

Université de Montréal

**Connectivité hydrologique et signature géochimique
à l'échelle événementielle dans un bassin versant forestier**

Par

Caroline L'Heureux

Département de géographie

Faculté des Arts et Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade

de Maître ès sciences (M.Sc.)

en géographie

Septembre, 2011

© Caroline L'Heureux, 2011

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :
Connectivité hydrologique et signature géochimique à l'échelle événementielle dans un
bassin versant forestier

Présenté par :
Caroline L'Heureux

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jeffrey Cardille
François Courchesne
André Roy
Marc Amyot

RÉSUMÉ

Dans un bassin versant, la connectivité hydrologique constitue un état hydrologique qui lie le versant à la zone riveraine. Ses impacts sur la production du débit et le transfert des éléments dissous vers le cours d'eau sont présumés substantiels. La mesure de la connectivité est difficile à réaliser et peut être explorée l'aide de méthodes hydrologiques et hydrogéochimiques où l'utilisation des éléments traces (ET) comme traceurs géochimiques est peu considérée. Dans les sols, les sources en ET et les facteurs responsables de leur mobilisation sont peu connus. L'étude vise à 1) détecter les hydrotopes et les connexions hydrologiques à l'aide d'un réseau de puits qui permet la mesure des fluctuations de la nappe phréatique (NP); 2) identifier la variabilité spatio-temporelle et la signature géochimique des sources potentielles en eau à l'aide des éléments majeurs et traces et 3) examiner la contribution spatio-temporelle respective des sources en eau du bassin lors d'un événement de précipitation. L'étude s'effectue dans un bassin versant forestier du Bouclier canadien (l'Hermine) à l'échelle hebdomadaire et pour deux événements de pluie pour les années 2009-2010. Nous démontrons l'existence de quatre hydrotopes représentant un gradient de convergence de l'eau, soulignant la diversité de comportement de NP. L'hydrotope de grande convergence se particularise par un écoulement hypodermique latéral rapide dans les horizons Bhf et LFH. Les connexions hydrologiques se caractérisent par des coefficients de Spearman élevés des relations entre la profondeur de la NP et le débit, dans leur partie en aval. Des raccordements hydrologiques s'enclenchent par le *fill and spill*. Le comportement de NP est influencé par la distance aux limites du bassin, l'horizonation du sol et la topographie souterraine. La signature géochimique de deux zones humides est distinctivement associée à Si biologique et Co-Mn-Rb-Y, alors que celle des horizons LFH est associée à Ba-Cd-Ce-COD-Fe-Pb-Zn. Dans les sols humides, le facteur explicatif Mn est associé à Ce-Co-Rb-Y tandis que Fe et COD sont surtout associés à Cr-Cu-Ni-Zn. En somme, trois sources en eau se connectent à partir du versant vers la zone riveraine durant l'événement pluvial de manière chronologique: 1) les horizons B et la NP de l'ensemble du bassin (Sr); 2) les horizons LFH des zones de convergence (Ba et Zn) et 3) une dépression de sol humide sur le versant nord (Co et Mn).

Mots clés : Connectivité hydrologique, hydrotopes, éléments traces, sols forestiers, écoulement hypodermique, zones humides, oxydoréduction, Bouclier canadien.

ABSTRACT

In watersheds, hydrologic connectivity consists of a hydrologic state that links the upper part of a hillslope to the riparian zone. Its impacts on streamflow generation and transfer of dissolved elements towards the stream are considered substantial. Measurement of hydrologic connectivity is difficult to realize but can be explored by hydrometric and hydrogeochemical methods, in which the use of trace elements (TE) as geochemical tracers has not yet been taken into consideration. Within soils, sources of TE and factors responsible of mobilisation are not well known. This study aims to 1) detect hydrotops and hydrologic connections with a network of wells that allow measurements of water table (WT) fluctuations; 2) identify spatial and temporal variability and the geochemical signature of potential sources of water with major and trace elements and 3) examine the spatial and temporal contribution of sources of water within the watershed during a storm event. The study takes place in a small forested watershed of the Canadian Shield (the Hermine) at a weekly scale and event scale for two storm events for the years 2009 and 2010. We demonstrate the existence of four hydrotops representing a water convergence gradient, highlighting diversity of behavior of the WT. The convergence hydrotop is distinguished by a subsurface flow within LFH and Bhf horizons. Hydrological connections are characterized by high Spearman coefficients of the relationship between WT depth and streamflow in their downstream portion. Some hydrological connections are engaged by the *fill and spill* mechanism. WT behavior is influenced by the distance limits of the basin, soil horization and subsurface topography. The geochemical signature of two wet zones is associated distinctively to biological silica and Co, Mn, Rb and Y, while that of the LFH horizons is associated with Ba, Cd, Ce, COD, Fe, Pb and Zn. In wet zones, the explanatory factor Mn is associated to Ce, Co, Rb and Y, while Fe and COD are mainly associated with Cr, Cu, Ni and Zn. In sum, three water sources connect the hillslope to the riparian zone during the storm event in chronological order: 1) WT and B horizons of the entire basin (Sr), 2) LFH horizons of convergence zones (Ba and Zn) and 3) a depression of wet soil on north hillslope (Co and Mn).

Keywords: Hydrologic connectivity, hydrotops, trace elements, forested soils, subsurface flow, wetlands, redox, Canadian Shield.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XVI
REMERCIEMENTS	XXII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Modèles en hydrologie	3
1.1.1 Du modèle hortonien au modèle ASV	3
1.1.2 Remises en question des postulats mécanistiques.....	3
1.1.3 Vers une distinction des unités hydrologiques	4
1.1.4 Émergence de régularités hydrologiques fondamentales	4
1.2 Types de mesure de l'écoulement de l'eau souterraine	5
1.2.1 Mesures hydrologiques de l'écoulement	5
1.2.1.1 Écoulement hypodermique de la zone saturée.....	5
1.2.1.2 Comportements non linéaires de la zone saturée	6
1.2.2 Mesures géochimiques de l'écoulement	8
1.2.2.1 Modèle de mélange de sources	8
1.2.2.2 Signatures des sources verticales par les éléments	8
1.2.2.3 Signature des éléments et écoulement : Le cas du bassin de l'Hermine (Québec, Canada).....	10
1.3 Connectivité hydrologique	11
1.3.1 Avènement du concept de la connectivité en hydrologie	11
1.3.2 Mesures hydrologiques de la connectivité	11
1.3.3 Mesures hydrogéochimiques de la connectivité : modèle de mélange EMMA	14
1.3.4 Investigation de la connectivité hydrologique : Le cas du bassin versant de l'Hermine.....	16
1.4 Les éléments traces	18
1.4.1 Définition et origine des éléments traces.....	18
1.4.2 Altération des éléments traces selon les conditions pE et pH.....	19

1.4.3 pE dans les sols et les eaux souterraines	21
1.4.3.1 Mesure de pE.....	21
1.4.3.2 pE et matière organique dans les sols	22
1.4.3.3 pE et fixation physico-chimique dans les milieux humides	22
1.4.4 Altération et mobilisation pédogénétique des éléments traces	23
1.4.4.1 pE et éléments traces dans les milieux humides.....	24
1.4.4.2 Carbone organique et éléments traces	24
1.4.5 Transport des éléments traces	25
1.4.6 Perspectives sur l'utilisation des ET	25
1.5 Synthèse des sources en eau et approche méthodologique pour le bassin versant de l'Hermine	26
1.5.1 Sources en eau et écoulement dans le bassin versant de l'Hermine.....	26
1.5.2 Élaboration d'un cadre méthodologique intégré de détection de la connectivité hydrologique	28
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	29
2.1 Objectifs de la recherche.....	29
2.2 Site à l'étude.....	30
2.2.1 Portrait géologique et sédimentologique.....	30
2.2.2 Portrait hydrologique.....	31
2.2.3 Portrait pédologique.....	33
2.2.4 Portrait floristique	34
2.3 Échelle temporelle d'échantillonnage.....	36
2.4 Collecte des données hydrologiques.....	39
2.4.1 Débit et précipitation.....	39
2.4.2 Profondeur de la nappe phréatique	40
2.5 COLLECTE DES DONNÉES HYDROGÉOCHIMIQUES.....	41
2.5.1 Hydrochimie à l'exutoire.....	41
2.5.2 Géochimie des sources potentielles en eau	42
2.5.2.1 Géochimie de la nappe phréatique	43
2.5.2.2 Géochimie de la solution de sol	45
2.5.3 Protocole d'échantillonnage sur le terrain	45
2.6 ANALYSES EN LABORATOIRE	46
2.6.1 Protocole de qualité en laboratoire.....	46
2.6.2 Mesure pH et CE	46
2.6.3 Mesure des éléments dissous.....	46
2.7 Traitement des données.....	47
2.7.1 Traitement cartographique.....	47
2.7.1.1 Choix de l'algorithme d'interpolation : Voisinage naturel simple	47
2.7.1.2 Interprétation de l'interpolation	48
2.7.2 Traitements statistiques univariés.....	49

2.7.2.1 Comparaison des distributions et des variances	49
2.7.2.2 Coefficient de corrélation de Spearman.....	49
2.7.3 Traitements statistiques multivariés	49
2.7.3.1 L'analyse de groupement (AG)	50
2.7.3.2 L'analyse en composante principale (ACP).....	50
2.7.3.3 L'analyse canonique de redondance (ACR)	51
2.7.3.4 Coordonnées principales de matrice de voisinage (CPMV).....	51
2.7.4 Approches pour estimer les variables d'écoulement hypodermique.....	53
2.7.4.1 Calcul des vitesses d'écoulement de l'eau souterraine.....	53
2.7.4.2 Calcul de la conductivité hydraulique à saturation (Ks) pour un podzol typique à l'Hermine	53
2.7.4.3 Calcul du débit de l'écoulement de l'eau souterraine.....	56
2.7.5 Mesures associées à la relation entre la profondeur de la nappe phréatique et le débit (NP/Q).....	56
2.7.5.1 Mesure de l'angle de la relation NP/Q	57
2.7.5.2 Facteurs explicatifs des caractéristiques des relations NP/Q.....	57
2.7.6 Traitement de l'objectif 1	60
2.7.7 Traitement de l'objectif 2	61
2.7.8 Traitement de l'objectif 3	62

CHAPITRE 3 RÉSULTATS..... 63

3.1 Détection des hydrotopes et de la connectivité hydrologique–Objectif 1	63
3.1.1 Spatialisation des moyennes et des écarts-types des profondeurs de la nappe phréatique	63
3.1.2 Spatialisation des minima et maxima des profondeurs de la nappe phréatique	66
3.1.3 Spatialisation de l'analyse de groupement.....	67
3.1.4 Spatialisation des formes et profondeurs des relations NP/Q	69
3.1.4.1 Lien entre la profondeur de plafonnement de NP et les types de relations NP/Q	72
3.1.5 Spatialisation des caractéristiques des relations NP/Q	73
3.1.5.1 Facteurs d'influence sur la profondeur du plafonnement et caractéristiques des relations NP/Q	74
3.1.6 Détection des structures spatiales par l'analyse de coordonnées principales de matrices de voisinage (CPMV).....	78
3.1.6.1 Matrices utilisées.....	79
3.1.6.2 Spatialisation et influence des structures spatiales	80
3.1.7 Amalgame des critères de détection des hydrotopes	83
3.1.7.1 Détection et description des hydrotopes.....	83
3.1.7.2 Spatialisation des hydrotopes	86
3.1.8 Identification des patrons spatiaux de profondeur de nappe phréatique à l'échelle événementielle.....	87
3.1.8.1 Quantification de l'écoulement lors des connexions hydrologiques	92
3.1.8.2 Détermination des types de relations des connexions hydrologiques.....	95
3.1.9 Synthèse des résultats de l'objectif 1	98
3.2 Variabilité spatio-temporelle et signature géochimique des sources potentielles en eau pour l'événement d'automne 2010 - Objectif 2	99
3.2.1 Traitement des données.....	99
3.2.2 Signatures géochimiques des sources potentielles	101
3.2.3 Variabilité spatio-temporelle des sources et mécanismes géochimiques.....	104

