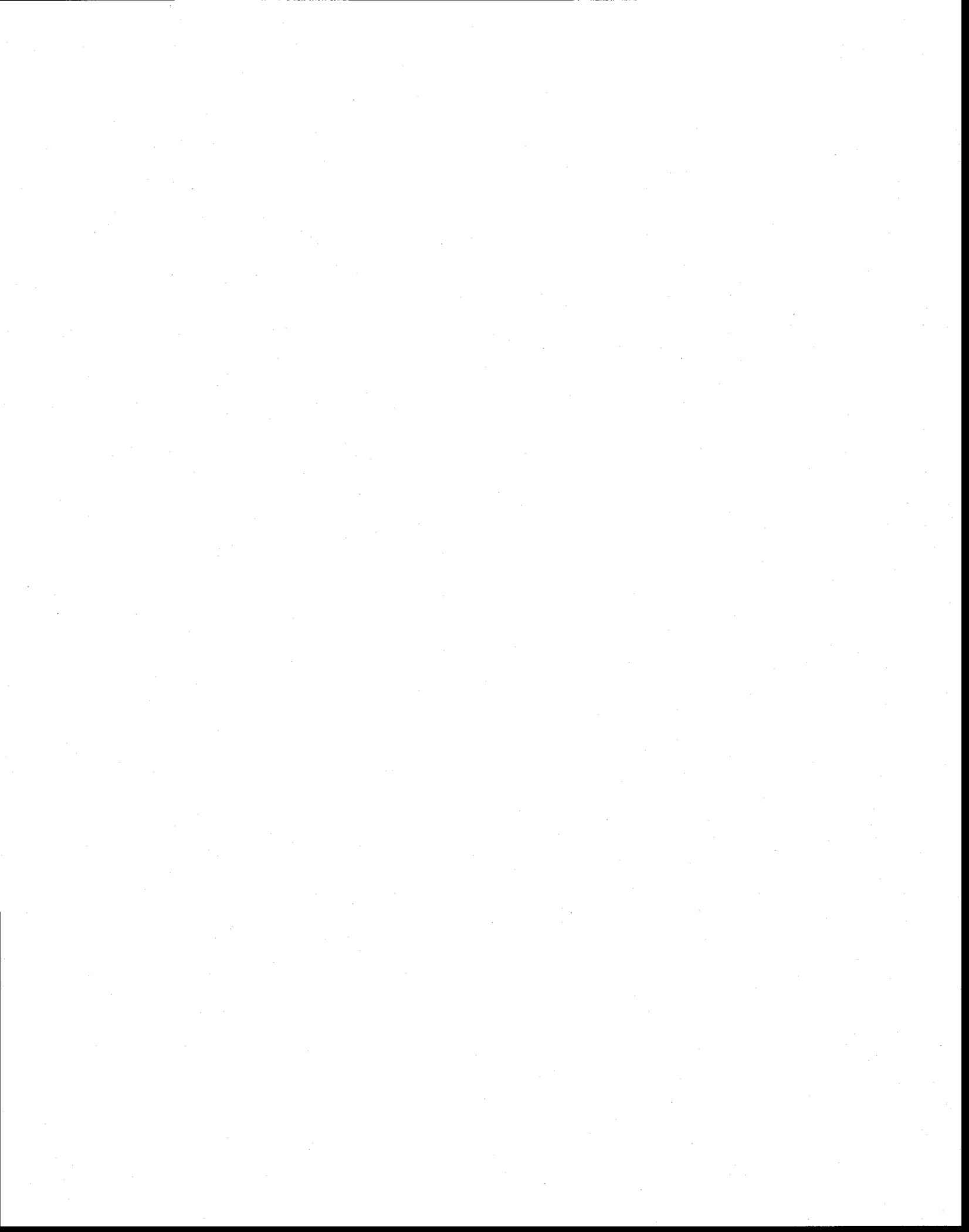
n.d : Sous la limite de détection

Blanc : Élément pour lequel la compagnie n'a pas donné de valeurs certifiées

Note : Pour connaître l'instrument utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 14
Qualité des blancs de MES et d'eau analysés en mai 2001



Qualité des blancs de MES et d'eau analysés en mai 2001

	Blancs 1 papier MES	Blancs 2 papiers MES	Blancs 3 papiers MES	Blanc de réactifs	Limite de détection blanc des métaux particulaires	Blanc des métaux dissous	Limite de détection blanc des métaux dissous
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne			
	µg/L n=3	µg/L n=3	µg/L n=3	µg/L n=2	µg/L	µg/L n=2	µg/L
Al	316,67	446,67	290,00	356,67	158,77	1,79	5,41
Ca	455,00	695,33	606,00	155,00	21,44	160,00	68,53
Fe	435,00	430,00	310,00	1695,00	279,77	6,43	3,69
K	119,33	198,00	213,33	157,00	83,01	9,03	5,47
Mg	8,95	17,15	15,80	28,15	6,03	8,11	16,09
Mn	n.d	n.d	n.d	88,50	7,74	0,26	0,38
Na	119,00	118,67	125,00	165,00	37,09	86,91	56,19
P	n.d	n.d	n.d	n.d	218,21	5,27	4,09
Ti	7,60	11,03	15,43	15,40	6,00	0,08	0,20
As	n.d	n.d	n.d	n.d	120,00	n.d	6,25
Ba	2,87	9,07	3,53	2,00	2,00	0,32	0,34
Cd	n.d	36,20	18,24	0,33	0,01	n.d	0,01
Co	n.d	n.d	n.d	n.d	20,00	1,06	0,45
Cr	n.d	26,00	n.d	284,50	20,00	0,31	0,35
Cu	115,00	180,00	230,00	11,00	10,00	n.d	0,75
S	n.d	n.d	n.d	200,00	100,00	11,31	19,84
Sc	2,93	15,95	2,65	n.d	0,50	xxx	xxx
Sr	18,77	21,07	20,53	n.d	2,00	0,30	0,02
V	n.d	n.d	n.d	n.d	20,00	xxx	xxx
Zn	n.d	n.d	n.d	76,67	6,00	20,05	0,13
Ni	n.d	n.d	n.d	454,00	50,00	0,82	0,40
Rb	0,06	0,11	n.d	0,04	0,003	0,04	0,003
Y	0,04	0,06	n.d	0,04	0,02	0,04	0,02
Zr	0,47	1,12	0,06	0,51	0,01	n.d	0,01
Nb	0,02	0,06	0,05	0,08	0,01	0,08	0,01
Cs	0,02	0,08	0,88	0,01	0,003	n.d	0,003
La	0,05	0,10	0,04	0,21	0,002	0,21	0,002
Ce	0,08	0,18	0,01	0,09	0,002	0,09	0,002
Pr	0,01	0,02	0,05	0,01	0,001	0,01	0,001
Nd	0,04	0,08	0,08	0,04	0,002	0,04	0,002
Sm	0,01	0,01	0,01	0,02	0,002	0,02	0,002
Eu	0,00	0,00	0,04	0,004	0,001	0,004	0,001
Gd	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Tb	0,001	0,001	0,001	0,005	0,001	0,004	0,001
Dy	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002	0,01	0,002
Ho	0,002	0,002	0,001	0,01	0,0001	0,01	0,0001
Er	0,005	0,01	0,01	0,01	0,002	0,01	0,002
Tm	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Yb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002	0,01	0,002
Lu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Hf	0,01	0,03	0,01	0,02	0,002	0,02	0,002
Ta	0,002	0,001	0,001	0,004	0,001	0,004	0,00
Pb	1,53	1,63	0,02	1,44	0,01	0,44	0,01
Th	n.d	0,03	0,00	n.d	0,01	n.d	0,01
U	0,004	0,01	1,55	0,005	0,00	0,003	0,003
Sr	2,82	10,14	n.d	0,35	0,02	0,04	0,02

xxx : Élément qui n'a pas été dosé

n.d : Sous la limite de détection

Note : Pour connaître l'instrument utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 15
**Qualité des standards de sédiments, de roche et d'eau pour les analyses de MES et
d'eau en mai 2001**



Qualité des standards de sédiments, de roche et d'eau pour les analyses de MES et d'eau en mai 2001

	SRM-1646a	SRM-1646a	SRM-1646a	BIR-1	BIR-1	BIR-1	TM24,2 Sample 3	TM24,2 Sample 3	TM24,2 Sample 3
	Moyenne	Certifiés et non-certifiés	Moyenne/Valeurs SRM	Moyenne	Certifié et non certifié	Moyenne/Valeurs SRM		Attendue	Moyenne/Attendu
	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	
	n=2			n=2			n=3		
Al	22210,63	22970,00	0,97	79233,0	81995	0,97	0,05	0,05	0,99
Ca	5445,17	5190,00	1,05	92462,4	95015,2	0,97	5,63		
Fe	20827,57	20080,00	1,04	75109,1	87778,4	0,86	0,02	0,02	0,95
K	8626,07	8640,00	1,00	232,10	249,03	0,93	0,22		
Mg	4081,70	3880,00	1,05	54414,0	58510,4	0,93	1,35		
Mn	232,83	234,50	0,99	1283,27	1356,075	0,95	0,01	0,01	0,97
Na	7511,07	7410	1,01	13475,9	13497,12	1,00	1,79		
P	264,20	270,00	0,98	0	91,602	0,69	n.d		
Ti	4259,27	4560,00	0,93	63,15	91,602	0,69	0,01		
As	n.d	6,23		5547,43	5755,2	0,96	0,01	0,01	1,13
Ba	209,07	210,00	1,00	n.d	0,44		0,01		
Cd	n.d	0,15		6,14	7	0,88	0,01	0,01	0,96
Co	n.d	5,00		n.d			0,01	0,01	0,95
Cr	65,73	40,90	1,61	44,77	52	0,86	n.d	0,01	
S	3471,20	3520,00	0,99	341,80	370	0,92	0,01	0,01	0,97
Sc	4,22			168,70			1,64		
V	40,93	44,84	0,91	43,55	44	0,99	xxx		
Zn	55,40	48,90	1,13	301,23	310	0,97	xxx		
Ni	n.d	23,00		78,10	70	1,12	0,02	0,02	0,90
Cu	8,55	10,01	0,85	153,07	170	0,90	0,01	0,01	1,00
Rb	29,81	38,00	0,78	110,73	125	0,89	n.d	0,01	
Y	9,17			0,23			0,001		
Zr	50,40			13,64	16	0,85	n.d		
Nb	10,30			10,77	18	0,60	0,00001		
Cs	1,12			0,60	0,6	1,00	n.d		
La	16,20	17,00	0,95	0,01			n.d		
Ce	34,39	34,00	1,01	0,63	0,63	1,00	0,000003		
Pr	3,97			1,85	1,9	0,97	n.d		
Nd	15,68			0,37			n.d		
Sm	2,90			2,27	2,5	0,91	n.d		
Eu	0,51			1,04	1,1	0,95	n.d		
Gd	2,34			0,50	0,55	0,91	n.d		
Tb	0,30			1,69	1,8	0,94	n.d		
Dy	1,78			0,30			n.d		
Ho	0,33			2,33	4	0,58	n.d		
Er	0,91			0,50			0,0000003		
Tm	0,13			1,50			n.d		
Yb	0,84			0,22			n.d		
Lu	0,12			1,42	1,7	0,84	n.d		
Hf	1,46			0,21	0,26	0,80	n.d		
Ta	0,46			0,48	0,6	0,80	0,000006		
Pb	11,22	11,70	0,96	0,04			0,000001		
Th	4,45	5,80	0,77	3,69	3	1,23	0,01		
U	1,46	2,00	0,73	0,03			n.d		
Sr	179,66	69,00	2,60	0,01	110	0,97	0,004		
				106,71			0,06		
		Moyenne :	1,06		Moyenne :	0,91		Moyenne :	0,98

xxx : Élément qui n'a pas été dosé dans nos laboratoires

n.d : Sous la limite de détection

Blanc : Élément pour lequel la compagnie n'a pas donné de valeurs certifiées

Note : Pour connaître l'instrument utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 16
Qualité des blancs (attaque partielle et totale) de formations superficielles et de
sédiments de rivière analysés en janvier 2002