3.2.3.1	Analyse en composante principale sur l'ensemble des sources potentielles en eau.....	104
3.2.3.2	Analyse en composante principale des sources situées dans des sols bien drainés et des sols humides.....	106
3.2.4	Facteurs de mobilisation des éléments traces dans les sols humides.....	109
3.2.4.1	Analyse canonique de redondance avec variables explicatives : COD, Fe, Mn et H ⁺	109
3.2.4.2	Analyse en composante principale avec variables inexplorées descriptives : oxygène dissous et température.....	112
3.2.5	Synthèse sur la variabilité spatio-temporelle et de la signature géochimique.....	114
3.3	Contribution des compartiments à la chimie du cours d'eau de l'Hermine lors de l'événement d'automne 2010 – Objectif 3.....	115
3.3.1	Description et évolution de la chimie du cours d'eau.....	115
3.3.2	Contribution des compartiments à la chimie du cours d'eau.....	119
3.3.2.1	Graphique de mélange des sources potentielles en eau.....	119
3.3.2.2	Contribution des horizons sur le plan horizontal à la chimie du cours d'eau.....	122
3.3.2.3	Synthèse de la contribution des sources associées aux composantes principales 1 et 2.....	124
3.3.2.4	Synthèse de la contribution des sources associées aux composantes principales 3 et 4.....	124
	CHAPITRE 4 DISCUSSION.....	127
4.1	Les hydrotopes dans le bassin de l'Hermine.....	127
4.1.1	Efficacité de la méthodologie pour détecter les hydrotopes.....	127
4.1.2	Interprétation du gradient de convergence.....	128
4.1.3	Remise en question du couple hydrotopique zone riveraine/versant.....	128
4.1.4	Réfutation de l'hypothèse de l'état stable de la nappe phréatique.....	130
4.1.4.1	Influence significative de la distance aux frontières du bassin.....	131
4.1.4.2	Influence de l'interaction entre la topographie souterraine et l'épaisseur de sol.....	131
4.1.5	Influence variable du paysage sur l'hydrologie.....	132
4.2	La connectivité hydrologique dans le bassin de l'Hermine.....	133
4.2.1	Efficacité de la méthodologie pour détecter la connectivité hydrologique.....	133
4.2.2	Correspondance entre la connectivité hydrologique et les hydrotopes de forte et moyenne convergence.....	134
4.2.3	Comment détecter les chemins préférentiels de la connectivité hydrologique ?.....	135
4.2.4	Influence des zones de connexions hydrologique sur le débit à l'exutoire.....	136
4.2.5	Interaction entre les hydrotopes et la connectivité hydrologique.....	137
4.2.6	Rôle du <i>fill and spill</i> sur l'enclenchement de la connectivité hydrologique.....	138
4.3	Écoulement hypodermique rapide dans le bassin de l'Hermine.....	139
4.3.1	Existence de la transmissivité rétroactive positive de la nappe phréatique dans le bassin de l'Hermine.....	139
4.3.2	Influence de la matière organique sur la conductivité hydraulique.....	139
4.3.3	Influence des pourcentages des fragments grossiers sur la conductivité hydraulique.....	140
4.3.4	Rôle des horizons de forte densité sur l'écoulement de l'eau.....	141
4.4	Synthèse de l'objectif 1.....	143

4.5 Impact de Mn, Fe et COD sur la mobilisation des éléments traces dans les sols humides	144
4.5.1 Présence d'accepteurs d'électrons alternatifs dans les sols humides	144
4.5.2 Rôle de Mn et Fe sur la solubilité des éléments traces	145
4.5.3 Rôle du COD sur la solubilité des éléments traces.....	147
4.5.4 Causes de la dissemblance géochimique entre les deux zones humides	149
4.5.5 Influences hydrologique et biologique sur les concentrations en Si dans ZHA	149
4.5.6 La variabilité spatiale de la géochimie des sols humides.....	151
4.6 Influence des sols humides lors d'un événement pluvial	151
4.6.1 Influence des sols humides sur la production du débit	151
4.6.2 Influence des zones humides sur la composition chimique du cours d'eau.....	153
4.7 Impact de l'écoulement hypodermique sur l'exportation du COD et des éléments traces lors d'un événement pluvial	155
4.7.1 Distribution spatiale des éléments dans les diverses sources en eau	155
4.7.2 Relation entre le débit, le COD et les éléments traces dans le cours d'eau	156
4.7.3 Distribution spatiale des horizons LFH saturés par la nappe phréatique	157
4.8 Synthèse du modèle d'écoulement à l'Hermine lors d'un événement	160
4.8.1 La contribution des sols humides d'une dépression sur le versant	160
4.8.2 La contribution des horizons organiques.....	161
4.8.3 La contribution des horizons B et de la nappe phréatique.....	161
4.9 Utilisation des éléments traces et recommandations.....	162
4.9.1 Recommandation pour l'échantillonnage de terrain.....	162
4.9.2 Approche exploratoire du traitement des valeurs.....	163
4.9.3 Potentiel de traçage hydrologique des éléments traces à l'Hermine.....	164
CHAPITRE 5 CONCLUSION	166
BIBLIOGRAPHIE.....	170

TABLE DES FIGURES

- Figure 1.1: a) Illustration de l'hypothèse *fill and spill*. Source: Tromp-van Meerveld et McDonnell (2006b), figure 10. b) coupe transversale d'un versant montrant la topographie de surface (ligne pleine), la topographie sur socle (ligne hachurée), la profondeur de la NP avant événement (ligne avec carré) et la profondeur de la NP durant l'événement en 2000. Source : Buttle *et al.* (2004), figure 5, p.169. 7
- Figure 1.2 : Diagramme de mélange en espace-U (système de référence dérivé des analyses de valeurs propres et défini par les axes principaux orthogonaux, soit U1 et U2) pour tous les échantillons du cours d'eau (n = 1384). Les échantillons du cours d'eau à l'exutoire sont illustrés par des points gris de petite taille alors que les lignes pointillées noires forment le triangle de mélange. Les barres d'erreur représentent les intervalles interquartiles seulement pour les sources (*End-members*) qui forment les extrémités du triangle de mélange. L'explication des acronymes des sources se trouve à droite du diagramme. Source : Ali *et al.*, 2010b, figure 6.A, p.129.16
- Figure 1.3: Représentation schématique de la moyenne de la profondeur de la nappe phréatique associée à trois scénarios hydrologiques contrastés. Plus le cercle plein est grand, plus la nappe phréatique est proche de la surface du sol. Source : Ali *et al.*, 2010b, fig.9, p.132.17
- Figure 1.4: Carte de la zone d'interpolation des valeurs de profondeurs de la nappe phréatique dans le bassin de l'Hermine au temps 4 (24/10/09, 14h30) de l'événement de précipitation 2009. L'échelle représente les profondeurs dans le sol. Tous les puits à sec obtiennent une valeur de 100 cm et donc sont représentés par la couleur rouge sur la carte. Les chiffres sont ajoutés à la figure afin de faciliter la visualisation des zones de connexion et représentent : 1) le bas de versant sud; 2) le haut de versant sud; 3) le déversement de la zone humide nord dans la rigole nord; 4) la rigole amont et 5) le haut de versant nord. Source : Toquet, 2010, fig.14, carte n°9, p.43.18
- Figure 1.5 : Diagramme de Pourbaix délimitant les domaines d'intensité d'oxydoréduction représentatifs dans les eaux souterraines et le système sédiments-eau. Source : Sigg *et al.*, 2006, p.292, figure 8.6.20
- Figure 1.6 : Séquence de réduction dans la solution du sol à pH 7. « Les potentiels théoriques sont calculés en considérant que les activités des espèces oxydées et réduites sont égales, la pression de H₂ est fixée à 10⁻³ atmosphère. Les échelles de temps et de concentration sont arbitraires, variables selon les milieux et la température. » Source : Girard *et al.*, 2005, p.371, figure 16.1.22
- Figure 1.7 : Sources contributrices au cours d'eau sur les plans vertical (flèches) et horizontal (cercles) du bassin versant de l'Hermine et leurs mécanismes respectifs d'écoulement identifiés dans des publications scientifiques.27
- Figure 2.1 : Localisation du bassin versant de l'Hermine. Source : MRNF, 2006.31
- Figure 2.2 : Spatialisation des trois différents types d'éléments hydrologiques dans le bassin versant de l'Hermine, soit les zones humides incluant la zone humide amont (ZHA) et la zone humide nord (ZHN), les rigoles intermittentes comprenant la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA), ainsi que

- les zones d'écoulement souterrain préférentiel potentiel incluant le haut de versant sud (HVS), le bas de versant sud (BVS), le haut de versant nord (HVN) et la zone riveraine.32
- Figure 2.3 : a) Carte originale de Savoie (1988) du bassin versant de l'Hermine incluant la localisation des profils décrits et la délimitation des unités pédogéomorphologiques. Les triangles noirs représentent les profils de sol complètement échantillonnés et les triangles vides représentent les profils de sol partiellement échantillonnés. b) Carte modifiée du bassin versant de l'Hermine montrant clairement la délimitation des quatre unités pédogéomorphologiques. Source : Savoie, 1988, p.78.34
- Figure 2.4 : a) Vue de la partie la plus humide de ZHA à partir du puits H87 (bas de versant). Le cercle délimite une colonie de sphaignes (*Sphagnum* spp.) alors que le rectangle délimite des fougères. b) Vue du substrat de surface et de la végétation de surface dans la partie la plus humide de ZHA. Le cercle délimite une sphaigne (*Sphagnum* spp.), le carré délimite les gaillets (*Gallium* spp.), le rectangle émoussé délimite une section d'hépatiques (*Hepatica* spp.) et la flèche montre le substrat noir gorgé d'eau. Photos prises par Caroline L'Heureux 2010-09-23.36
- Figure 2.5: Interpolation à l'aide de l'algorithme du voisinage naturel simple, de la profondeur maximale de chaque puits de la zone à l'étude. Chaque puits est représenté par un cercle plein noir et identifié par une lettre et un nombre.41
- Figure 2.6 : Bassin versant de l'Hermine et les instruments utilisés pour récolter l'eau des sources potentielles en eau. Les stations 1, 2 et 3 représentent le bas de versant alors que les stations 7, 8 et 9 représentent le haut de versant.43
- Figure 2.7 : Clichés de la zone humide nord et des puits d'échantillonnage. a) Vue sur le puits d'échantillonnage D3 dédié aux mesures d'oxygène dissous et de température. Le substrat est humide et sans végétation. b) Vue des puits d'échantillonnage de l'amont (sec) vers l'aval (humide). Photo prise par Caroline L'Heureux 2010-09-23.44
- Figure 2.8 : Distribution verticale des variables utilisées dans les fonctions de pédotransfert afin d'estimer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) pour un profil de sol podzolique typique à l'Hermine. Les valeurs absentes entre les 0 et 10 cm dans le sol, soit pour les horizons LFH, n'ont pas été mesurées pour les horizons organiques. Les variables sont extraites de Turmel *et al.* (2005) et de Savoie (1988).55
- Figure 2.9 : Valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_s) (cm/h) selon trois auteurs. Ces valeurs sont utilisées dans le calcul de l'estimation de la valeur de K_s pour un profil typique de podzol à l'Hermine.55
- Figure 2.10 : Angle des deux segments qui forment la relation entre la profondeur de NP du puits W1 et le débit à l'exutoire du cours d'eau (NP/Q). Les lignes droites noires représentent les segments de la relation, l'arc noir représente l'angle et la valeur de l'angle est située dans le rectangle noir.57