Qualité des blancs (attaque partielle et totale) de formations superficielles et de sédiments de rivière analysés en janvier 2002

	SRM-1646a	Blanc de réactifs	Limite de détection	Blancs réactifs digestion	Limite de détection blanc
	attaque partielle	attaque partielle	attaque partielle	totale	digestion totale
	Écart-type	Moyenne		Moyenne	
	n=2	n=3	ppb	n=3	ppb
Al	0,12	n.d	30	n.d	30
Ca	0,20	0,174	20	177,00	20
Fe	0,96	n.d	10	n.d	10
K	0,03	n.d	100	n.d	100
Mg	0,14	n.d	10	n.d	10
Mn	0,00	n.d	5	n.d	5
Na	0,02	0,24	50	n.d	50
P	0,04	n.d	200	n.d	200
Ti	0,001	n.d	5	12,90	5
As	n.d	n.d	400	n.d	400
Ba	0,001	n.d	1	1,20	1
Cd	x	x	x	n.d	10
Co	n.d	n.d	30	n.d	30
Cr	0,56	n.d	20	n.d	20
S	0,02	n.d	200	296,67	200
Sc	n.d	n.d	2	n.d	2
V	n.d	n.d	20	n.d	20
Zn	0,004	n.d	20	n.d	1
Ni	0,01	n.d	50	137,33	50
Cu	0,002	n.d	5	11,80	5
Rb	x	x	x	2,87	0,003
Y	n.d	n.d	20	n.d	0,02
Zr	n.d	n.d	20	8,40	0,01
Nb	x	x	x	1,29	0,005
Cs	x	x	x	n.d	0,003
La	x	x	x	n.d	0,002
Ce	x	x	x	1,42	0,002
Pr	x	x	x	n.d	0,001
Nd	x	x	x	n.d	0,002
Sm	x	x	x	0,11	0,002
Eu	x	x	x	n.d	0,001
Gd	x	x	x	n.d	0,005
Tb	x	x	x	n.d	0,001
Dy	x	x	x	n.d	0,002
Ho	x	x	x	n.d	0,0001
Er	x	x	x	n.d	0,002
Tm	x	x	x	n.d	0,001
Yb	x	x	x	n.d	0,002
Lu	x	x	x	n.d	0,001
Hf	x	x	x	0,29	0,002
Ta	x	x	x	0,07	0,001
Pb	0,08	n.d	120	13,65	0,005
Th	x	x	x	n.d	0,01
U	x	x	x	n.d	0,003
Sr	0,01	n.d	1	6,45	0,02
Si	0,17	n.d	0,08	n.d	0,08

xxx : Élément qui n'a pas été dosé

n.d : Sous la limite de détection

Note : Pour connaître l'instrument utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 17
Qualité des standards pour les analyses de formations superficielles et de sédiments
de rivière en janvier 2002



Qualité des standards pour les analyses de formations superficielles et de sédiments de rivière en janvier 2002

	SRM-1646a	SRM-1646a	SRM-1646-a	BIR-1	BIR-1	BIR-1
	Moyenne	Certifiés et non-certifiés	Moyenne/Certifiés et non-certifiés	Moyenne	Certifiés et non-certifiés	Moyenne/Certifiés et non-certifiés
	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	
	n=2			n=2		
Al	20375,80	22970,00	0,89	83797,95	81995	1,02
Ca	4514,15	5190,00	0,87	94678,30	95015,2	1,00
Fe	17320,25	20080,00	0,86	123410,95	87778,4	1,41
K	6869,45	8640,00	0,80	234,50	249,03	0,94
Mg	3334,65	3880,00	0,86	56352,50	58510,4	0,96
Mn	205,00	234,50	0,87	2216,50	1356,075	1,63
Na	6449,65	7410	0,87	13446,65	13497,12	1,00
P	218,50	270,00	0,81	n.d	91,602	
Ti	4054,30	4560,00	0,89	4320,25	5755,2	0,75
As	n.d	6,23		n.d	0,44	
Ba	188,38	210,00	0,90	7,07	7	1,01
Cd	n.d	0,15		n.d		
Co	n.d	5,00		114,90	52	2,21
Cr	31,95	40,90	0,78	n.d	370	
S	3004,75	3520,00	0,85	732,10		
Sc	3,80			46,33	44	1,05
V	35,35	44,84	0,79	320,20	310	1,03
Zn	60,12	48,90	1,23	105,16	70	1,50
Ni	25,80	23,00	1,12	n.d	170	
Cu	9,70	10,01	0,97	371,00	125	2,97
Rb	27,48	38,00	0,72	0,42		
Y	10,43			15,92	16	0,99
Zr	69,38			8,67	18	0,48
Nb	9,20			3,61	0,6	6,01
Cs	n.d			n.d		
La	13,74	17,00	0,81	0,65	0,63	1,03
Ce	29,45	34,00	0,87	1,84	1,9	0,97
Pr	3,80			0,39		
Nd	16,21			2,48	2,5	0,99
Sm	3,00			1,13	1,1	1,03
Eu	0,57			0,54	0,55	0,99
Gd	2,64			1,80	1,8	1,00
Tb	0,31			0,31		
Dy	1,64			2,18	4	0,54
Ho	0,31			0,50		
Er	0,83			1,36		
Tm	0,16			0,27		
Yb	1,02			1,69	1,7	0,99
Lu	0,16			0,26	0,26	0,99
Hf	2,48			0,48	0,6	0,80
Ta	0,91			0,06		
Pb	10,11	11,70	0,86	n.d	3	
Th	4,43	5,80	0,76	0,04		
U	1,49	2,00	0,74	0,01		
Sr	61,74	69,00	0,89	102,10	110	0,93
		Moyenne :	0,87		Moyenne :	1,29

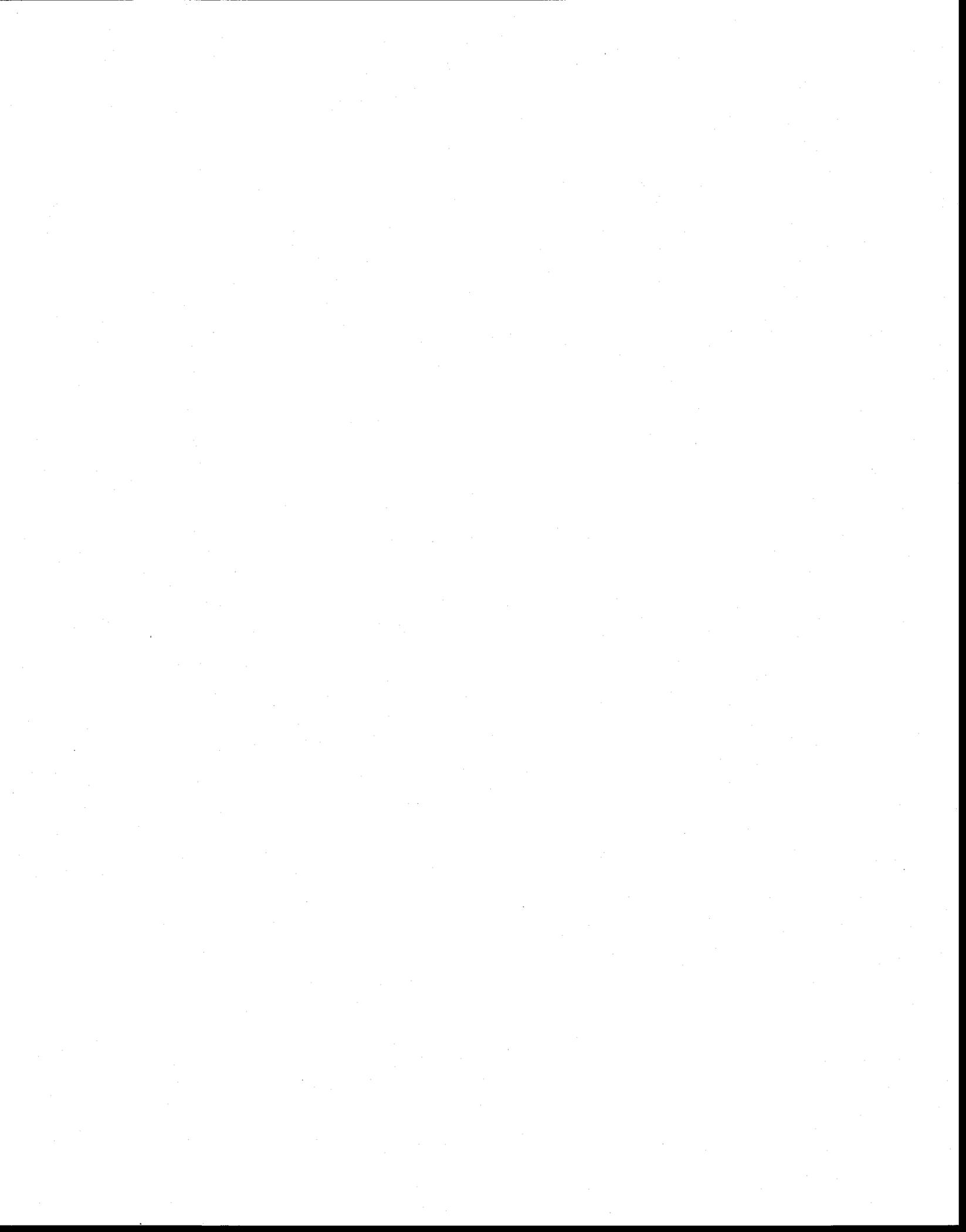
Le standard 1646a a été digéré par bombe Savilex et le standard BIR-1 a été digéré par les bombes hautes pressions PARR.

Xxx : Éléments non-dosé

n.d : Sous la limite de détection

Blanc : Élément pour lequel la compagnie n'a pas donné de valeurs certifiées ou non-certifiées.

Note : Pour connaître l'appareil utilisé pour doser les différents éléments, consulter l'Annexe 8.



Annexe 18
Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données
moyennes journalières météorologiques



Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données moyennes journalières météorologiques

Date (j-m-a)	Débit (m ³ /s)	Précipitation (mm)	Température (oC)	Date	Débit (m ³ /s)	Précipitation (mm)	Température (oC)
01-10-00	2,27	0	10,4	01-12-00	2,74	0	-4,1
02-10-00	2,31	0	9,0	02-12-00	2,62	0	-7,3
03-10-00	2,16	0	9,1	03-12-00	3,57	0	-9,9
04-10-00	2,00	0	5,2	04-12-00	3,87	0	-8,2
05-10-00	2,44	0	4,1	05-12-00	3,23	30	-4,5
06-10-00	2,67	54	3,3	06-12-00	3,47	4	-11,6
07-10-00	2,38	12	2,8	07-12-00	5,38	12	-17,0
08-10-00	2,02	12	2,5	08-12-00	9,38	0	-25,5
09-10-00	1,88	0	0,5	09-12-00	9,32	0	-27,1
10-10-00	2,59	56	0,5	10-12-00	5,02	30	-16,2
11-10-00	2,52	8	2,7	11-12-00	6,31	32	-4,6
12-10-00	2,40	0	4,8	12-12-00	8,40	54	-7,5
13-10-00	2,09	0	7,6	13-12-00	7,93	0	-19,2
14-10-00	2,83	42	8,5	14-12-00	7,29	66	-12,3
15-10-00	2,95	0	3,7	15-12-00	8,26	0	-14,5
16-10-00	2,51	0	-1,1	16-12-00	7,41	20	-7,9
17-10-00	2,47	0	2,1	17-12-00	16,51	94	2,3
18-10-00	3,86	68	5,3	18-12-00	28,15	30	-4,7
19-10-00	5,93	0	6,2	19-12-00	26,62	0	-12,3
20-10-00	6,14	0	4,2	20-12-00	21,77	56	-9,7
21-10-00	5,78	8	5,8	21-12-00	25,11	0	-12,7
22-10-00	4,65	0	2,1	22-12-00	24,55	0	-12,0
23-10-00	3,55	0	-0,2	23-12-00	22,38	0	-14,4
24-10-00	3,21	0	3,2	24-12-00	27,45	0	-19,4
25-10-00	2,91	0	3,7	25-12-00	37,56	0	-18,0
26-10-00	2,70	0	6,5	26-12-00	42,02	0	-17,1
27-10-00	2,40	4	9,0	27-12-00	37,94	4	-14,1
28-10-00	2,44	0	1,1	28-12-00	37,70	6	-11,3
29-10-00	2,38	16	-0,6	29-12-00	39,95	0	-8,8
30-10-00	2,79	0	1,1	30-12-00	37,94	4	-6,1
31-10-00	2,57	0	-1,3	31-12-00	37,11	52	-2,2
01-11-00	1,69	0	0,5	01-01-01	33,54	0	-5,5
02-11-00	1,70	0	0,9	02-01-01	30,14	0	-11,3
03-11-00	1,90	0	3,0	03-01-01	25,02	0	-14,1
04-11-00	1,82	0	4,3	04-01-01	25,23	16	-9,2
05-11-00	1,94	4	3,6	05-01-01	20,51	0	-16,8
06-11-00	2,05	0	2,8	06-01-01	24,35	0	-7,7
07-11-00	1,84	0	4,9	07-01-01	21,26	0	-8,3
08-11-00	1,72	4	5,0	08-01-01	19,33	0	-14,1
09-11-00	1,71	0	5,0	09-01-01	14,23	0	-17,6
10-11-00	1,78	18	4,8	10-01-01	11,92	0	-18,8
11-11-00	1,94	14	4,9	11-01-01	13,74	0	-15,4
12-11-00	1,94	0	2,0	12-01-01	12,76	0	-15,9
13-11-00	1,91	0	2,2	13-01-01	13,59	0	-16,9
14-11-00	2,49	52	4,9	14-01-01	19,73	0	-9,7
15-11-00	6,80	28	2,4	15-01-01	14,04	0	-14,4
16-11-00	8,00	0	0,7	16-01-01	15,31	0	-6,7
17-11-00	6,94	20	-0,5	17-01-01	18,83	0	-14,1
18-11-00	5,91	0	-3,1	18-01-01	19,95	0	-19,0
19-11-00	4,66	0	-4,1	19-01-01	21,15	0	-8,3
20-11-00	4,06	14	-1,7	20-01-01	23,04	0	-19,5
21-11-00	3,66	14	-1,9	21-01-01	18,35	0	-23,9
22-11-00	3,20	0	-5,1	22-01-01	8,67	0	-23,8
23-11-00	2,57	0	-8,4	23-01-01	13,47	0	-11,5
24-11-00	3,30	0	-13,5	24-01-01	19,87	0	-5,3
25-11-00	5,33	0	-10,3	25-01-01	23,29	0	-12,4
26-11-00	5,11	38	-5,0	26-01-01	22,55	0	-15,7
27-11-00	3,83	52	0,9	27-01-01	23,93	0	-6,9
28-11-00	3,12	0	0,1	28-01-01	29,44	0	-12,1
29-11-00	3,16	0	-0,1	29-01-01	25,62	0	-17,0
30-11-00	3,02	0	-1,3	30-01-01	25,50	0	-7,6
				31-01-01	25,73	0	-8,6

Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données moyennes journalières météorologiques (suite)

Date (j-m-a)	Débit (m³/s)	Précipitation (mm)	Température (oC)	Date	Débit (m³/s)	Précipitation (mm)	Température (oC)
01-02-01	27,47	0	-9,2	03-04-01	2,68	0	0,9
02-02-01	27,79	0	-7,7	04-04-01	4,35	0	1,7
03-02-01	23,50	0	-9,1	05-04-01	4,73	0	0,8
04-02-01	20,80	0	-17,6	06-04-01	3,28	0	-1,9
05-02-01	23,90	0	-10,0	07-04-01	1,79	0	0,6
06-02-01	24,88	0	-3,5	08-04-01	1,70	14	1,3
07-02-01	26,24	0	-6,1	09-04-01	4,43	10	3,2
08-02-01	26,75	0	-11,6	10-04-01	6,88	0	3,2
09-02-01	24,50	0	-9,5	11-04-01	8,75	0	3,0
10-02-01	30,07	0	-6,1	12-04-01	13,19	52	2,7
11-02-01	27,45	0	-17,1	13-04-01	21,01	26	3,2
12-02-01	22,50	0	-17,4	14-04-01	24,07	0	0,0
13-02-01	18,56	8	-12,3	15-04-01	24,46	0	-0,3
14-02-01	19,60	38	-11,5	16-04-01	24,48	0	2,7
15-02-01	24,98	0	-9,0	17-04-01	23,96	0	2,0
16-02-01	22,23	0	-14,0	18-04-01	22,85	0	1,0
17-02-01	22,84	0	-11,0	19-04-01	21,91	0	0,6
18-02-01	17,98	0	-18,1	20-04-01	20,77	0	1,5
19-02-01	15,98	20	-8,6	21-04-01	21,77	0	6,7
20-02-01	20,88	44	-1,0	22-04-01	27,93	16	6,9
21-02-01	22,63	4	-10,6	23-04-01	37,27	0	4,9
22-02-01	26,37	0	-21,7	24-04-01	39,81	6	8,8
23-02-01	24,52	0	-12,8	25-04-01	46,03	0	3,3
24-02-01	23,50	0	-13,8	26-04-01	45,32	0	4,5
25-02-01	20,20	46	-12,5	27-04-01	39,90	0	4,6
26-02-01	17,59	58	-2,7	28-04-01	35,98	0	2,2
27-02-01	28,34	0	-10,7	29-04-01	30,31	0	2,6
28-02-01	25,65	0	-18,8	30-04-01	25,20	4	5,4
01-03-01	18,48	0	-22,7	01-05-01	21,44	0	12,1
02-03-01	4,98	0	-20,6	02-05-01	24,06	0	14,7
03-03-01	2,50	0	-20,3	03-05-01	30,41	18	15,6
04-03-01	1,83	0	-14,8	04-05-01	34,57	0	13,0
05-03-01	4,98	0	-6,8	05-05-01	30,68	0	7,1
06-03-01	7,17	0	-0,9	06-05-01	19,01	0	5,8
07-03-01	16,14	0	-5,4	07-05-01	10,23	0	8,4
08-03-01	19,76	0	-6,1	08-05-01	9,42	0	10,8
09-03-01	22,09	0	-2,4	09-05-01	9,00	0	11,3
10-03-01	20,19	0	-2,2	10-05-01	8,52	0	13,1
11-03-01	20,48	30	-3,2	11-05-01	7,73	0	14,0
12-03-01	10,05	0	-8,7	12-05-01	8,26	64	11,3
13-03-01	6,01	20	-5,3	13-05-01	9,63	0	7,4
14-03-01	3,82	82	-2,2	14-05-01	7,77	0	8,0
15-03-01	0,47	4	-2,4	15-05-01	5,94	6	9,8
16-03-01	0,87	0	-5,1	16-05-01	5,19	0	10,4
17-03-01	1,06	0	-5,5	17-05-01	4,71	0	9,7
18-03-01	0,97	0	-0,5	18-05-01	4,52	14	10,4
19-03-01	1,48	0	2,1	19-05-01	4,48	0	11,5
20-03-01	1,85	0	-0,8	20-05-01	4,06	0	12,2
21-03-01	2,91	0	0,8	21-05-01	3,31	0	15,1
22-03-01	2,60	62	0,5	22-05-01	2,64	0	14,2
23-03-01	1,85	30	0,3	23-05-01	2,16	0	15,1
24-03-01	1,24	0	-1,1	24-05-01	1,80	0	14,1
25-03-01	1,73	0	-6,4	25-05-01	1,56	0	16,1
26-03-01	2,25	0	-8,9	26-05-01	1,25	0	15,4
27-03-01	1,99	0	-4,8	27-05-01	1,34	54	13,7
28-03-01	6,44	0	-1,8	28-05-01	2,57	30	12,4
29-03-01	2,82	0	-2,8	29-05-01	5,51	30	12,1
30-03-01	3,93	0	0,0	30-05-01	5,50	4	7,0
31-03-01	7,33	0	0,4	31-05-01	4,88	0	7,5
01-04-01	6,39	0	-0,7				
02-04-01	3,14	0	-1,7				

Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données moyennes journalières météorologiques (suite)