- Figure 2.11 : Épaisseur moyennes des horizons pour les quatre profils de sol podzoliques des unités pédogéomorphologiques (Savoie, 1988). Les unités 1 à 4 sont spatialisées à la figure 2.3. La zone hachurée représente l'horizon compact discontinu.59
- Figure 3.1 : Spatialisation a) des moyennes et b) des écarts-types de la variable %_{sat} estimés à partir de mesures de profondeur de NP pour 94 puits à une échelle hebdomadaire pour l'automne 2009 et le printemps, l'été et l'automne 2010 (n = 30). Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.....64
- Figure 3.2: Spatialisation de a) les minima et b) les maxima de toutes les mesures de profondeur de NP pour les 94 puits. Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.....66
- Figure 3.3: a) Dendrogramme de l'analyse de groupement (AG) selon la méthode Ward sur les fluctuations de profondeur de nappe phréatique pour 2009 et 2010 (n = 50). La ligne horizontale noire indique le niveau de répartition en groupes choisi. Chaque groupement possède une couleur qui est reprise lors de leur spatialisation. b) Spatialisation des quatre groupements du dendrogramme. Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.....68
- Figure 3.4: Typologie des formes de relation NP/Q basée sur la profondeur de plafonnement de NP par rapport à la surface du sol: a) autolimitation au-dessus de la surface; b) autolimitation au niveau de la surface ; c) autolimitation entre 10 et 30 cm sous la surface du sol; d) autolimitation entre 30 et 40 cm sous la surface du sol; e) autolimitation entre 40 et 70 cm sous la surface du sol; f) relation linéaires. Les formes associées aux lettres a) à f) représentent respectivement les puits, F51, L185, E50, J145, H90 et I109. La ligne noire horizontale correspond à la surface du sol. n = nombre de puits dans la classe. Chaque type de relation est associé à une couleur reprise à la figure 3.5.70
- Figure 3.5: Spatialisation des formes de relation entre la profondeur de la nappe phréatique et le débit pour chaque puits selon la typologie élaborée à la figure 3.4. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.71
- Figure 3.6: Distribution spatiale a) du coefficient de Spearman et b) de l'angle des relations NP/Q pour un réseau de 92 puits. Deux puits sont exclus de cette analyse en raison de leur variation de niveau de NP nulle ou presque nulle. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.....74
- Figure 3.7 : Comparaison entre les quatre profils podzoliques des unités pédogéomorphologiques de Savoie (1988) (colonne 1 à 4), et la fréquence (%) des profondeurs maximales (colonne 5) et minimales (colonne 6) des plafonnements de NP des relations NP/Q (figure 3.5). Les colonnes 5 et 6 incluent également la hauteur maximale atteinte par la NP des relations linéaires. La zone hachurée à l'endroit des profils de sol représente l'horizon compact discontinu.76
- Figure 3.8 : Comparaison entre le profil podzolique de l'unité pédomorphologique no.4 (Savoie, 1988) (colonne 1), et les valeurs de moyenne (colonnes bleues 2-4) et de l'écart type (colonnes rouges 3-5) des coefficients de Spearman (colonnes 2-3) et des degrés d'angle (colonnes 4-5) des relations NP/Q, pour respectivement a) les profondeurs maximales et b) minimales de

plafonnement. La légende de la colonne 1 est disponible à la figure 3.7. La zone hachurée à l'endroit du profil de sol (colonne 1) représente l'horizon compact discontinu.77

Figure 3.9 : Représentation cartographique de l'axe canonique 1 (première colonne de la matrice Z) issu de l'ACR réalisée à l'aide des variables CPMV sélectionnées respectivement pour les matrices : a) Y_c (complète); b) Y_s (sèche); c) Y_H (humide); d) Y_{TH} (très humide). Les carrés pleins correspondent aux valeurs positives (issues de la 1^{ère} colonne de la matrice Z) pour chaque piézomètre qui contribuent à former l'axe canonique 1 de l'ACR alors que les carrés vides représentent les valeurs négatives (issues de la 1^{ère} colonne de la matrice Z) qui contribuent à former ce même axe. Les tailles des carrés sont proportionnelles aux valeurs cartographiées.82

Figure 3.10 : Spatialisation des valeurs des neuf critères pour chaque puits. Les valeurs se rapprochant de 1 correspondent aux zones de convergence alors que les valeurs se rapprochant de 4 correspondent aux zones de divergence. La segmentation en quatre groupes correspondant aux quatre hydrotopes. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.....87

Figure 3.11 : Hydrogramme et hyétogramme des événements de précipitation survenus en a) 2009 et b) 2010. Les échantillonnages de NP sont représentés par les carrés bleus et correspondent aux figures 3.12 et 3.13. L'abscisse est segmenté en heure mais jalonné par des dates.88

Figure 3.12 : Série temporelle des patrons de saturation de la nappe phréatique pour l'événement 2009. CAH signifie conditions antécédentes d'humidité dans le sol. Les différents temps correspondent à ceux de la figure 3.11a.....89

Figure 3.13 : Série temporelle des patrons de saturation de la nappe phréatique de l'événement pluvial 2010. La légende est celle de la figure 3.12. CAH signifie conditions antécédentes d'humidité dans le sol. Les différents temps correspondent à ceux de la figure 3.11b.90

Figure 3.14 : Identification des cinq zones de connexion hydrologique utilisées pour les calculs de la vitesse de l'écoulement et du flux de volume d'eau. Les lignes blanches indiquent la distance parcourue par l'eau et le sens de l'écoulement. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.92

Figure 3.15: Estimation de la conductivité hydraulique à saturation d'un profil podzologique typique de l'Hermine à l'aide des FPT de Vereecken (1990) et de Rawls and Brakensiek (1985) et de trois profils de podzols laurentiens et scandinaves sur till glaciaire (Mehuys et Kimpe, 1976; Nyberg, 1995; Lind et Lundin, 1990). La valeur de LFH est fictive et fixée à 13 % supérieure à celle de Bhf1(section 2.7.4). La zone hachurée représente la position de l'horizon compact. Les valeurs estimées de Ks de cet horizon ne sont pas considérées.....93

Figure 3.16 : Localisation des puits en amont et en aval sur la carte des patrons spatiaux de profondeurs de NP au temps 3 lors de l'événement de pluie de 2010 (figure 3.13 modifiée).....96

Figure 3.17 : Relation entre la profondeur de NP du puits situé en aval de la source potentielle en eau et celle du puits situé à la source. Les couples de puits aval/source sont : a) L185 / F51; b) J127 / J125); c) D32 / W1; d) K169 / K171; e) I109 / H87; f) L189 / L191. Les flèches noires

représentent les points d'inflexion des relations et les lignes noires horizontales indiquent la surface du sol (0 cm) et la profondeur maximale du puits.97

Figure 3.18 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 (a) et 3 et 4 (b) de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de la géochimie des cinq sources potentielles. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points de couleurs représentent les sources potentielles en eau et constituent les objets de la matrice. Les acronymes des sources dans la légende et les figures ainsi que la distribution spatiale des collecteurs se trouvent à la figure 2.6. Les cercles noirs délimitent les groupes d'objets qui représentent un minimum de cinq puits identiques sur six. 105

Figure 3.19 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de la géochimie pour a) les sols bien drainés et b) les sols humides. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points de couleurs représentent les sources potentielles en eau pour différents temps d'échantillonnage et constituent les objets de la matrice. Les acronymes des sources dans la légende et les figures ainsi que la distribution spatiale des collecteurs se trouvent à la figure 2.6. 108

Figure 3.20 : Diagramme de double projection des axes 1 et 2 de l'analyse canonique de redondance (ACR) en cadrage de type II de la géochimie des quatre puits de a) ZHN et b) ZHA. Les flèches noires représentent les éléments dissous soit les variables expliquées de la matrice. Les points de couleurs représentent les quatre puits de chaque sol humide échantillonné à six reprises durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Les flèches bleues représentent les variables explicatives sélectionnées. L'enceinte noire délimite les groupes de puits qui doivent contenir un minimum de 5 puits identiques sur 6. 111

Figure 3.21 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II respectivement pour la géochimie du puits ZHN-D3 et ZHA-K1 incluant les mesures d'oxygène dissous et de température. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points bleus numérotés en noir représentent les différents temps d'échantillonnage durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Pour ZHA-K1, l'élément Cd n'est pas présent en raison de l'absence de variabilité. 113

Figure 3.22 : Chemogrammes des éléments dissous dans le cours d'eau durant l'événement d'automne 2010 réunis en quatre groupes dont le caractère central est : a) la (quasi) concomitance entre pic de concentration et pic de débit; b) l'augmentation substantielle et brusque de concentration au temps 26; c) l'augmentation substantielle et soutenue de concentration au temps 27 et d) la diminution de la concentration concomitante à l'augmentation du débit. Les points de couleurs correspondent aux 29 échantillons analysés et la ligne de la même couleur constitue une interpolation entre les points. Les concentrations en éléments sont multipliées ou divisées par un facteur donné afin d'aérer les graphiques. Dans la légende, certains éléments présentent des unités qui ne sont pas le $\mu\text{g/L}$ 117

Figure 3.23 : Diagramme de double projection des axes a) 1 et 2 et b) 3 et 4 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de l'hydrochimie du ruisseau durant l'événement d'automne 2010. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les

descripteurs de la matrice. Les chiffres et nombres en bleu représentent les moments d'échantillonnage durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Les bulles vertes représentent les moments d'échantillonnages de la nappe phréatique. 118

Figure 3.24 : Graphiques de mélange construits à partir des paires d'éléments a) COD/Si; b) Mn/Sr et c) V/Cr. Les lignes pleines constituent les limites de l'espace de mélange fonctionnel. Les cinq sources potentielles en eau sont : les horizons organiques (LFH), les horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l'horizon C (NP), la zone humide nord (ZHN) et la zone humide amont (ZHA) (**figure 2.6**). La taille des cercles de la chimie du ruisseau représente l'évolution chronologique des 29 moments d'échantillonnage du cours d'eau allant du plus petit cercle, soit le temps 1, au plus grand cercle, soit le temps 29. 121

Figure 3.25 : Patron spatiaux pédohydrologiques représentant les horizons les plus superficiels atteints par la nappe phréatique durant l'événement d'automne 2010. L'interpolation est réalisée avec l'algorithme du voisinage naturel simple. L'analyse en composante principale (ACP) au centre correspond à la figure 3.23a). Les temps indiqués sur les cartes correspondent au temps de l'échantillonnage de la chimie du ruisseau, soit les objets de l'ACP. 123

Figure 3.26 : a) Hydrogrammes de 12 des 20 puits pour lesquels le niveau maximal de la NP survient après le maximum de débit ou qui présentent un soulèvement de la NP après le pic de débit et b) distribution spatiale des 20 puits représentés par des cercles blancs sur la carte pédohydrologique du temps 23 de la figure 3.25. 125

Figure 4.1 : Patron pédohydrologique du temps 3 issu de la figure 3.25. Les cercles noirs représentent les puits. 159

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Signature géochimique des compartiments du sol incluant les éléments majeurs et traces.	9
Tableau 1.2 : Synthèse des études ayant utilisé des mesures hydrologiques <i>in situ</i> pour déceler la connectivité hydrologique.	13
Tableau 1.3 : Différentes études portant sur l'utilisation du modèle de mélange afin de cibler les principales sources et leur contribution pour deux types d'écoulements soit de base et pour un débit.	15
Tableau 2.1: Résumé des caractéristiques des deux événements de précipitation. Toutes les caractéristiques « antécédentes » sont estimées à partir du temps 1 d'échantillonnage de la nappe phréatique. Les valeurs de CAH et CH sont le pourcentage de puits pour lesquels la présence de l'eau de la nappe phréatique a été décelée.	38
Tableau 2.2: Statistiques descriptives des caractéristiques des 50 mesures de nappe phréatique effectuée entre l'automne 2009 et l'automne 2010 durant la période hydrologiquement active.	39
Tableau 2.3 : Étapes suivies afin d'estimer l'écoulement souterrain de l'eau au point des zones de connexion hydrologique. Cet exemple est valide pour un profil complet à saturation.	56
Tableau 3.1: Résultat des tests sur l'égalité des variances et de la comparaison des distributions pour quatre paires de zones hydrologiquement indépendantes.	65
Tableau 3.2: Corrélations de Spearman entre les profondeurs maximales et minimales des relations NP/Q et le coefficient de Spearman et l'angle de la discontinuité des relations NP/Q.	73
Tableau 3.3: Corrélations de Spearman entre les caractéristiques des relations NP/Q et des facteurs explicatifs.	75
Tableau 3.4: Résultats en cinq étapes des analyses CPMV réalisées sur les quatre matrices représentant des conditions d'humidité différentes dans le bassin versant de l'Hermine.	81
Tableau 3.5: Tableau synthèse de la détection des hydrotopes à l'aide des neuf critères.	84
Tableau 3.6 : Résumé de l'interprétation du comportement hydrologique des quatre hydrotopes du bassin de l'Hermine.	86
Tableau 3.7 : Valeur des vitesses d'écoulement latéral à saturation (cm/h) pour un profil podzolique typique complet et pour des sections précises du profil, en fonction des différentes connexions dans le bassin de l'Hermine.	94
Tableau 3.8: Débit de l'écoulement pour les cinq zones de connexion ciblées en plus de la sortie de ZHA. Les épaisseurs du profil de sol saturé sont les mêmes qu'au tableau 3.7.	95
Tableau 3.9: Limite de détection pour chaque élément trace à l'étude incluant Fe et Mn.	100