Date (jj-mm-aa)	Débit (m ³ /s)	Précipitation (mm)	Température (°C)	Date	Débit (m ³ /s)	Précipitation (mm)	Température (°C)
01-06-01	3,82	0	11,0	01-08-01	1,51	0	19,6
02-06-01	4,79	32	11,2	02-08-01	1,12	0	20,2
03-06-01	5,78	34	11,1	03-08-01	0,99	0	21,3
04-06-01	8,93	62	11,9	04-08-01	0,81	0	16,8
05-06-01	10,37	0	13,8	05-08-01	0,70	0	18,7
06-06-01	8,53	0	14,2	06-08-01	1,01	10	20,4
07-06-01	6,65	0	14,0	07-08-01	0,86	10	21,5
08-06-01	4,70	0	12,5	08-08-01	0,61	4	16,6
09-06-01	3,58	4	13,0	09-08-01	0,32	0	22,3
10-06-01	2,99	0	15,2	10-08-01	0,68	8	21,3
11-06-01	2,54	0	16,4	11-08-01	0,57	0	14,0
12-06-01	2,26	0	15,1	12-08-01	1,08	0	17,3
13-06-01	2,02	0	16,9	13-08-01	1,03	16	17,0
14-06-01	1,53	0	19,0	14-08-01	1,30	0	13,8
15-06-01	1,10	0	22,2	15-08-01	1,39	0	15,3
16-06-01	0,90	0	22,8	16-08-01	1,43	8	17,3
17-06-01	0,93	8	19,7	17-08-01	3,21	44	18,0
18-06-01	1,42	0	15,4	18-08-01	3,11	12	17,5
19-06-01	2,48	14	17,2	19-08-01	1,15	0	17,5
20-06-01	2,19	0	18,8	20-08-01	1,84	39	15,5
21-06-01	1,52	0	15,0	21-08-01	2,76	13	17,0
22-06-01	2,50	57	13,7	22-08-01	1,31	4	18,0
23-06-01	5,26	42	17,1	23-08-01	0,86	0	15,6
24-06-01	6,21	4	17,9	24-08-01	0,68	0	13,0
25-06-01	4,62	0	18,7	25-08-01	0,68	0	11,7
26-06-01	3,08	0	21,4	26-08-01	1,23	20	13,4
27-06-01	2,32	4	21,7	27-08-01	1,40	4	17,8
28-06-01	1,88	0	17,2	28-08-01	0,76	10	13,9
29-06-01	1,11	8	12,3	29-08-01	0,94	0	11,6
30-06-01	1,03	4	17,9	30-08-01	0,87	0	10,8
01-07-01	1,10	11	17,7	31-08-01	1,30	29	16,0
02-07-01	1,21	0	11,2	01-09-01	1,97	1	11,4
03-07-01	1,06	0	11,7	02-09-01	1,06	0	8,1
04-07-01	1,07	9	15,4	03-09-01	0,89	0	12,2
05-07-01	1,29	0	16,5	04-09-01	1,18	19	13,6
06-07-01	1,36	14	12,3	05-09-01	1,03	0	10,6
07-07-01	1,42	2	15,2	06-09-01	0,85	0	10,3
08-07-01	1,43	20	15,1	07-09-01	0,64	0	14,6
09-07-01	1,67	0	17,6	08-09-01	0,77	10	19,8
10-07-01	1,83	10	15,7	09-09-01	1,18	0	21,0
11-07-01	2,49	22	15,3	10-09-01	1,23	6	19,1
12-07-01	3,36	30	14,4	11-09-01	1,12	0	13,8
13-07-01	3,26	22	14,6	12-09-01	0,80	6	10,7
14-07-01	3,90	0	15,7	13-09-01	1,11	28	10,8
15-07-01	3,46	24	15,7	14-09-01	0,93	0	5,6
16-07-01	3,70	0	15,3	15-09-01	0,88	0	6,5
17-07-01	4,46	28	14,8	16-09-01	0,89	0	10,7
18-07-01	7,93	0	16,7	17-09-01	0,84	0	11,6
19-07-01	6,46	0	17,6	18-09-01	0,78	0	12,4
20-07-01	4,48	0	18,1	19-09-01	0,69	0	9,9
21-07-01	3,21	0	18,4	20-09-01	0,93	41	12,6
22-07-01	3,48	8	19,2	21-09-01	1,94	25	14,5
23-07-01	8,78	0	20,8	22-09-01	2,44	12	15,1
24-07-01	10,56	20	20,8	23-09-01	2,13	0	15,2
25-07-01	11,21	8	17,7	24-09-01	1,74	0	15,2
26-07-01	9,01	0	12,1	25-09-01	6,29	64	14,4
27-07-01	5,83	0	11,2	26-09-01	14,83	4	12,0
28-07-01	4,29	0	13,7	27-09-01	12,78	0	9,6
29-07-01	3,41	0	16,8	28-09-01	8,95	0	8,1
30-07-01	2,54	0	17,4	29-09-01	6,33	0	5,0
31-07-01	1,95	0	18,4	30-09-01	4,83	0	5,9

Données moyennes journalières de débit de la rivière Saint-Charles et données moyennes journalières météorologiques (suite)

Date	Débit	Précipitation	Température
(jj-mm-aa)	(m ³ /s)	(mm)	(°C)
01-10-01	3,74	3,74	8,0
02-10-01	3,13	3,14	10,6
03-10-01	2,71	2,71	6,2
04-10-01	2,62	2,63	10,5
05-10-01	2,73	2,74	8,7
06-10-01	9,81	9,81	6,2
07-10-01	16,26	16,26	2,1
08-10-01	13,15	13,15	0,5
09-10-01	9,161	9,16	3,0
10-10-01	6,80	6,80	6,0
11-10-01	5,63	5,64	10,5
12-10-01	4,80	4,80	13,6
13-10-01	4,11	4,12	12,3
14-10-01	3,59	3,60	14,0
15-10-01	4,32	4,33	10,2
16-10-01	5,55	5,56	7,4
17-10-01	6,45	6,46	7,7
18-10-01	7,79	7,79	2,0
19-10-01	7,96	7,96	2,6
20-10-01	6,92	6,93	5,2
21-10-01	5,94	5,94	5,1
22-10-01	5,23	5,24	4,3
23-10-01	6,12	6,13	2,6
24-10-01	14,24	14,24	10,3
25-10-01	21,25	21,25	8,8
26-10-01	23,81	23,81	4,7
27-10-01	16,07	16,07	3,3
28-10-01	11,72	11,72	-0,1
29-10-01	6,375	6,38	-0,8
30-10-01	5,924	5,92	0,1
31-10-01	5,475	5,48	-1,5

Annexe 19
Données moyennes horaires des précipitations à la stations de
Sainte-Catherine de la Jacques Cartier aux périodes d'échantillonnage

Table des marées du fleuve Saint-Laurent



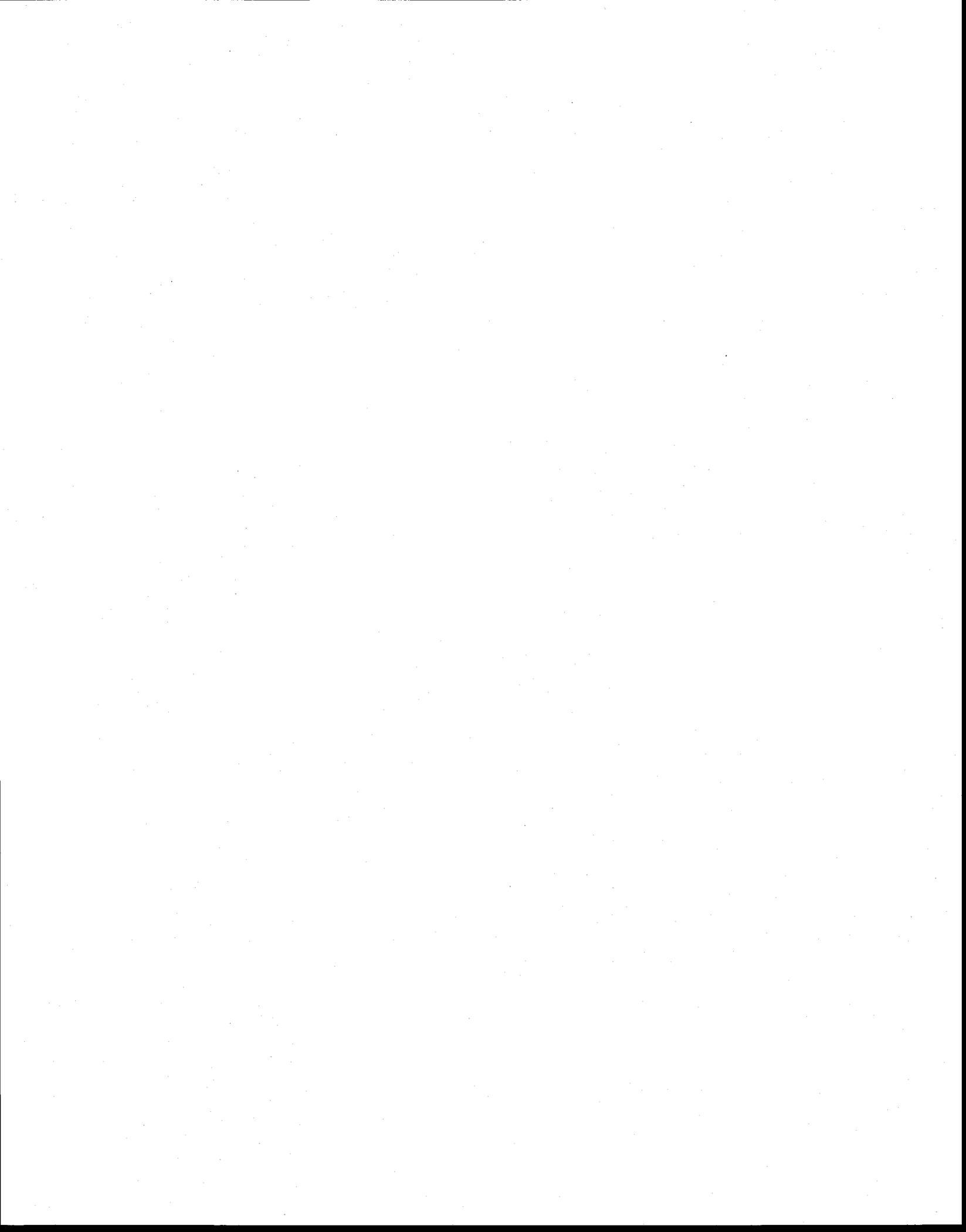
Données moyennes horaires des précipitations à la stations de Sainte-Catherine de la Jacques Cartier aux périodes d'échantillonnage

Heure	09-11-00	10-11-00	17-11-00	18-11-00	09-05-01	10-05-01
S						
(HH:00)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	8	0	0	0
7	0	0	2	0	0	0
8	0	0	2	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	2	0	0	0	0
11	0	8	4	0	0	0
12	0	4	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	4	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	6
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	4	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
Total:	0	18	20	0	0	6