Tableau 3.10: Statistiques descriptives des caractéristiques physico-chimiques des sources potentielles situées dans des milieux humides.....	102
Tableau 3.11 : Statistiques descriptives des caractéristiques chimiques des sources potentielles situées dans des milieux bien drainés.....	103
Tableau 3.12 : Résultats significatifs (seuil alpha de 0,05) des analyses canoniques de redondance (ACR) sur les éléments dissous de ZHN et ZHA.	110
Tableau 3.13 : Synthèse des signatures géochimiques pour chaque source potentielle en eau à l’Hermine lors de l’événement d’automne. Les cinq sources potentielles en eau sont constituées des horizons organiques (LFH), des horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l’horizon C (NP), de la zone humide nord (ZHN) et de la zone humide amont (ZHA). Les connexions hydrologiques incluent le bas de versant sud (BVS), le haut de versant sud (HVS), le haut de versant nord (HVN), la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA).	114
Tableau 3.14 : Statistiques descriptives des concentrations en éléments dissous pour les 29 échantillons du cours d’eau de l’Hermine lors de l’événement d’automne 2010.....	116
Tableau 3.15 : Synthèse chronologique de la contribution des sources en eau pour le ruisseau et de leur superficie à partir des graphiques de mélange (figure 3.24), de la série cartographique pédohydrologique (figure 3.25) et de la spatialisation des hydrogrammes de NP (figure 3.26). Les cinq sources potentielles en eau sont constituées des horizons organiques (LFH), des horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l’horizon C (NP), de la zone humide nord (ZHN) et de la zone humide amont (ZHA). Les connexions hydrologiques incluent le bas de versant sud (BVS), le haut de versant sud (HVS), le haut de versant nord (HVN), la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA).....	126
Tableau 4.1 : Comparaison entre certaines concentrations en éléments dissous de différents compartiments d’autres bassins versants et celles du bassin versant de l’Hermine lors de l’événement pluvial 2010. Les concentrations sont exprimées en µg/L.....	164

Liste des symboles et abréviations

α	niveau de signification
$\%_{\text{sat}}$	pourcentage de saturation
AC	axe canonique
ACP	analyse en composante principale
ACR	analyse canonique de redondance
AG	analyse de groupement
Al	aluminium
ALC	alcalinité
As	arsenic
ASV	aire de source variable
B	bore
Ba	barium
BVS	bas de versant sud
Ca	calcium
CAH	conditions antécédentes d'humidité
Cd	cadmium
Ce	cérium
CE	conductivité électrique
CH	conditions d'humidité
CH ₄	méthane
Co	cobalt
CO	carbone organique
CO ₂	dioxyde de carbone
COD	carbone organiques dissous
CP	composante principale
CPMV	coordonnées principales de matrice de voisinage
Cr	chrome
Cu	cuiivre
CV	coefficient de variation
EMMA	<i>end-members mixing analysis</i>
ET	éléments traces
EtMoy	erreur type de la moyenne
Fe	fer
FPT	fonction de pédotransfert
H ⁺	ion hydronium
HCO ₃ ⁻	bicarbonate
H ₂ CO ₃	acide carbonique
HNO ₃	acide nitrique
HVN	haut de versant nord
HVS	haut de versant sud

H ₂ S	sulfure d'hydrogène
K	potassium
Ks	conductivité hydraulique à saturation
La	lanthane
Li	lithium
Mg	magnésium
Mn	manganèse
MO	matière organique
Mo	molybdène
Moy	moyenne
n	nombre d'observations
N ₂	diazote
Na	sodium
ND	non disponible
NH ₄ ⁺	ammonium
Ni	nickel
NO ₃ ⁻	nitrate
NP	nappe phréatique
O ₂	oxygène
OD	oxygène dissous
p	probabilité
PA	précipitations antécédentes
Pb	plomb
pE	intensité de l'activité des électrons
pH	intensité de l'activité des ions hydronium
Pmax	profondeur maximale du plafonnement de la nappe phréatique
Pmin	profondeur minimale du plafonnement de la nappe phréatique
Q	débit
RA	rigole amont
R ²	coefficient de détermination
Rb	rubium
RN	rigole nord
Sc	scandium
Se	sélénium
Si	silice
sld	sous la limite de détection
SO ₄	sulfate
Sr	strontium
T	temps ou moments d'échantillonnage ou mesure
TA	températures antécédentes
Th	thorium
Tl	thallium

U	uranium
V	vanadium
VNS	voisinage naturel simple
Y	yttrium
ZHA	zone humide amont
ZHN	zone humide nord
Zn	zinc

*À tous ceux et celles qui se sont battus et qui se battent
pour une accessibilité égale à l'éducation*

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur François Courchesne qui m'a offert un projet de maîtrise sur lequel j'ai adoré travaillé. Je suis très heureuse d'avoir pu bénéficier de son expertise en pédologie. Je suis reconnaissante de son apport substantiel lors de l'élaboration du projet, de sa grande disponibilité à répondre à mes questions et de son aide dans l'orientation et la synthèse de mes idées. Je remercie mon co-directeur André Roy pour sa transmission de connaissances en hydrologie. Ces judicieux conseils m'ont aidé tant dans l'écriture que dans la formation des idées. Je remercie mes deux directeurs de m'avoir inculqué une méthodologie solide tout en promouvant la créativité en science. Je remercie Marie-Claude Turmel pour son enseignement exemplaire des techniques de laboratoire, des instruments et pour son aide sur le terrain dans des conditions exceptionnelles. Je la remercie sincèrement pour ces encouragements, sa générosité et son soutien moral. Je remercie également Pierre Legendre, Geneviève Ali et Dominic Bélanger qui m'ont aidé à réfléchir et à traiter les données.

Je remercie ces étudiants du 225 avec qui j'ai partagé les joies et les peines de la maîtrise : Jacynthe Masse, Nikola Wagner, Marie-Claude Provost, Marie-Claude Duquette, Mylène Légère et Fougère Augustin. Un merci spécial à Tamylia Elkadi et Samuel Turgeon pour leur contribution à la compréhension des statistiques multivariées. Un merci sincère à Catherine Mercier, Mathilde Péloquin-Guay et Christine Bergeron pour leur aide substantiel sur le terrain. Merci aussi à Mario Belzile pour son support.

Je remercie sans fin mes parents, Richard L'Heureux et Louise Gravelle, qui m'ont nourri de bon manger, du goût d'apprendre et d'encouragements tout au long de mes études. Ils ont grandement contribué à ma scolarisation. Je remercie ma sœur Michelle pour nos séances de *patinage & potinage*. Un merci à ma grand-mère Suzanne Auger qui m'a subventionné durant mes études universitaires. Sincère merci à toute ma famille et mes amies qui m'ont appuyée: Claire Lacroix, Laurence Chaput-Desrochers, Marie-Claude De Souza, Sandra Mayé, Cathy Lessard, Marie-Chantale Blanchette et Roxanne Polard-Duquette. Un merci très spécial à mon copain Sylvain Ménard, qui m'a soutenu tout au long de cette maîtrise et qui, par son cerveau jaune, m'a aidé à rationaliser les événements et à prendre du recul. Merci du fond du cœur pour cette aide émotionnelle et rationnelle.

INTRODUCTION

De plus en plus de recherches soulignent l'importance du concept de la connectivité hydrologique et mettent en lumière ses conséquences substantielles sur le plan de l'hydrologie et de l'hydrochimie (Stieglitz *et al.*, 2003; Jencso *et al.*, 2009, Anderson *et al.*, 2009; Ali *et al.*, 2010b). La connectivité hydrologique se définit comme un état qui lie les différentes parties du versant par le truchement d'un écoulement hypodermique (Stieglitz *et al.*, 2003). Dans un système hydrologiquement connecté, une hausse du débit est observable et témoigne d'un transfert substantiel d'eau du milieu terrestre vers le milieu aquatique. L'émergence d'une connectivité hydrologique dans un système sous-tend entre autres un accroissement du transport des éléments dissous. Cela n'est pas sans conséquences, pour peu que les éléments possèdent un potentiel nutritif et/ou toxique selon les concentrations. La biogéochimie des éléments majeurs du Bouclier canadien a fait l'objet de plusieurs études (Allan *et al.*, 1993; Courchesne *et al.*, 2001) tandis que les éléments traces (ET) n'ont pas joui d'une telle popularité. Pourtant, parmi les ET, certains sont soit toxiques (As) ou essentiels (Cu, Zn) à certaines doses (Kabata-Pendias, 2001). Les bassins versants forestiers représentent une importante source d'eau potable pour plusieurs régions du monde et il est nécessaire de comprendre d'emblée le comportement hydrogéochimique des ET dans ces types d'environnements (Huang *et al.*, 2010). Dans un bassin versant, la concentration des ET peut varier sur le plan vertical, c'est-à-dire en fonction des horizons de sol, et sur le plan horizontal, soit en fonction des différentes unités morphologiques du paysage. Ainsi, l'activation de sources en eau lors d'un événement de précipitation permet le transport de certains ET et d'autres éléments dissous. La sensibilité des ET face à l'eau et à sa chimie invite à se demander *en quoi l'analyse des éléments traces pourrait concourir à déceler quand et où se développe la connectivité hydrologique dans un bassin versant ?* Les connaissances sur l'écoulement de l'eau dans les bassins versants sont amassées grâce à un large spectre d'approches et de méthodes hydrologiques et géochimiques (Bazemore *et al.*, 1994 ; Ladouche *et al.*, 2001). Le présent projet de maîtrise se situe à la charnière de la pédologie et de l'hydrologie. Le compartiment hydrologique d'intérêt est celui de la nappe phréatique (NP), soit la zone saturée non confinée. L'objectif général du projet est d'améliorer la compréhension des mécanismes qui contrôlent l'écoulement de l'eau dans les bassins versants, et ce par le biais de l'intégration de deux types de mesures. D'une part,

les mesures hydrologiques, qui comprennent, entre autres, un dispositif expérimental à haute densité spatiale et, d'autre part, des mesures géochimiques qui incluent une approche exploratoire faisant intervenir les ET. Le point de mire de cette maîtrise est la connectivité hydrologique. Avant d'aborder les objectifs et la méthodologie, nous présentons une revue de la littérature constituant le fondement scientifique sur lequel s'est construit ce projet de maîtrise.

Chapitre 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Modèles en hydrologie

1.1.1 Du modèle hortonien au modèle ASV

Depuis les années 1930, quelques grands modèles ont jalonné l'histoire des processus hydrologiques sur les versants. Le premier modèle, dit « hortonien », donne préséance à un écoulement de surface, qui correspond à un excès de précipitation par rapport à la capacité d'infiltration des sols. Bien que ce modèle soit applicable aux régions plus arides ou ayant un régime méditerranéen, il est rare qu'un tel écoulement se rencontre en régions humides (Dunne, 1978). Il y a environ 45 ans, John Hewlett a présenté le modèle des aires de sources variables (*ASV-Variable Source Area*), qui donne une importance à l'écoulement hypodermique de l'eau dans le substrat. Les modèles d'écoulement actuels reposent toujours sur le modèle ASV (McDonnell, 2003). Les ASV ne sont pas statiques, elles croissent et décroissent en taille et apparaissent à divers endroits dans le paysage en fonction du temps de l'année, des caractéristiques des averses, des conditions antécédentes d'humidité, de la topographie et de la végétation. Les modèles actuels, hérités de la structure ASV, mettent en application des postulats mécanistiques particuliers. McDonnell (2003) présente ces postulats et leurs principales failles mises en lumière par de récentes études.

1.1.2 Remises en question des postulats mécanistiques

Parmi les postulats mécanistiques sous-jacents au modèle ASV, plusieurs sont d'intérêt pour cette maîtrise, dont 1) l'hypothèse de l'état stable pour l'entièreté du bassin versant « *catchment-wide steady state assumption* »; 2) l'hypothèse de l'indice topographique « *topographic index assumption* » et 3) l'hypothèse d'une saturation progressive du chenal vers le versant (*saturated wedge assumption sensu McDonnell, 2003*). Nous définirons le premier postulat ici. L'hypothèse de l'état stable pour l'entièreté du bassin versant veut que la dynamique de l'écoulement simulée à partir de la zone saturée se calque toujours sur l'élévation et la baisse du niveau de NP. Ainsi, l'élévation de NP de la zone riveraine jusqu'à la surface du sol constitue la preuve d'une élévation synchrone de la NP pour

l'entièreté du bassin versant et, inévitablement, du déversement de l'eau du bassin versant en entier vers le cours d'eau. Toutefois, cette tendance à la généralisation s'estompe à la lumière d'expériences *in situ* qui affirment la présence d'une hétérogénéité du fonctionnement hydrologique interne des bassins versants (Seibert *et al.*, 2003; Anderson *et al.*, 2009).

1.1.3 Vers une distinction des unités hydrologiques

L'hydrotope constitue une aire géographique dans le bassin versant dans laquelle le comportement hydrologique (p. ex. : NP ou humidité du sol) est considéré homogène. La confirmation de l'existence d'une diversité comportementale de la zone saturée peut se faire par la détection d'hydrotopes dans les bassins versants. La connaissance partielle de cette diversité gêne l'intégration de cette dernière dans les modèles hydrologiques. À cet effet, Seibert et McDonnell (2002) ont proposé l'intégration de « *soft data* », (p. ex. : l'étendue, soit le maximum et le minimum des niveaux de NP pour la zone riveraine) dans un modèle afin d'en augmenter le réalisme et corollairement de bâtir un pont entre les expérimentalistes et les modélisateurs. Certaines études montrent une fonctionnalité hydrologique distincte respectivement entre la zone riveraine et le versant (McDonnell, 1990; McGlynn et McDonnell, 2003) et entre le bassin et les dépressions sur le versant (McHale *et al.*, 2002).

1.1.4 Émergence de régularités hydrologiques fondamentales

Bien que la mise en lumière de la fonctionnalité des aires distinctes permette une amélioration de la compréhension de la relation entre les mouvements de la NP et le débit, il est nécessaire de comprendre le lien entre ces aires, qui font partie d'un même système hydrologique. À l'heure actuelle, les hydrologues tentent de déceler des processus, des patrons et des fonctions communs aux bassins versants (Ali et Roy, 2009). Cette tendance forme un cadre adéquat pour chercher des propriétés émergentes dans les bassins versants. L'investigation de la présence de connectivité hydrologique s'inscrit dans ce courant. L'avènement du concept de la connectivité hydrologique constitue un terreau fertile à l'amélioration de la compréhension des relations existantes entre les différentes unités hydrologiques, pour peu qu'il soit possible de la mesurer avec des méthodes actuelles.

1.2 Types de mesure de l'écoulement de l'eau souterraine

1.2.1 Mesures hydrologiques de l'écoulement

La quantification verticale *in situ* de l'écoulement de l'eau dans un sol d'un versant a tout d'abord été investiguée par l'utilisation de la méthode de la tranchée (Dunne et Black, 1970). Toutefois, cette approche s'est avérée limitée en raison des effets artéfacts et de la portée très limitée du dispositif au vue de l'hétérogénéité des écoulements dans le bassin (Ali *et al.*, 2010b). Ainsi, les efforts se sont orientés vers des mesures plus sûres telles que l'enregistrement des niveaux de la NP dans les puits. À ce jour, ces instruments sont les plus utilisés afin de mesurer les comportements et la chimie de l'eau souterraine. La nappe phréatique, ou zone saturée, est constituée d'eau qui sature tous les pores du sol ou de la roche mère (Rose, 2004). Le battement de la NP qui est non confinée peut être mesuré à l'aide de puits ou de piézomètres enfoncés verticalement dans le sol (Rose, 2004). La mesure de la NP sur un transect permet de saisir l'évolution bidimensionnelle de la zone saturée, tandis qu'une disposition couvrant une aire complète permet de saisir l'évolution tridimensionnelle, pour peu que la densité soit suffisante. Ces mesures révèlent des informations importantes, mais leur étendue spatiale peut s'avérer faible et ainsi ne représenter que le battement local, soit à l'échelle décimétrique ou métrique.

1.2.1.1 Écoulement hypodermique de la zone saturée

L'écoulement hypodermique, « *shallow subsurface flow* », constitue un processus dominant dans de nombreux bassins versants dans le monde (Uchida *et al.*, 2005). Un écoulement hypodermique latéral est causé lorsqu'une zone saturée se développe au-dessus d'un matériel de plus faible conductivité hydraulique, à condition qu'il y ait une pente (Anderson *et al.*, 2010). En conséquence, le développement d'une zone saturée génère le soulèvement de la NP mesurable à l'aide d'un piézomètre ou d'un puits. Cette concomitance entre l'élévation du niveau de la NP et la hausse de l'écoulement dans un versant constitue la base de nombreux travaux en hydrologie des versants (Bishop *et al.*, 2004; Anderson *et al.*, 2010; Detty et McGuire; 2010). À ce jour, il est généralement admis que l'écoulement hypodermique événementiel « *subsurface stormflow* » constitue un des principaux mécanismes d'écoulement dans les versants lors d'événements de précipitation (Weiler *et al.*, 2005). Plusieurs facteurs peuvent influencer le développement d'une zone saturée et

d'un potentiel écoulement hypodermique dans un sol d'un versant dont les conditions antécédentes d'humidité (CAH). Des études montrent que, sous des CAH faibles, le développement d'un écoulement hypodermique est minime ou absent, alors que sous des CAH élevées, une circulation latérale de l'eau constitue la principale contribution à la hausse du débit dans le cours d'eau (Sidle *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2005). Brown *et al.* (1999) démontrent qu'un écoulement latéral dans les horizons organiques de surface s'opère même pour des CAH sèches. D'autres études mettent en lumière la présence d'un écoulement de surface sous des CAH très faibles en raison de la potentielle existence d'horizons organiques hydrophobes (Doerr *et al.*, 1996; Biron *et al.*, 1999).

1.2.1.2 Comportements non linéaires de la zone saturée

En hydrologie des versants, le constat de la relation non linéaire entre les précipitations et le débit est à la base de l'émergence du concept de la connectivité hydrologique. Un système est non linéaire si les extrants ne sont pas proportionnels aux intrants à travers la gamme entière des intrants (Phillips, 2003). Les processus non linéaires de la réponse générale du bassin peuvent tirer leur origine de processus non linéaires internes. Des études montrent que le comportement de la NP peut présenter des phénomènes de non linéarité tels que l'effet de seuil, l'effet de stockage, la boucle de rétroaction positive et l'autolimitation (Phillips, 2003). McDonnell (2003) affirme que l'investigation des caractéristiques non linéaires constituerait une approche prometteuse qui mènerait à une compréhension générale et non idiosynchrone des versants.

Un effet de seuil consiste en un point à partir duquel le comportement d'un système change. Tromp-van Meerveld et McDonnell (2006b) et Spence et Woo (2003) prouvent l'influence de la topographie souterraine et invoquent l'existence du processus *fill and spill*. Ce dernier consiste en une accumulation d'eau dans une dépression devant atteindre une hauteur d'eau égale à la hauteur du bord de ladite dépression pour pouvoir entrer dans une phase de déversement souterrain (**figure 1.1a**). Ainsi, le processus du *fill and spill* incarne un effet de seuil et tire son origine de l'effet de stockage. Le stockage induit une réponse retardée qui cause un comportement non linéaire. Sans nommer ce processus, Buttle *et al.* (2004) mettent l'accent sur l'influence prépondérante de l'emmagasinage de l'eau dans les dépressions de haut de versant sur l'écoulement sur le versant (**figure 1.1b**). Lorsque le

déversement des dépressions sur le versant est initié, le raccordement entre le versant et la zone riveraine peut s'opérer. Dans le bassin versant de l'Herminie, Thériault (2009) et Toquet (2010) ont mis en lumière la potentielle existence du processus *fill and spill*.

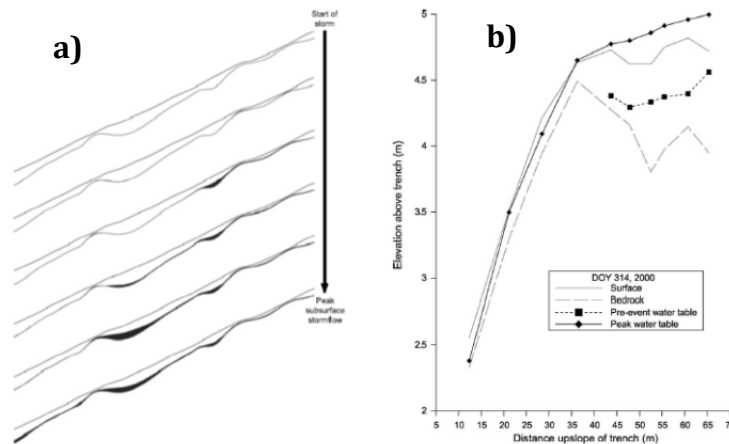


Figure 1.1: a) Illustration de l'hypothèse *fill and spill*. Source: Tromp-van Meerveld et McDonnell (2006b), figure 10. b) coupe transversale d'un versant montrant la topographie de surface (ligne pleine), la topographie sur socle (ligne hachurée), la profondeur de la NP avant événement (ligne avec carré) et la profondeur de la NP durant l'événement en 2000. Source : Buttle *et al.* (2004), figure 5, p.169.

Une boucle de rétroaction positive est une réaction qui augmente l'effet d'un phénomène. La transmissivité rétroactive positive de NP dans le sol est le fait d'une augmentation de la transmissivité induite par la concomitance de l'élévation de la NP qui baigne une plus grande épaisseur de solum et de l'atteinte de la NP dans des horizons de surface de plus haute conductivité hydraulique (K_s). On parle alors d'une boucle de rétroaction positive de la transmissivité. Dans les bassins versants forestiers reposant sur un till, plusieurs chercheurs ont fait la preuve de la présence de cette transmissivité rétroactive positive de la NP (Rhode, 1989; Bishop, 1990; Kendall *et al.*, 1999; Seibert *et al.*, 2003). L'accroissement de la transmissivité de la NP à mesure qu'elle s'élève dans le profil provoque un drainage accéléré de la zone saturée qui se traduit par une réduction de l'élévation de la NP, voire une stabilisation de son niveau. Phillips (2003) affirme que ce comportement non linéaire est composé d'une transmissivité rétroactive positive couplée à une forme d'autolimitation de la NP.

1.2.2 Mesures géochimiques de l'écoulement

En complément aux limites des mesures hydrologiques, les mesures géochimiques ont fait leur apparition en hydrologie des versants il y a environ trente ans et sont de plus en plus utilisées (Bazemore *et al.*, 1994 ; Ladouche *et al.*, 2001). Les mesures géochimiques en hydrologie des versants reposent sur l'utilisation des traceurs naturels et artificiels qui peuvent être intégrés dans des modèles géochimiques tels que le modèle de mélange de sources EMMA (*End-Members Mixing Analysis*). Globalement, elles permettent d'inférer les chemins de l'eau, sur la base d'une association théorique entre la position de l'eau dans le sol et une réponse hydrochimique à l'exutoire qui intègre tous les écoulements du bassin.

1.2.2.1 Modèle de mélange de sources

Les modèles de mélange de sources sont largement utilisés dans les études actuelles (Abesser *et al.*, 2006; James et Roulet, 2006). Le principe sous-jacent à ce modèle veut que la nature géochimique du cours d'eau résulte du mélange de plusieurs sources, les « *end-members* », en différentes proportions qui reflètent les différents écoulements dans le bassin versant. En effet, la chimie de l'eau dans le cours d'eau donne un aperçu unique du fonctionnement du bassin versant puisque l'interaction entre l'eau terrestre et le bassin régule la composition chimique de l'eau du cours d'eau (Fröhlich *et al.*, 2008). La réalisation d'un modèle de mélange et son interprétation repose sur de nombreux postulats : 1) la linéarité du mélange des solutés; 2) le comportement conservateur des traceurs; 3) l'identification de toutes les sources; 4) la différenciation entre les signatures chimiques des sources et 5) l'invariabilité temporelle et la constance spatiale de la chimie des sources (Hooper, 2001, 2003). Ce modèle constitue donc une technique pour simuler la chimie du cours d'eau sans que la compréhension des processus d'écoulement soit nécessaire a priori (Soulsby *et al.*, 1998).

1.2.2.2 Signatures des sources verticales par les éléments

Le **tableau 1.1** comprend la signature géochimique par les éléments majeurs et traces pour différents horizons du sol, c.-à-d. sur le plan vertical, et en fonction de différentes conditions hydriques.

Tableau 1.1 : Signature géochimique des compartiments du sol incluant les éléments majeurs et traces.