Table des marées du fleuve Saint-Laurent

Endroit prélevé	Jour	Heure	Hauteur
	(jj-mm-aa)		(m)
Port-Alfred	10-11-00	0130	4,8
Port-Alfred		0730	0,7
Port-Alfred		1345	5,2
Port-Alfred		2000	0,5
Port-Alfred	18-11-00	0140	0,9
Port-Alfred		0745	4,2
Port-Alfred		1340	1,4
Port-Alfred		2005	4,8
Chicoutimi	15-05-01	0600	1,5
Chicoutimi		1150	3,7
Chicoutimi		1840	1,3

(Source : Pêche et Océan; 2000 et Pêche et Océan; 2001)



Annexe 20
Données physico-chimiques de l'eau de la rivière Saint-Charle



Données physico-chimiques de l'eau de la rivière Saint-Charles

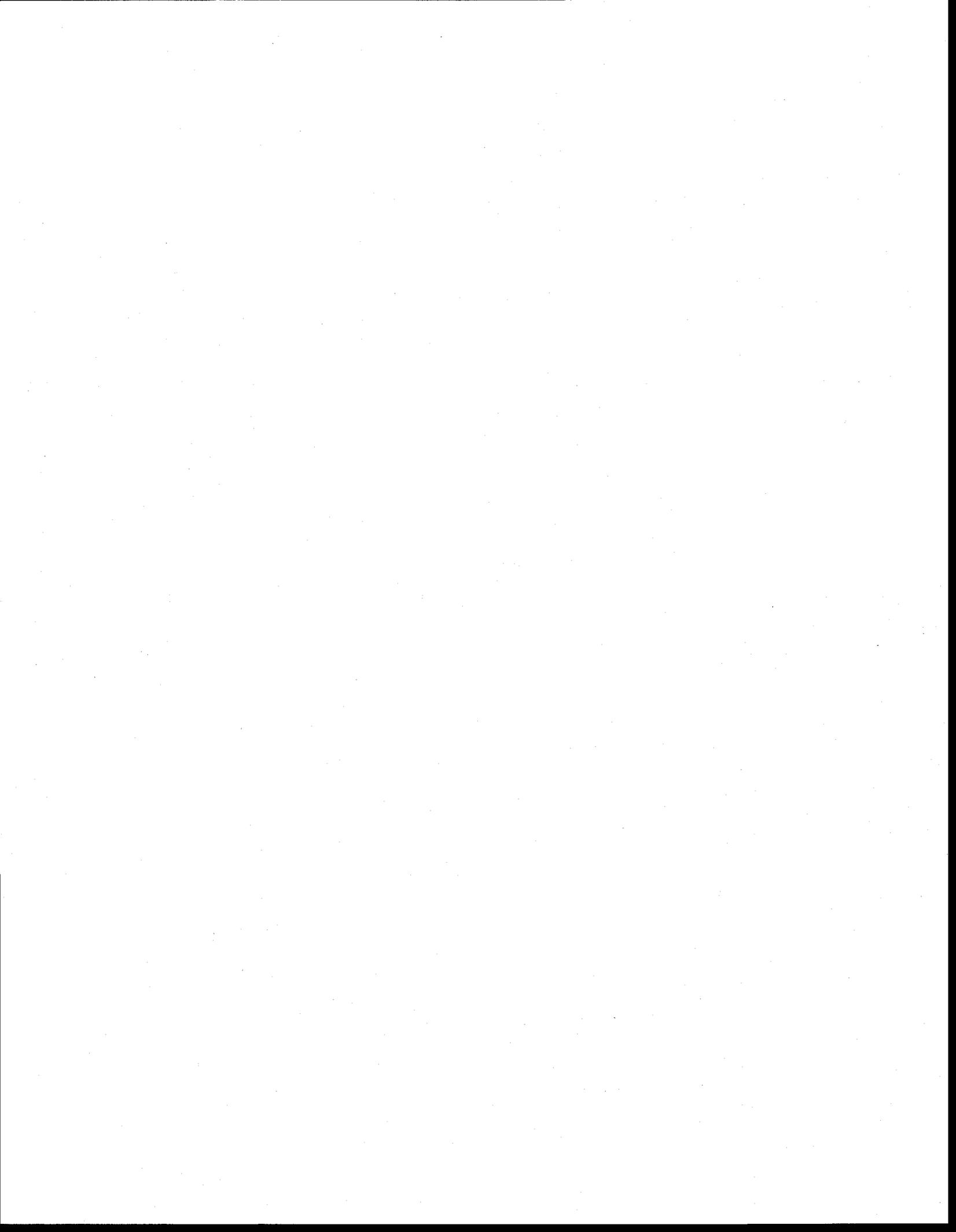
Date	Distance amont	pH	Matière en suspension	Conductivité	Alcalinité	Dureté	Sulfate	Chlorure	Carbone organique dissous	Carbone inorganique dissous
	(km)		(mg/L)	(uS/cm)	(mg CaCO ₃ /L)	(mg CaCO ₃ /L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg C/L)	(mg C/L)
Nov	0	7,2	0,10	78	18	66	9	15	2,7	3,3
Nov	9	7,4	10,45	75	18	54	4	19	3,5	2,9
Nov	11	7,3	2,76	103	22	64	4	21	3,6	2,9
Nov	12	7,3	2,67	123	26	72	6	25	3,2	0,7
Nov	13	7,3	3,06	125	24	56	5	25	3,8	5,0
Nov	14	7,3	4,42	139	24	70	6	27	3,7	1,1
Nov	17	7,5	7,30	138	30	72	7	25	5,7	5,6
Nov	19	7,6	2,23	157	32	64	7	27	5,1	5,6
Nov	23	7,7	3,71	157	34	48	7	29	4,4	6,5
Nov	25	7,7	2,26	156	36	56	7	29	4,4	6,5
Nov	30	7,8	1,82	187	46	62	10	31	6,1	8,9
Nov	32	7,8	3,98	213	46	82	11	33	7,5	10,8
Nov	34	7,9	4,06	444	90	148	24	67	5,2	22,3
Nov	37	8,0	1,41	404	92	140	23	59	5,1	14,9
Nov	41	8,0	9,03	437	90	152	27	65	4,4	20,9
Nov	43	7,8	32,34	284	64	90	18	33	10,6	16,2
Nov	45	7,9	19,01	272	62	92	20	31	11,2	16,4
Nov	47	7,9	66,46	306	70	100	21	33	7,1	16,0
Nov	50	8,0	60,25	324	76	100	19	39	5,7	17,9
Nov	56	8,0	36,83	254	74	100	20	21	5,1	17,1
Mai	0	7,2	4,56	56	14	16	3	9	0,1	0,1
Mai	9	7,1	4,06	49	10	14	3	9	0,16	2,67
Mai	11	7,2	2,50	72	12	16	4	13	0,05	1,63
Mai	12	7,2	3,08	78	14	18	4	15	0,17	2,12
Mai	13	7,1	1,38	88	12	20	4	15	0,18	2,33
Mai	14	7,2	2,19	80	14	18	3	15	0,16	2,46
Mai	17	7,4	4,23	120	18	28	6	21	0,19	2,37
Mai	19	7,4	2,80	97	16	24	5	17	0,24	3,84
Mai	23	7,5	1,33	98	16	24	5	17	0,18	3,14
Mai	25	7,5	2,05	104	18	26	4	17	0,22	3,17
Mai	30	7,6	3,66	118	20	28	5	19	0,19	3,56
Mai	32	7,6	7,48	132	22	32	6	23	0,23	4,28
Mai	34	7,8	2,94	316	46	70	14	57	0,23	4,85
Mai	37	7,8	3,92	262	40	58	9	47	0,40	11,49
Mai	41	7,8	3,90	287	42	64	12	51	0,32	9,19
Mai	43	7,8	2,84	327	44	68	14	59	0,38	10,30
Mai	45	7,8	6,37	324	44	68	15	59	0,45	10,95
Mai	50	7,8	233,99	312	46	70	10	55	0,45	10,71
Mai	56	8,0	32,02	220	62	82	15	17	0,60	11,42

Novembre : 10 et 18 novembre 2000

Mai : 15 mai 2001



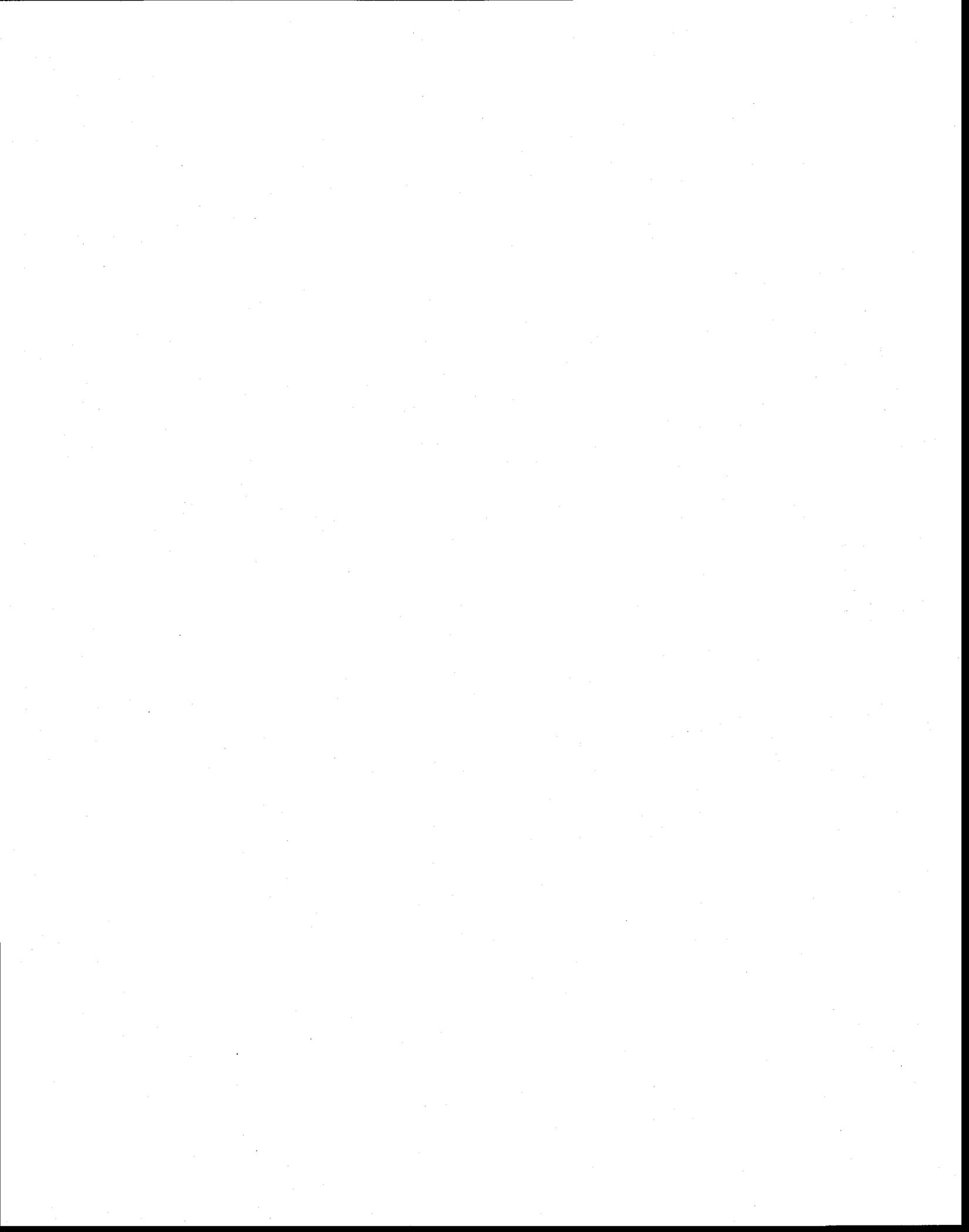
Annexe 21
Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysés par ICP-AES,
novembre 2000



Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysés par ICP-AES, novembre 2000

Éléments	Distance de l'amont		Al ₂ O ₃	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
	km	%										
Limite de détection		8,67 x10⁻⁶	3,54 x10⁻⁶	1,38 x10⁻⁶	1,53 x10⁻⁶	6,3 x10⁻⁷	2,14 x10⁻⁵	1,26 x10⁻⁷	3,49 x10⁻⁰⁷	6,23x10⁻⁰⁸	5,86x10⁻⁰⁵	
MES S1	0	0,01	0,29	0,09	0,10	0,00	n.d	0,07	0,01	0,06	n.d	
MES S2	9	8,46	2,05	8,37	9,29	0,48	1,91	0,95	0,58	1,49	0,37	
MES S3	11	3,95	2,94	17,30	19,21	0,13	0,48	0,80	0,75	0,68	0,60	
MES S4	12	7,03	2,67	11,47	12,73	0,39	1,29	1,11	0,49	1,00	0,45	
MES S6	14	8,71	2,52	9,33	10,35	0,40	2,06	0,99	0,39	1,78	0,46	
MES S7	17	5,23	2,86	16,88	18,73	0,30	0,95	0,75	0,86	0,73	0,68	
MES S8	19	5,04	3,41	17,63	19,57	0,21	0,76	0,98	0,75	0,48	0,66	
MES S9	23	4,56	2,81	16,08	17,85	0,19	0,67	0,82	0,90	0,34	0,61	
MES S10	25	4,16	3,27	14,39	15,98	0,17	0,61	0,91	0,72	0,38	0,57	
MES S11	30	3,83	4,44	14,78	16,41	0,14	0,55	1,05	0,59	0,53	0,57	
MES S12	32	7,04	5,55	13,68	15,18	0,31	1,06	1,27	0,34	0,55	0,50	
MES S13	34	5,09	5,88	20,54	22,80	0,20	0,74	1,02	0,74	0,55	0,62	
MES S14	37	7,90	12,76	14,98	16,62	0,33	1,05	1,50	1,00	1,38	n.d	
MES S15	41	8,90	4,06	11,42	12,68	0,45	1,79	1,59	0,71	1,35	0,46	
MES S16	43	14,02	2,00	6,84	7,59	0,55	2,76	2,49	0,16	1,09	0,35	
MES S17	45	14,83	2,48	6,73	7,47	0,60	2,91	2,65	0,18	1,22	0,35	
MES S18	47	14,90	2,03	6,76	7,50	0,56	3,01	2,69	0,18	1,21	0,36	
MES S19	50	23,05	3,17	10,61	11,78	0,87	4,60	4,21	0,28	1,87	0,57	
MES S20	56	13,86	3,34	5,53	6,14	0,65	2,91	2,78	0,19	1,72	0,24	

Note : Les résultats de l'échantillon MES S5 ne sont pas présenté en raison d'une contamination de l'échantillon

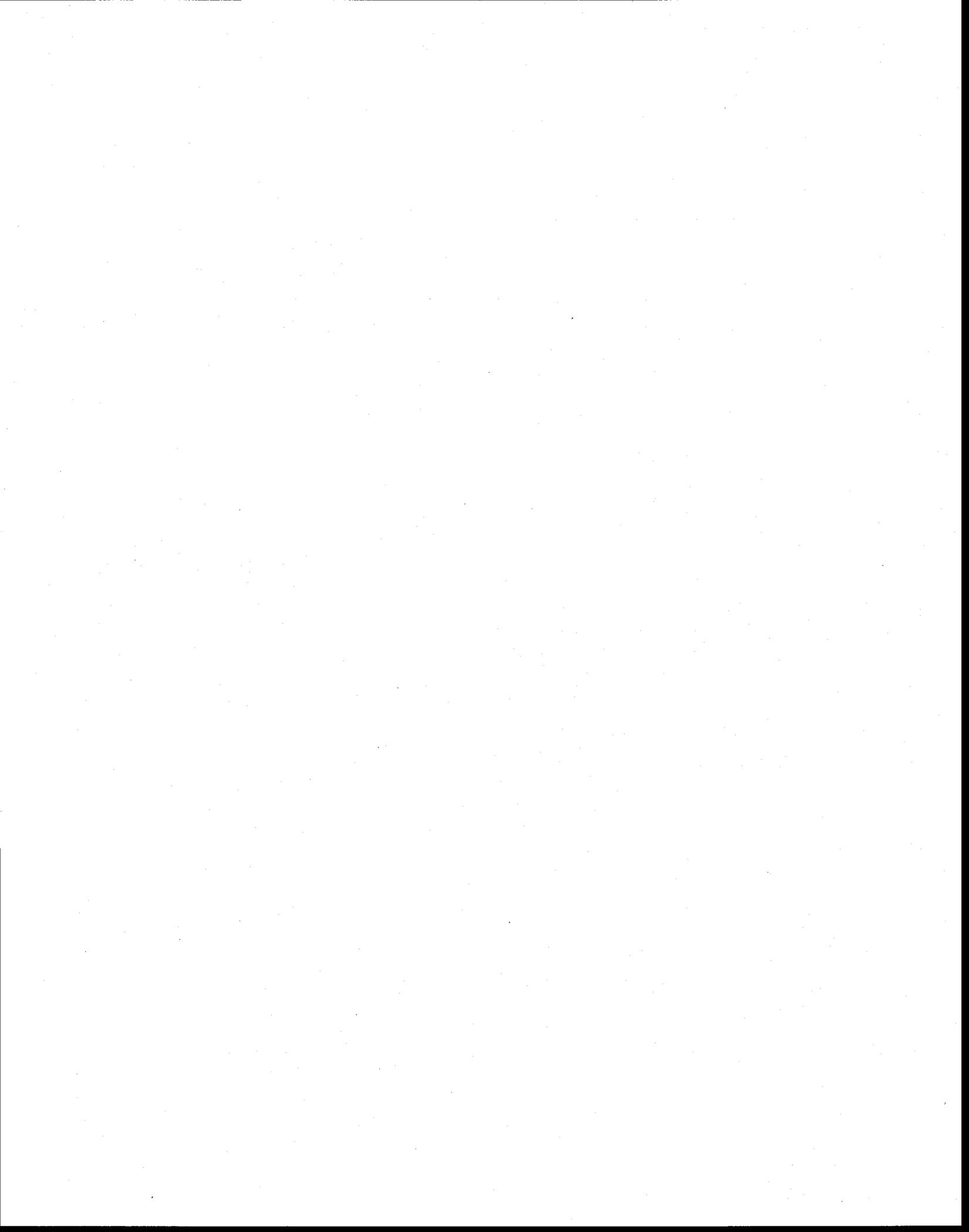


Annexe 22
Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysés par ICP-AES, mai 2001



Concentrations en éléments majeurs dans la MES analysés par ICP-AES, mai 2001

Éléments	Distance de l'amont		Al ₂ O ₃	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
	km	%										
Limite de détection		3,00 x10⁻⁵	3,00 x10⁻⁵	3,60 x10⁻⁵	4,00 x10⁻⁵	1,00 x10⁻⁶	1,00 x10⁻⁵	1,00 x10⁻⁵	1,00 x10⁻⁵	9,99 x10⁻⁷	5,00x10⁻⁶	5,00x10⁻⁵
MES S2	0	7,64	6,00	8,37	9,29	0,39	1,11	0,79	0,60	0,90	0,67	0,67
MES S1	9	9,86	4,38	10,49	11,65	0,39	1,19	0,92	0,42	0,81	0,67	0,67
MES S3	11	8,87	3,95	10,56	11,72	0,35	1,09	0,87	0,53	0,95	0,70	0,70
MES S4	12	8,31	3,30	9,93	11,02	0,33	1,13	0,83	0,38	0,76	0,63	0,63
MES S5	13	9,10	2,17	10,57	11,73	0,35	1,62	0,79	0,48	1,06	0,78	0,78
MES S6	14	11,55	8,41	12,16	13,50	0,48	1,45	1,04	0,45	0,99	0,81	0,81
MES S7	17	6,43	2,55	11,20	12,43	0,31	1,06	0,76	0,52	0,69	0,54	0,54
MES S8	19	9,83	8,00	11,97	13,29	0,48	1,21	1,01	0,41	1,05	0,71	0,71
MES S9	23	9,76	7,77	11,17	12,40	0,45	1,31	1,14	0,49	1,14	0,81	0,81
MES S10	25	6,97	6,84	7,45	8,27	0,43	1,15	0,96	0,34	0,99	0,57	0,57
MES S11	30	10,31	5,02	9,22	10,24	0,52	1,74	1,31	0,29	1,45	0,63	0,63
MES S12	32	11,27	3,01	7,68	8,52	0,62	2,28	1,52	0,40	1,77	0,52	0,52
MES S13	34	7,83	4,34	17,74	19,69	0,37	1,60	1,36	0,77	1,07	0,66	0,66
MES S14	37	6,50	2,49	10,18	11,30	0,36	1,35	0,91	0,50	0,83	0,44	0,44
MES S15	41	8,91	5,28	12,37	13,73	0,41	1,64	1,61	0,91	1,28	0,59	0,59
MES S16	43	12,69	5,00	12,59	13,97	0,61	2,39	2,26	0,84	1,42	0,71	0,71
MES S17	45	12,82	3,97	11,51	12,78	0,53	2,35	2,07	0,61	1,76	0,59	0,59
MES S18	47	12,65	3,86	5,43	6,03	0,64	2,64	2,40	0,13	2,09	0,34	0,34
MES S19	50	9,70	3,99	3,76	4,17	0,30	2,10	1,23	0,10	1,79	0,20	0,20
MES S20	56	7,64	6,00	8,37	9,29	0,39	1,11	0,79	0,60	0,90	0,67	0,67



Annexe 23

Données granulométrique des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles

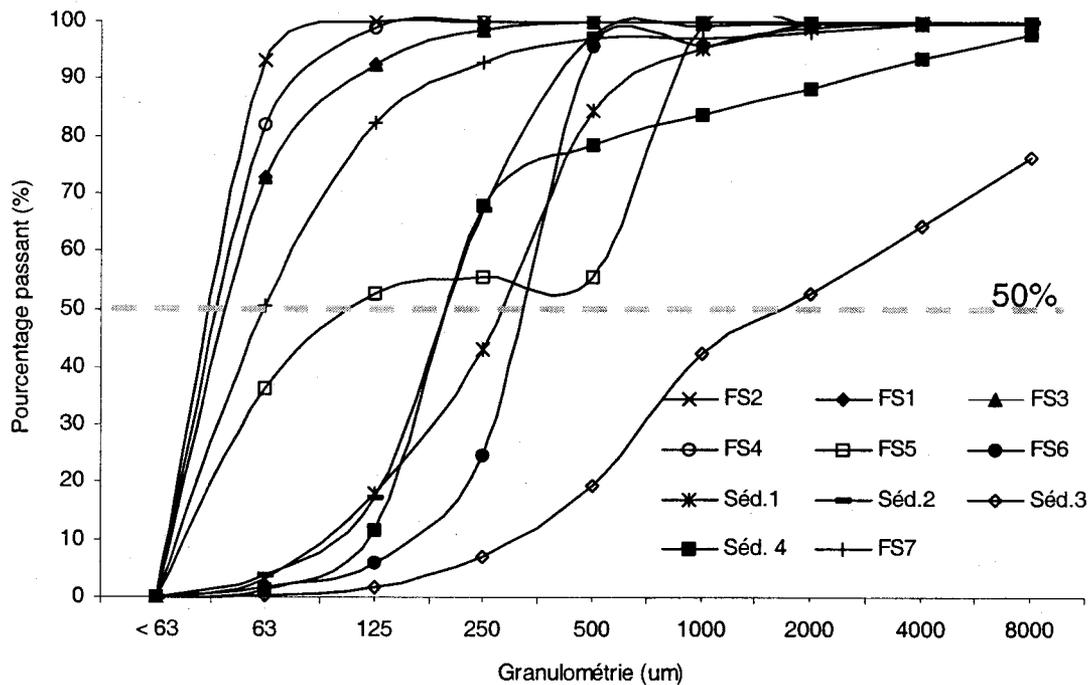
Analyse granulométrique P₅₀ des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles



Données granulométrique des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles

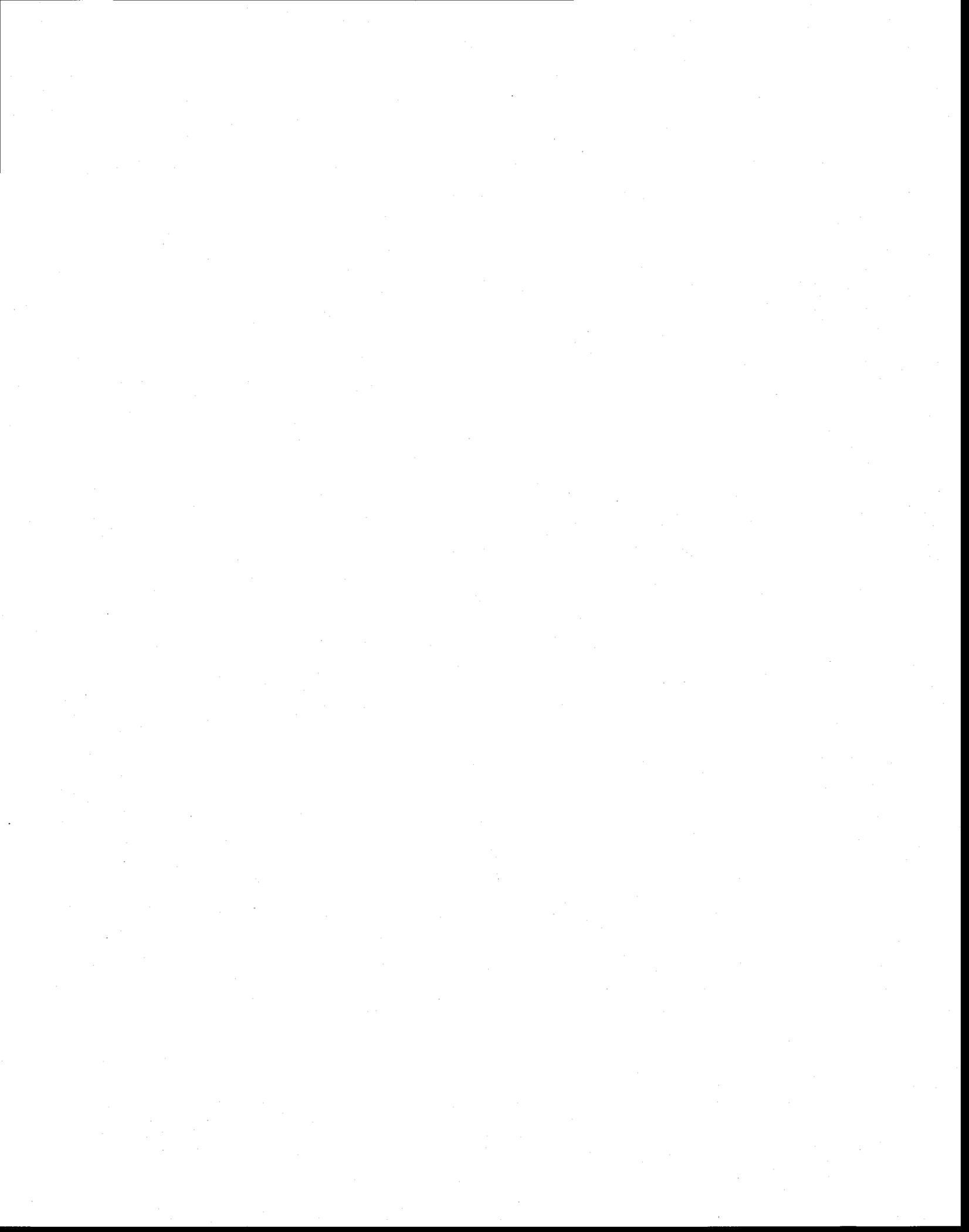
Échantillon		4mm	2mm	< 2mm	Prise 2mm	1mm	0.5mm	0.25mm	0.125mm	0.063mm	<0.063mm
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
Sol 1	FS 1	0.00	0.01	582.45	46.23	0.01	0.05	0.51	2.71	8.96	32.90
Sol 2	FS 2	0.00	0.36	1584.39	51.60	0.00	0.00	0.02	0.02	3.15	43.75
Sol 3	FS 3	2.81	7.73	3096.60	152.17	3.60	49.38	72.69	23.06	2.62	0.41
Sol 4	FS 4	0.00	0.00	946.00	47.58	0.00	0.00	0.00	0.35	7.92	37.82
Sol 5	FS 5	1.26	0.00	836.81	54.00	0.00	41.14	0.01	2.61	15.22	33.72
Sol 6	FS 6	1.14	5.00	2165.20	143.68	3.84	0.00	72.42	19.36	4.26	1.78
Sol 7	FS 7	0.10	18.56	1290.88	84.58	0.64	0.00	3.34	8.21	24.42	39.04
Séd. S2	Séd.1	9.03	29.69	3758.41	95.73	3.42	10.39	39.81	24.32	14.31	2.95
Séd. S6	Séd.2	2.80	4.48	1733.79	86.36	0.19	1.18	26.53	42.82	11.51	3.43
Séd. S12	Séd.3	413.97	410.54	1829.43	91.90	17.89	39.62	21.86	8.97	2.46	0.78
Séd. S20	Séd.4	98.67	124.92	2051.08	102.56	5.29	6.09	12.36	64.61	11.87	1.73

Analyse granulométrique P₅₀ des échantillons de formations superficielles du bassin versant et de sédiments de la rivière Saint-Charles

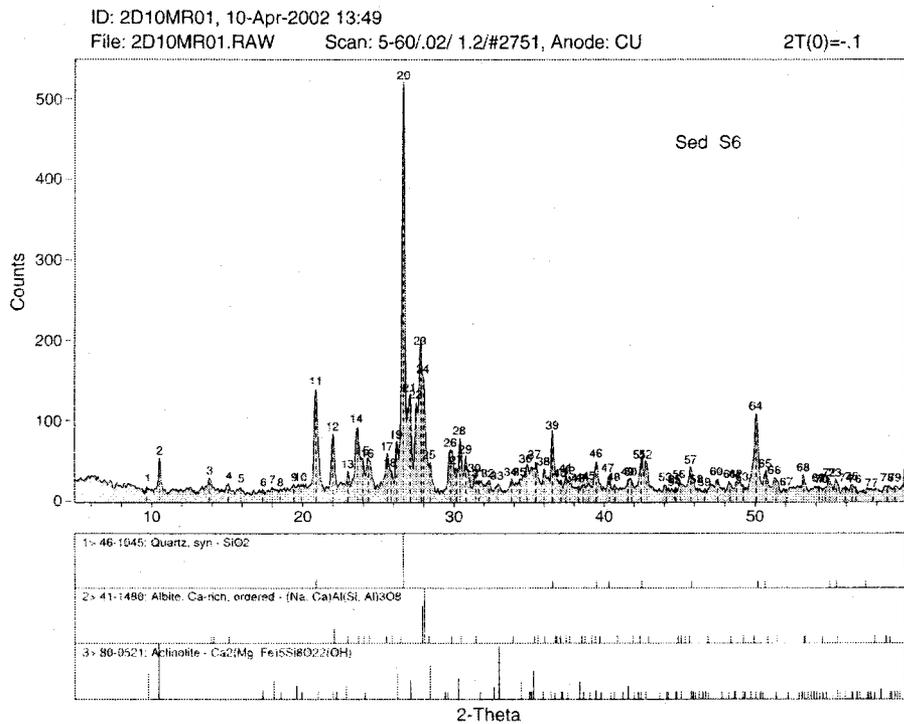
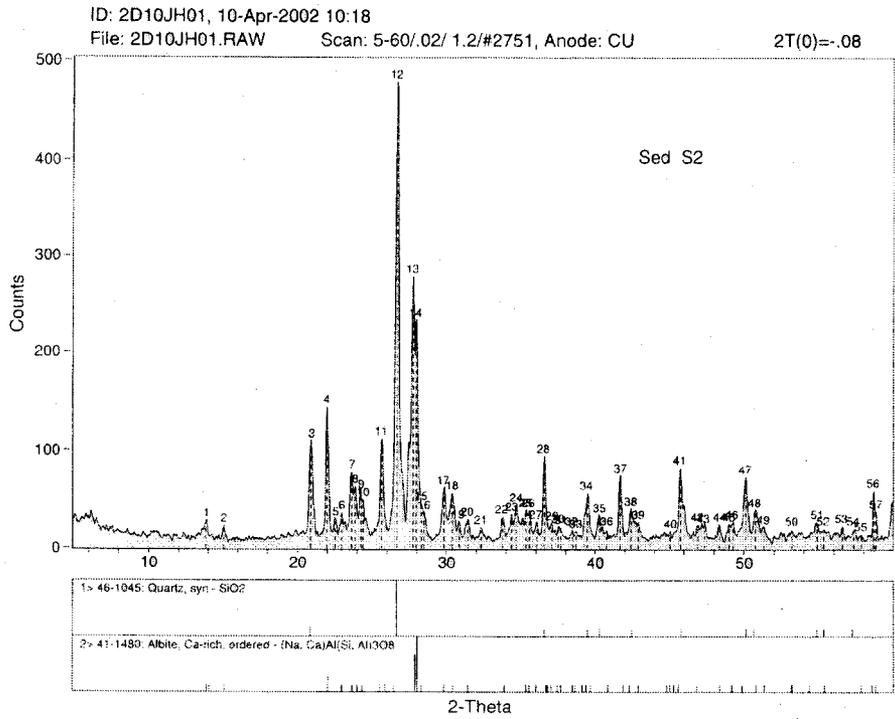