Classes d'éléments	Sources verticales	Signatures géochimiques	Références
Éléments majeurs	Horizons de surface (non saturés)	NO ³⁻ , COD, H ⁺	Bishop <i>et al.</i> (1990); Biron <i>et al.</i> (1999); Hendershot <i>et al.</i> (1992); Soulsby (1995); Soulsby <i>et al.</i> (1998); Abesser <i>et al.</i> (2006); Ladouche <i>et al.</i> (2001); etc.
	Nappe phréatique (horizons minéraux)	Ca, Mg, K, Na, Si	
Éléments traces (et mineurs)	Horizons saturés (organique ou non)	U, Pb	Ladouche <i>et al.</i> (2001)
		As	Sultan et Dowling (2006)
		Al	Neal <i>et al.</i> (1996)
	Nappe phréatique (horizons minéraux)	Ba, Rb, Sr	Ladouche <i>et al.</i> (2001)
		Ni, Zn, Ba, Mn, Rb, (Fe), Li, V, Cr, Sr, U, Co,	Fröhlich <i>et al.</i> (2008)
		B, Ba, Li, Sc, Sr	Neal <i>et al.</i> (1996)
		Si	Allan <i>et al.</i> (1993); Hendershot <i>et al.</i> (1992); O'Brien et Hendershot (1993)

Ainsi, des résultats convergents montrent que la NP porte la signature des cations basiques (Ca, Mg, K et Na) et d'autres éléments majeurs ou mineurs (Si, S et H⁺), signature induite par l'altération *in situ* du matériel minéral. L'écoulement de surface porte quant à lui la signature des matériaux organiques (NO₃ et COD) accumulés en surface et des éléments majeurs bio recyclés (Biron *et al.*, 1999; Hendershot *et al.*, 1992; O'Brien et Hendershot, 1993; Soulsby, 1995; Soulsby *et al.*, 1998; Ladouche *et al.*, 2001; Abesser *et al.*, 2006). Cette convergence des résultats est nettement moins présente pour la signature des ET sur lesquels encore peu d'études ont été réalisées. Néanmoins, certaines recherches montrent que la signature de la NP des horizons profonds est associée aux éléments traces Ba, Li, Rb

et Sr (Hendershot *et al.*, 1991; Allan *et al.*, 1993; Neal *et al.*, 1996; Ladouche *et al.*, 2001; Fröhlich *et al.*, 2008). À la lumière de cette synthèse, il est légitime d'affirmer que les ET pourraient constituer des traceurs utiles de l'écoulement dans des horizons spécifiques en raison de propriétés particulières telles que la grande sensibilité de certains ET aux processus d'oxydoréduction et de leur affinité à la matière organique (**section 1.4**).

1.2.2.3 Signature des éléments et écoulement : Le cas du bassin de l'Herminie (Québec, Canada)

Dans le bassin de l'Herminie, la correspondance entre le débit maximal et l'augmentation de la concentration des solutés dont les concentrations sont plus élevées à la surface du sol (COD, NO₃ et Ca) montre que l'écoulement s'opère dans les horizons de surface durant un événement pluvial (Biron *et al.*, 1999). Lors d'un événement, la hausse des solutés dont les concentrations sont plus élevées pour les horizons profonds, soit SO₄, Na et Si, indique une provenance souterraine minérale de l'eau lors d'un débit de base (Biron *et al.*, 1999). La Si, considéré comme un élément conservateur, a été utilisée comme traceur naturel (Hendershot *et al.*, 1992). La séparation de l'hydrogramme à l'aide de Si a permis d'affirmer que de 50 % à 95 % de l'eau du cours d'eau provient du solum en période de haut débit alors que le débit de base est alimenté par l'eau de la NP. En 1993, O'Brien et Hendershot (1993) ont séparé l'hydrogramme en trois composantes et invoqué l'addition d'une source qu'est la résurgence de la NP dans les horizons du sol avant d'atteindre le cours d'eau. Les auteurs mettent ainsi en lumière que Si est réactive et que la chimie de la NP soumise à une résurgence portera la signature des horizons de sol de surface de la zone riveraine. Par ailleurs, Thériault (2008) fait un lien entre l'hydrochimie à l'exutoire et l'activation hydrologique d'une source au sein du bassin durant un événement à l'aide d'As et V, ce qui représenterait la signature d'une zone saturée qui déborde lors de forte pluie. Ali et Roy (2009), dont les travaux portent, entre autres, sur l'Herminie, affirment de manière générale que l'utilisation de la signature de certains éléments naturels pour comprendre l'écoulement de l'eau et pour saisir la connectivité hydrologique constitue une approche intégrée des processus qui peut cependant être insuffisante si elle n'est pas couplée à des mesures hydrologiques.

1.3 Connectivité hydrologique

1.3.1 Avènement du concept de la connectivité en hydrologie

Le concept de la connectivité hydrologique apparaît suite à des observations hydrologiques dans des bassins versants pour lesquels la relation entre les précipitations et le débit du cours d'eau n'est pas linéaire. Cette non linéarité pourrait être imputable à un changement dans l'organisation spatiale de l'humidité du sol en surface présentant des connexions hydrologiques. Cet état de connexion se produit lorsque les conditions d'humidité dans le bassin sont élevées suite à des précipitations et entraîne une hausse substantielle du débit. Ainsi, les mécanismes hydrologiques internes à l'intérieur du bassin provoqueraient cette non linéarité rencontrée entre les précipitations et le débit. Ali et Roy (2009) proposent une définition contextuelle de la connectivité qui tend à englober plusieurs définitions :

« Hydrologic connectivity is a continuum of hydrological states characterized by an increased contribution from lateral subsurface water flow that sporadically activates the topographic linkages between riparian and upland areas and thus gives rise to highly correlated spatial patterns of hydrologic state variables (e.g. soil moisture) at the hillslope and the catchment scales. » (Ali et Roy, 2009, p.368, 2009)

La notion de connectivité vient de l'écologie où on attribue à l'eau un rôle de vecteur de matière, d'énergie et d'organismes à l'intérieur du cycle hydrologique ou entre les éléments de celui-ci (Ali et Roy, 2009). En fait, d'un point de vue écologique, la connectivité hydrologique est d'une importance capitale puisque le transport des matériaux et des éléments est principalement une fonction de l'écoulement de l'eau à l'intérieur d'un bassin (Stieglitz *et al.*, 2003).

1.3.2 Mesures hydrologiques de la connectivité

En général, la connectivité hydrologique décrit un phénomène sous la surface du sol. Le **tableau 1.2** présente une synthèse des études dont l'objet de recherche a été la mesure *in situ* de la connectivité hydrologique. Les deux types de mesures hydrologiques surtout utilisées afin de détecter la connectivité, sont la mesure de l'humidité du sol et celle de la

profondeur de la nappe phréatique. De manière générale, la mesure de l'humidité du sol s'est avéré moins efficace pour saisir la présence de la connectivité hydrologique que la mesure des fluctuations de la NP (Ocampo *et al.*, 2006; Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006a,b; James et Roulet, 2007; Ali *et al.*, 2010b). Toutefois, il est possible que le type de bassin versant dicte la variable à utiliser puisque Western *et al.*, 2001, en milieu de prairie, ont détecté la connectivité à l'aide de l'humidité du sol alors que James et Roulet, 2007 n'ont pas réussi pour un bassin versant forestier. Déjà, Roulet (1990) avance l'idée d'une connectivité de la zone saturée du sol comme un cadre méthodologique afin de comprendre l'hydrologie des tourbières. Le mécanisme d'activation du versant, soit le *fill and spill*, met en exergue 1) l'indépendance d'un comportement hydrologique dans un versant et 2) la contribution d'un versant, après l'atteinte d'un seuil, à l'activation de la connectivité hydrologique.

À la lumière de cette littérature, la mesure des fluctuations de la NP s'avère une variable appropriée afin de mesurer la connectivité hydrologique. La connectivité étant un continuum, sa mesure complète à l'aide de puits et piézomètres reste un défi de taille en raison de la portée potentiellement locale de ces dispositifs. Le déploiement d'une haute densité spatiale de puits et piézomètres amoindrit cette complication méthodologique. La difficulté à mesurer sur le terrain la connectivité hydrologique n'est pas l'apanage de ce concept puisqu'en hydrologie des versants, la mesure *in situ* est problématique en raison de contraintes d'application et de réalisation. Il devient donc tout à propos d'explorer les mesures hydrogéochimiques afin de contribuer à déceler la connectivité hydrologique.

Tableau 1.2 : Synthèse des études ayant utilisé des mesures hydrologiques *in situ* pour déceler la connectivité hydrologique.

Bassin versant, région, pays (références)	Type d'environnement	Variable mesurée (nombre de lieux de mesures et disposition)	Détection connectivité hydrologique	Processus engendrant la connectivité
Tarrawarra, sud-est de l'Australie, (Western <i>et al.</i> , 2001)	Prairie	- Humidité du sol (500 mesures, section de 10 X 20 m)	Présence	N/D
Mont St-Hilaire, réserve Biosphère, Montérégienne, Québec, Canada (James et Roulet, 2007)	Forêt	- Humidité du sol (300 mesures dans le bassin) - NP (5 puits en 2 transects)	Humidité = absence et NP = indice de présence	Saturation de la brisure de pente qui connecte haut avec bas de versant
PC1-08, Bouclier canadien, Ontario, Canada (Buttle <i>et al.</i> , 2004)	Forêt	-NP (N/D)	Indice de présence et présence	Connexion entre dépression du versant et zone riveraine une fois les dépressions remplies
Susannah Brook Catchment, ouest de l'Australie, (Ocampo <i>et al.</i> , 2006)	Pâturage	- NP (6 puits en 2 transects)	Présence	Connexion entre zone riveraine et versant
Hermine, Bouclier canadien, Québec, Canada (Ali <i>et al.</i> , 2010b)	Forêt	- NP (9 puits, 3 pour zone riveraine, haut de versant et partie amont)	Indice de présence	Connexion entre haut et bas de versant
Panola, Géorgie, É.-U. (Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006a,b)	Forêt	- NP (29 puits en 2 transects et haute densité dans dépression)	Présence	Emmagasinage et déversement d'une dépression « <i>fill and spill</i> »
Plastic Lake & Harp Lake, Ontario, Canada, (Devito <i>et al.</i> , 1996)	Forêt et milieux humide forestier	- NP (> 54 puits, transects et ponctuelle)	Présence	Connexion entre des milieux humides et leur versant respectif
Russell Creek Research Watershed, Colombie-Britannique, Canada (Anderson <i>et al.</i> , 2009, 2010)	Forêt	- NP (piézomètres, 35 (2009) et 25 en trois groupes (2010))	Indice de présence	Indice en bas de versant, là où s'opère une connexion entre haut et bas de versant

1.3.3 Mesures hydrogéochimiques de la connectivité : modèle de mélange EMMA

Le modèle de mélange EMMA (*End-Members Mixing Analysis*) suppose que seuls la présence et le mélange des sources dans le cours d'eau varient avec le temps. La détection d'une source par ce modèle implique la connexion de cette dernière au cours d'eau. Toutes variations des solutés dans EMMA, signifient une activation et/ou une désactivation des sources dans le bassin. Conséquemment, une telle approche est en accord avec la définition de la connectivité hydrologique. De fait, la connectivité hydrologique repose sur un mécanisme d'une contribution croissante de l'écoulement de certaines sources, autant de manière quantitative, c.-à-d. nombre des aires contributives, que de manière volumétrique, c.-à-d. l'importance des contributions individuelles (Ali *et al.*, 2010b). L'utilisation de modèles de mélange EMMA en hydrologie des versants a permis de cibler des sources contributrices dans le bassin versant qui répondent au modèle du ASV tant sur le plan horizontal que vertical. C'est précisément la capacité des modèles de mélange à discrétiser spatialement les sources sur le plan horizontal qui est d'intérêt dans cette section. Les études récentes incluent une diversité de sources allant des affleurements rocheux aux milieux humides (**tableau 1.3**). Il est important de souligner que l'utilisation des éléments majeurs est monnaie courante dans la réalisation des modèles de mélange alors que les études n'ont pas recours aux ET. Bien qu'Ali *et al.* (2010b) aient pu déterminer certaines sources dans leur modèle, ils constatent que les données de chimie du cours d'eau apparaissent à l'extérieur du domaine de mélange défini par les sources sélectionnées (**figure 1.2**). Le non échantillonnage de certaines sources peut induire ce type de problème (Liu *et al.*, 2004). Ali *et al.* (2010b) parviennent néanmoins à démontrer la contribution d'une zone contre-intuitive se situant dans le haut du versant sud. Cette zone est affublée de ce nom en raison de son apparence peu contributive, c.-à-d. haut de versant sans dépression ni écoulement de surface apparent, par rapport à l'autre zone de bas de versant en amont du bassin, qui constitue un ruisseau intermittent lors de fortes averses.

À l'instar des modèles de mélange, les analyses hydrochimiques permettent une compréhension de l'écoulement de l'eau. Des études récentes illustrent l'importance du modèle ASV pour prédire la composition chimique des eaux de surfaces (Creed & Band, 1998; Creed & Beall, 2009).

Tableau 1.3 : Différentes études portant sur l'utilisation du modèle de mélange afin de cibler les principales sources et leur contribution pour deux types d'écoulements soit de base et pour un débit.

Lieu et auteurs	Éléments utilisés	Nombre sources	Principale contribution à l'écoulement de base	Principale contribution pour un haut débit	Apport et précision
Adirondack (McHale <i>et al.</i> , 2002)	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻	3	-NP du till - NP de sol -NP de milieux humides	- NP du till - Eau du sol	Mélange de l'eau dans les dépressions du versant
Bouclier canadien (Ali <i>et al.</i> , 2010b)	CE ^a , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	3	- Haut de versant minéral (aval) - Bas de versant organique (amont)	- Bas de versant minéral (aval) - Haut de versant minéral (aval) - Bas de versant organique (amont)	Non considération d'une source potentiellement contributrice
Géorgie, É.-U., (Burns <i>et al.</i> , 2001)	Mg ²⁺ , Na ⁺ , H ₄ SiO ₄ , Cl ⁻	3	Zone riveraine	Affleurement rocheux	La détermination des sources est importante
Montérégienne, Canada (James et Roulet, 2006)	Na ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , ALC ^b , et CE	3	NP	- Pluiolessivat - NP perchée	Pour une échelle événementielle multiscalaire

^aCE = Conductivité électrique.

^bALC = Alcalinité

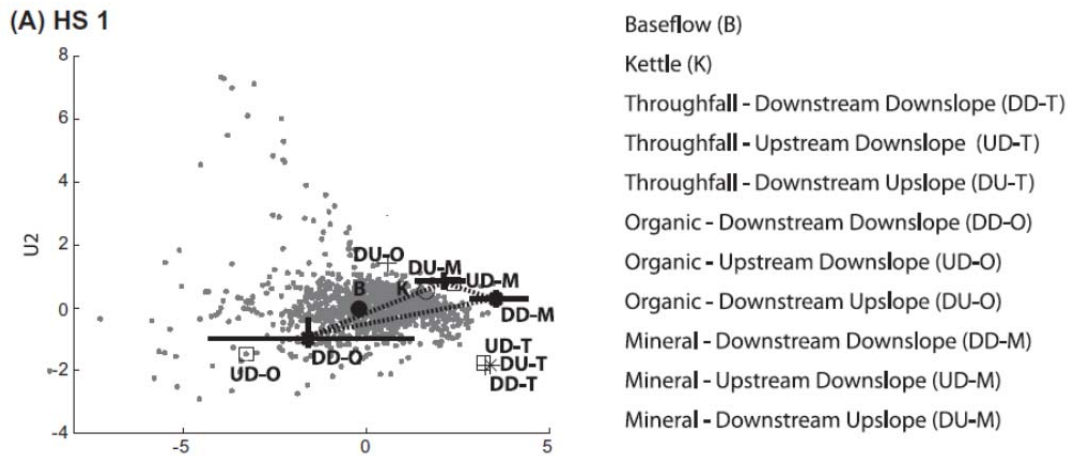


Figure 1.2 : Diagramme de mélange en espace-U (système de référence dérivé des analyses de valeurs propres et défini par les axes principaux orthogonaux, soit U1 et U2) pour tous les échantillons du cours d'eau (n = 1384). Les échantillons du cours d'eau à l'exutoire sont illustrés par des points gris de petite taille alors que les lignes pointillées noires forment le triangle de mélange. Les barres d'erreur représentent les intervalles interquartiles seulement pour les sources (*End-members*) qui forment les extrémités du triangle de mélange. L'explication des acronymes des sources se trouve à droite du diagramme. Source : Ali *et al.*, 2010b, figure 6.A, p.129.

1.3.4 Investigation de la connectivité hydrologique : Le cas du bassin versant de l'Hermine

À l'Hermine, Ali *et al.* (2010b) suggèrent la présence d'une zone contributrice sur le versant sud à l'aide des mesures de la NP pour les trois sources ciblées. La **figure 1.3** montre une potentielle contribution de la zone en aval dans le versant lors de débits moyens ou forts. Les auteurs soutiennent que, puisque la chimie de cette zone est présente dans le cours d'eau, c'est qu'il y a donc une connexion entre le haut de versant et le bas de versant en aval dans le versant sud.

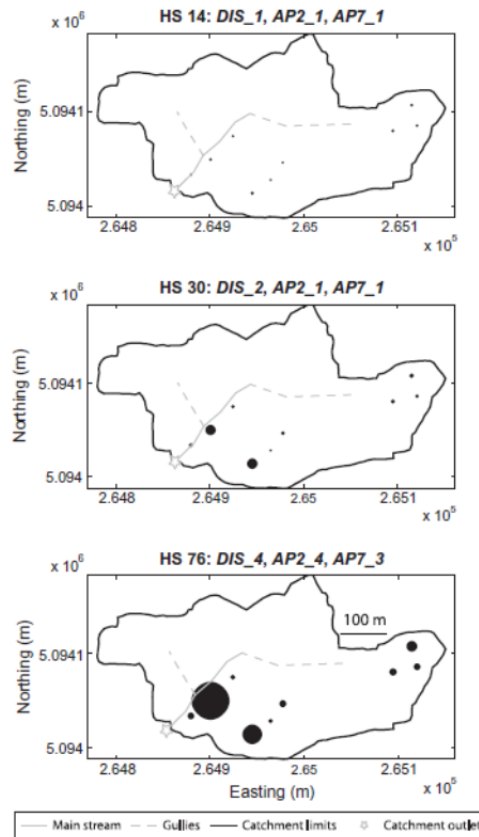


Figure 1.3: Représentation schématique de la moyenne de la profondeur de la nappe phréatique associée à trois scénarios hydrologiques contrastés. Plus le cercle plein est grand, plus la nappe phréatique est proche de la surface du sol. Source : Ali *et al.*, 2010b, fig.9, p.132.

Des travaux non publiés réalisés à l'Herminie montrent des signes de connectivité hydrologique. En effet, les recherches de Thériault (2008) et de Toquet (2009) attestent la présence de connexion entre certaines zones dans le bassin à l'échelle événementielle. Pour sa part, Thériault (2008) a utilisé un réseau de 28 puits situés sur le versant nord et sud dans la partie en aval du bassin et a décelé une zone de connexion sur le versant nord qui serait généré par un *fill and spill* hypodermique. Toquet (2009) a utilisé un réseau de 94 puits déployé sur 60 % du bassin versant afin de déceler une connectivité hydrologique durant un événement de précipitation dont les CAH étaient sèches. L'auteure cible plusieurs zones qui se connectent : 1) connexion hypodermique d'est en ouest le long du bas du versant sud; 2) connexion entre le haut et bas de versant dans le haut du versant sud; 3) connexion à l'endroit de la rigole nord à partir de la zone humide nord; 4) connexion entre la rigole amont et la zone humide amont et 5) connexion faible entre le haut du versant nord et la zone humide nord (**figure 1.4**). L'auteure invoque des phénomènes de *fill and spill* pour

expliquer les connexions dans les versants. Thériault (2008) montrent une variation des ET dans le cours d'eau et associent certains d'entre eux à la connexion hydrologique de la zone humide nord vers le cours d'eau. Il devient pertinent d'investiguer la contribution potentielle des ET à déceler l'activation de connexions hydrologiques dans le bassin versant de l'Hermine. La section suivante décrit les comportements des ET.

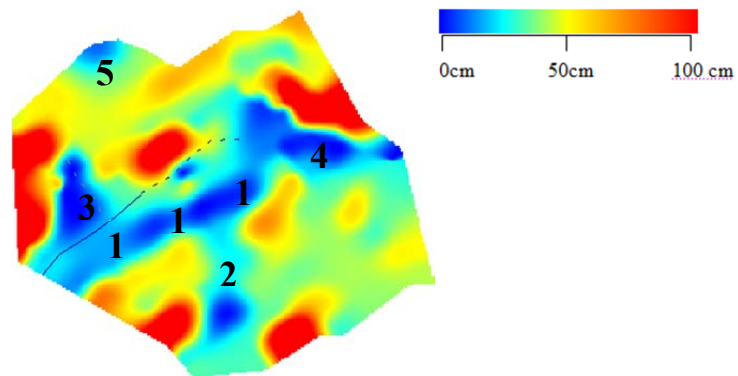


Figure 1.4: Carte de la zone d'interpolation des valeurs de profondeurs de la nappe phréatique dans le bassin de l'Hermine au temps 4 (24/10/09, 14h30) de l'événement de précipitation 2009. L'échelle représente les profondeurs dans le sol. Tous les puits à sec obtiennent une valeur de 100 cm et donc sont représentés par la couleur rouge sur la carte. Les chiffres sont ajoutés à la figure afin de faciliter la visualisation des zones de connexion et représentent : 1) le bas de versant sud; 2) le haut de versant sud; 3) le déversement de la zone humide nord dans la rigole nord; 4) la rigole amont et 5) le haut de versant nord. Source : Toquet, 2010, fig.14, carte n°9, p.43.

1.4 Les éléments traces

1.4.1 Définition et origine des éléments traces

Au vu de la définition pédologique, les ET constituent des éléments dont la concentration dans le sol est inférieure à 100 mg Kg^{-1} ou dont la concentration dans la solution de sol est inférieure à $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ et typiquement inférieure à $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ (Essington, 2004). Les ET dans les sols sont associés à trois composantes (Kabata-Pendias, 2001) : 1) les ET d'origine lithologique; 2) les ET d'origine pédogénétique, c.-à-d. lithologique dans un premier temps, mais dont les concentrations et la distribution sont modifiées suite à la pédogenèse et la

végétation et 3) les ET anthropogéniques, c.-à-d. déposés dans les sols comme conséquences directes ou indirectes de l'activité humaine. Même les sites éloignés des émissions des ET anthropogéniques peuvent être contaminés par le biais du transport atmosphérique (Huang *et al.*, 2010; Kerr *et al.*, 2008). Durant ces périodes, les sols peuvent constituer des puits pour les ET. Quelle que soit la provenance des ET, ils soulèvent un intérêt dichotomique puisque certains jouent un rôle écologique et biologique important alors que d'autres sont toxiques. Dans le cadre de cette maîtrise, c'est la forme dissoute des ET ($< 0,4 \mu\text{m}$) qui est analysée. Cette forme est plus biodisponible que la forme particulaire ($> 0,4 \mu\text{m}$). La taille de $0,4 \mu\text{m}$ est définie de manière opérationnelle et dans la réalité, la phase dissoute des éléments peut contenir des bactéries, des particules et des colloïdes (Neal *et al.*, 2005).

1.4.2 Altération des éléments traces selon les conditions p_e et pH

Au début de l'altération du sol et de la pédogenèse, la composition en ET du sol est héritée du matériel parental (Kabata-Pendias, 2001). Tous les types d'altération de la roche en place et du sol y sont contrôlés par un équilibre chimique. La stabilité d'un tel système est souvent représentée par le diagramme de Pourbaix qui met en relation le système redox (p_e ou E_H) et l'acidité (pH) qui servent à représenter et délimiter les domaines de stabilité des différentes espèces chimiques (**figure 1.5**). Le pH désigne l'intensité de l'activité de protons hydratés (H^+) et cette dernière influence la solubilité des éléments et les processus biologiques. Une attention particulière est portée à p_e pour les besoins de ce projet de maîtrise. Lors de l'oxydation, des électrons sont perdus et, lors de la réduction ils sont gagnés.

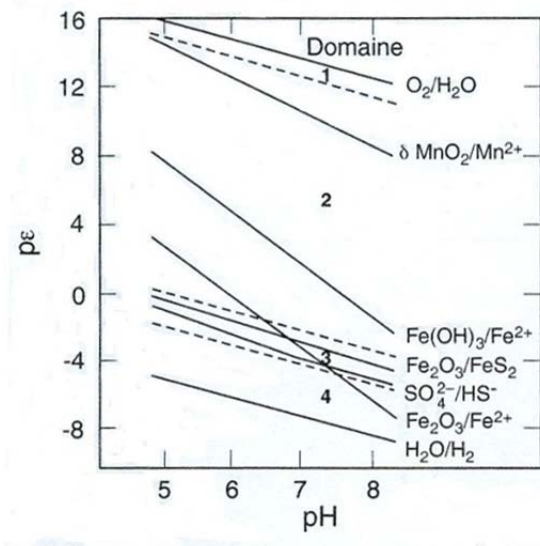
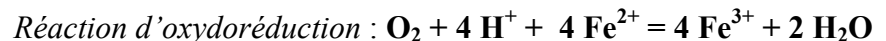
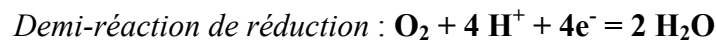


Figure 1.5 : Diagramme de Pourbaix délimitant les domaines d'intensité d'oxydoréduction représentatifs dans les eaux souterraines et le système sédiments-eau. Source : Sigg *et al.*, 2006, p.292, figure 8.6.