Annexe 24
Diffraction-X sur certains échantillons de sédiment et de formation
superficielle



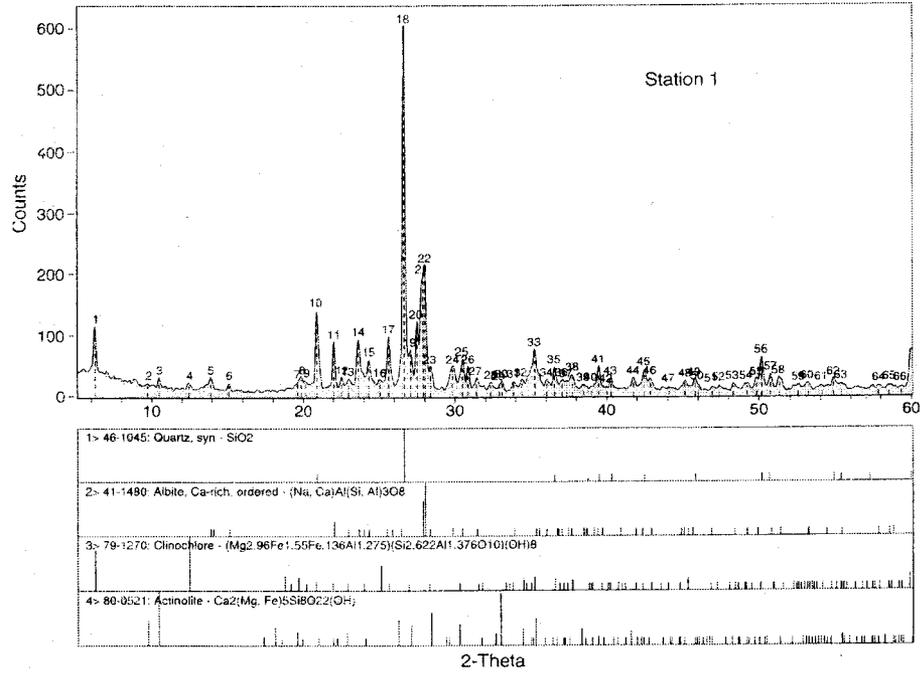
Diffraction-X sur certains échantillons de sédiment et de formation superficielle



ID: 2D10OD01, 10-Apr-2002 15:07

File: 2D10OD01.RAW Scan: 5-60/02/ 1.2/#2751, Anode: CU

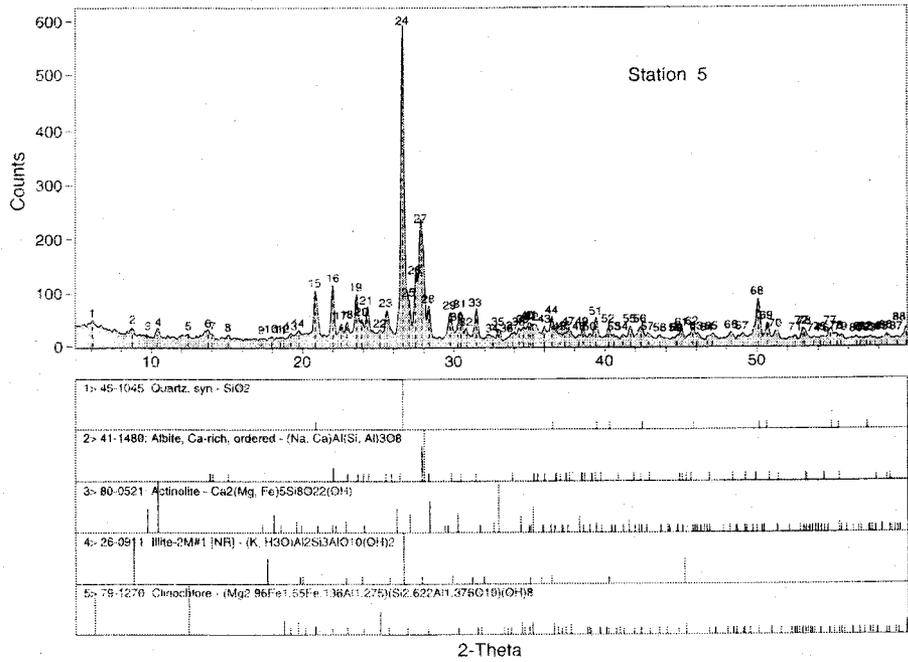
2T(θ)= .08



ID: 2D111L01, 11-Apr-2002 09:31

File: 2D111L01.RAW Scan: 5-60/02/ 1.2/#2751, Anode: CU

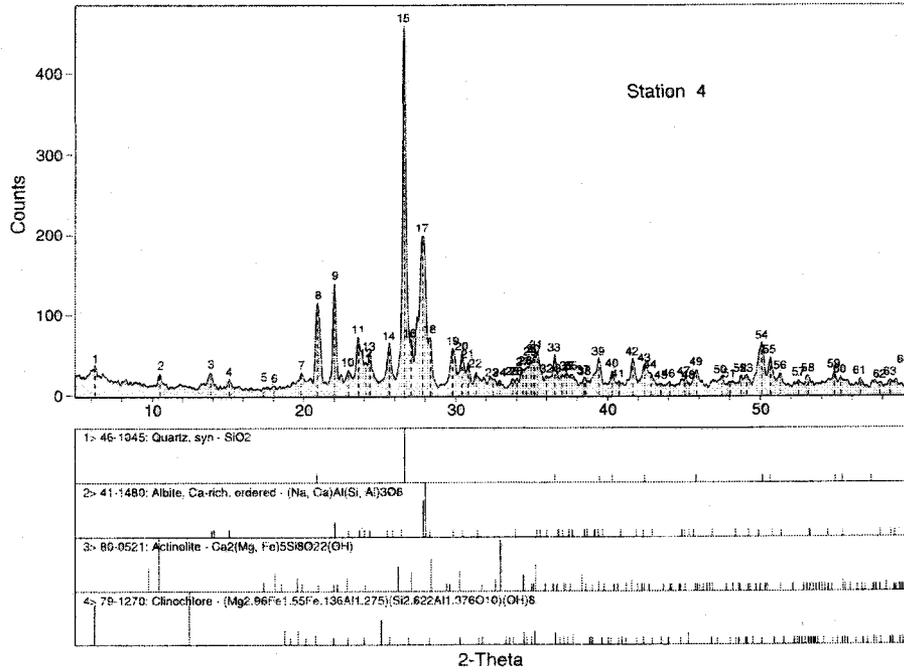
2T(θ)= -.04



ID: 2D11HH01, 11-Apr-2002 08:19

File: 2D11HH01.RAW Scan: 5-60/02/ 1.2/#2751, Anode: CU

2T(0)=-.06





Annexe 25

**Concentrations des éléments majeurs dissous dans l'eau
analysés par ICP-AES, novembre 2000**

**Concentrations des éléments majeurs dissous dans l'eau
analysés par ICP-AES, mai 2001**



**Concentrations des éléments majeurs dissous dans l'eau
analysés par ICP-AES, novembre 2000**

Éléments	Ca	K	Mg	Na
	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Limite de détection	25.32	178.04	0.76	46.24
Eau S1	4488.00	390.00	940.14	3455.00
Eau S2	4630.00	610.00	1175.62	5199.00
Eau S3	6050.00	560.00	1550.58	8413.00
Eau S4	6373.00	650.00	1720.38	9302.00
Eau S5	6947.00	730.00	1846.54	10416.00
Eau S6	7831.00	770.00	2148.87	11171.00
Eau S7	7020.00	730.00	1506.09	7979.00
Eau S8	9484.00	840.00	2083.46	11564.00
Eau S9	10299.00	900.00	2238.54	12966.00
Eau S10	9675.00	830.00	2052.16	11491.00
Eau S11	13201.00	970.00	2614.63	13856.00
Eau S12	14900.00	1530.00	2958.21	17432.00
Eau S13	34449.00	1700.00	5988.48	34685.00
Eau S14	28866.00	1400.00	5096.36	29195.00
Eau S15	30989.00	1510.00	5434.88	30983.00
Eau S16	30443.00	3010.00	5337.14	21015.00
Eau S17	31493.00	3140.00	5504.30	21435.00
Eau S18	26187.00	2340.00	4406.80	17418.00
Eau S19	34966.00	2540.00	5133.58	26567.00
Eau S20	29594.00	1600.00	8492.28	12204.00

**Concentrations des éléments majeurs dissous dans l'eau
analysés par ICP-AES, mai 2001**

Éléments	Ca	K	Mg	Na
	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Limite de détection	68.53	5.47	16.09	71.26
Eau S1	4922.40	494.35	905.72	4064.50
Eau S2	3362.30	678.34	21.96	3770.00
Eau S3	4653.90	496.44	935.16	7378.20
Eau S4	5060.60	552.65	1070.50	7824.10
Eau S5	5098.70	549.27	1041.70	7944.00
Eau S6	5394.80	584.72	1076.10	8329.50
Eau S7	7964.70	772.95	1360.90	11276.00
Eau S8	6728.30	631.81	1188.60	9553.70
Eau S9	7131.50	672.38	1206.30	10127.00
Eau S10	7678.50	660.55	1240.60	9826.40
Eau S11	9381.10	753.03	1412.00	11415.00
Eau S12	10215.00	825.91	1605.10	12933.00
Eau S13	22781.00	1286.00	3102.10	31676.00
Eau S14	18090.00	1075.50	2594.10	25542.00
Eau S15	20639.00	1197.80	2883.30	28924.00
Eau S16	22044.00	1307.20	2997.30	32981.00
Eau S17	21804.00	1284.60	3037.50	33056.00
Eau S19	22247.00	1317.90	3007.90	29988.00
Eau S20	25234.00	1483.40	5902.80	10894.00