L'oxydation et la réduction sont respectivement nommées des demi-réactions et la combinaison de ces dernières forment une réaction d'oxydoréduction. Voici, la réaction d'oxydoréduction de Fe dans l'eau :



Le $p\epsilon$ constitue un paramètre d'intensité pour un équilibre d'oxydoréduction, soit un bilan des électrons, et son calcul est :

$$p\epsilon = -\log\{e^-\}$$

Ainsi, un $p\epsilon$ faible indique une forte activité des électrons et des conditions réductrices, alors qu'un $p\epsilon$ élevé indique une faible activité des électrons et des conditions oxydantes (Sigg *et al.*, 2006). Dans la nature, un processus d'oxydoréduction peut être purement inorganique ou catalysé par les microorganismes.

Le $p\epsilon$ et le pH sont interdépendants et un accroissement de $p\epsilon$ s'accompagne d'une diminution de pH (Sigg *et al.*, 2006). Lors de la plupart des réactions de réduction, il

s'opère une consommation de protons qui génère une augmentation du pH jusqu'à environ 7 (Girard *et al.*, 2005). De fait, la réaction d'oxydoréduction du Fe montre que les protons H^+ servent à la production des molécules H_2O (Hill *et al.*, 2003). La présence de CO_2 dans le sol où des conditions de réductions prévalent, permet de tamponner le pH entre 6 et 7 par l'apport de H^+ de l'acide carbonique (H_2CO_3) qui se transforme en bicarbonate (HCO_3^-) (McBride, 1994). Il s'ensuit donc d'une production de l'alcalinité par la présence du bicarbonate HCO_3^- . Ainsi, ces deux facteurs, p_e et pH, contrôlent de manière prépondérante les propriétés physiques et chimiques du sol (Kabata-Pendias, 2001) et des eaux naturelles (Sigg *et al.*, 2006). De manière générale, la fraction la plus mobile des ions des ET se présente lorsque le pH et p_e ont de petites valeurs (Kabata-Pendias, 2001). Pour un environnement d'altération particulier dicté par p_e et pH, la réaction des ET diffère.

1.4.3 p_e dans les sols et les eaux souterraines

1.4.3.1 Mesure de p_e

Puisque p_e et pH sont des facteurs de contrôle importants sur l'hydrogéochimie, il est nécessaire de les mesurer. Étant donné que les réactions de transferts de H^+ sont rapides, la mesure du pH dans les solutions de sol et les eaux souterraines se réalise à l'aide d'une électrode qui témoigne de l'activité réelle de H^+ dans le milieu naturel. Ainsi, le pH est un paramètre mesuré de manière générale alors que p_e est plus rarement mesuré. La mesure de p_e nécessite l'utilisation d'une électrode Pt ou Au. De nombreuses espèces, qui jouent un rôle important comme oxydants ou réducteurs, telles qu' O_2 , N_2 , NH_4^+ , SO_4^{2-} et CH_4 , ne sont pas inertes à ce type d'électrode. Ainsi, il s'avère impossible de mesurer le potentiel d'oxydoréduction dans le cas où ces éléments dominent. Dans le domaine 1, les mesures de d'oxydoréduction sont fausses, puisque O_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , N_2 ne réagissent pas suffisamment avec l'électrode alors que pour les domaines 3 et 4, la possibilité de mesurer adéquatement le potentiel est meilleur puisque le système $Fe(OH)_{3(s)} - Fe^{2+}$ est généralement bien tamponné et relativement bien réactif avec l'électrode (**figure 1.5**). De surcroît, les transferts d'électrons constituent des réactions très lentes, et les milieux ne sont pas nécessairement à l'équilibre lors de la mesure. En conséquence, dans les eaux naturelles, il est préférable de calculer p_e à l'aide des mesures de concentration des espèces, telles que O_2 , Mn^{2+} , Fe^{2+} , $HS^- - SO_4^{2-}$, $CO_2 - CH_4$ (Sigg *et al.*, 2006).

1.4.3.2 *pe et matière organique dans les sols*

Les conditions de faible pe sont associées aux sols hydromorphes. Ainsi, plus le temps de saturation en eau est élevé, plus le pe est faible (**figure 1.6**). En outre, l'intensité des processus de réduction pour un sol submergé peut être contrôlée par la teneur en matière organique (MO) (Girard *et al.*, 2005). En fait, l'importation de MO exogènes dans un milieu naturel crée théoriquement des conditions favorables à la réduction en raison de l'apport des donneurs d'électrons suite à l'oxydation de MO et par l'établissement de conditions anaérobies causées par la consommation d'oxygène lors de la décomposition des MO par les microorganismes (Girard *et al.*, 2005). Dans un sol saturé, les bactéries anaérobies facultatives ou strictes prennent la place des bactéries aérobies, et la MO se décompose donc de plus en plus lentement.

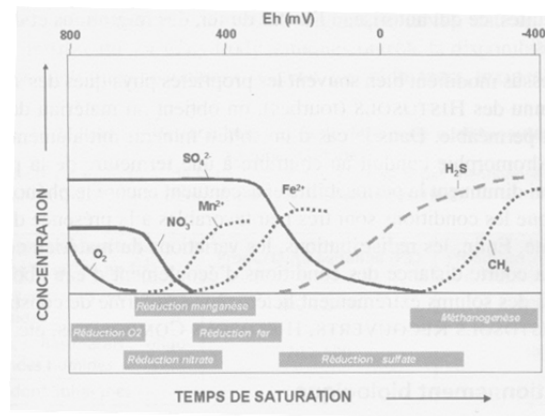


Figure 1.6 : Séquence de réduction dans la solution du sol à pH 7. « Les potentiels théoriques sont calculés en considérant que les activités des espèces oxydées et réduites sont égales, la pression de H_2 est fixée à 10^{-3} atmosphère. Les échelles de temps et de concentration sont arbitraires, variables selon les milieux et la température. » Source : Girard *et al.*, 2005, p.371, figure 16.1.

1.4.3.3 *pe et fixation physico-chimique dans les milieux humides*

Les conditions de faible pe sont associées aux milieux humides considérés comme des puits pour une majorité d'éléments (Freeman *et al.*, 1997; Lytle *et al.*, 1998). Les particules fines, la MO et les oxyhydroxydes de Fe et Mn sont abondants dans les milieux humides. Ils constituent des sites de fixation physico-chimique substantiels ce qui confère aux milieux humides leur fonction de puits pour plusieurs ET dans les sols (Girard *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2010). Toutefois, il est de plus en plus admis que les milieux humides peuvent

menacer la qualité de l'eau en raison, entre autres, de la présence de processus tels que l'oxydoréduction, influencés par le régime hydrologique, qui génèrent une variabilité dans la rétention et le relâchement des ET dans ces milieux (Olivie-Lauquet *et al.*, 2001). Ainsi, les milieux humides peuvent également constituer des sources d'éléments pour les milieux en aval. Le développement de processus d'oxydoréduction peut modifier les propriétés des sites d'adsorption en fonction de l'environnement physico-chimique, le pH et MO. Ainsi, en condition oxydante, de grandes surfaces d'adsorption se créent en raison de l'adsorption de solutés ou de colloïdes sur les oxyhydroxydes. Par exemple, lorsque la roche s'altère et relâche Fe et Mn, ils précipitent sous forme d'oxydes. Ces oxydes de Fe et Mn possèdent de grandes surfaces spécifiques et ils peuvent adsorber des ions métalliques, les anions inorganiques dont les phosphates et les anions d'acides organiques (Sigg *et al.*, 2006). Lorsque les conditions aérobies prévalent, les oxydes de Fe (Fe^{3+}) agissent donc comme un réservoir d'éléments alors que pour des conditions anoxiques, le fer est solubilisé (Fe^{2+}) et relâche les éléments précédemment adsorbés. En conditions réductrices, la séquence de réduction des éléments va comme suit en ordre chronologique : 1) réduction des nitrates (NO_3^-) en diazote (N_2); 2) réduction des oxydes de manganèses (Mn^{4+}) en Mn^{2+} ; 3) réduction des oxydes de fer (Fe^{3+}) en Fe^{2+} ; 4) réduction des sulfates (SO_4^{2-}) en sulfures (H_2S) et 5) réduction du dioxyde de carbone (CO_2) en méthane (CH_4) (**figure 1.6**).

1.4.4 Altération et mobilisation pédogénétique des éléments traces

Au fur et à mesure que la pédogenèse se réalise, le statut des ET change. Le devenir des ET mobilisés par la dissolution à partir du matériel parental dépend, entre autres, du système chimique du sol. Ce système chimique est en partie caractérisé par les variations saisonnière et spatiale des principales variables influentes telles que pH et p_e, la transformation des espèces telles que les réactions de transfert d'électrons, les réactions d'échange de ligand, les réactions organométalliques et les biotransformations ainsi que le biorecyclage et la bioaccumulation (Kabata-Pendias, 2001). Malgré l'existence d'autres facteurs de mobilisation dans le bassin versant de l'Hermine, quatre facteurs de mobilisation principaux interviennent et sont mesurés complètement ou partiellement dans le cadre de cette maîtrise. Ainsi, les variables d'intérêt sont le pH, le potentiel d'oxydoréduction par le biais de la mesure de l'oxygène dissous (OD) pour la NP présente

et accessible, le carbone organique dissous (COD) et le statut hydrique du sol (profondeur de NP). De fait, la diversité des espèces ioniques des ET et leurs affinités particulières pour les ligands inorganiques et organiques rend possible la dissolution de chaque élément pour une vaste gamme de pH et p_e (Kabata-Pendias, 2001). Malgré la multiplicité des variables influentes sur les ET, un intérêt particulier est porté aux processus d'oxydoréduction et au COD, spécifiquement dans les milieux humides. L'influence du pH sera considérée dans les analyses mais n'est pas traité dans cette partie.

1.4.4.1 p_e et éléments traces dans les milieux humides

Certains ET comme Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} et Pb^{2+} (Essington, 2004) se retrouvent dans l'environnement sous un seul état d'oxydation dans les sols, soit l'état oxydé. Toutefois, plusieurs ET sont sensibles au potentiel d'oxydoréduction sous la gamme de conditions d'oxydoréduction observables en milieu naturel. C'est le cas, entre autres, de As qui se retrouve sous les états d'oxydation As^{III} et As^V comme les espèces arsénite ($HAsO_3^{2-}$) et arsenate ($H_2AsO_4^-$ et $HAsO_4^{2-}$) (Essington, 2004). Une étude réalisée dans des marais estuariens relativement pollués fait le lien entre la position de la NP et la concentration de certains ET (Du Laing *et al.*, 2009). Pour la partie du profil qui est baignée par la NP, et où des conditions réductrices prévalent, Ni est mobilisé alors que Cu, Zn et Cd sont mobilisés lorsque la NP est basse, sous des conditions oxydantes, et lorsque les conditions de salinité sont élevées. En somme, puisque les milieux humides peuvent constituer un apport important d'eau lors d'un événement de précipitation et qu'ils constituent des milieux où les processus d'oxydoréduction peuvent dominer le comportement des ET, il devient important de comprendre la biogéochimie d'un tel milieu dans une perspective de suivi de qualité de l'eau.

1.4.4.2 Carbone organique et éléments traces

Le COD des milieux humides joue un rôle important de sorte qu'il peut déterminer si un environnement constitue un puits ou une source d'ET (Olivie-Lauquet *et al.*, 2001; Kerr *et al.*, 2008). Le COD est composé d'un mélange allant des acides organiques de faible masse moléculaire aux substances humiques issues du lessivage et de la décomposition de tissus végétaux et de matière organique (Strobel *et al.*, 2001). Sur le plan nutritionnel, le COD sert de source de carbone pour les microorganismes et il contribue à mobiliser, complexer

et transporter des nutriments et des ET (Strobel *et al.*, 2001). Les substances humiques, acides humiques, fulviques et les humines, sont les plus stables. Les molécules de substances humiques sont composées d'un grand nombre de groupes fonctionnels (OH, C=C, COOH, SH, CO₂H) qui possèdent une grande affinité pour les ions métalliques et des cations (Kabata-Pendias, 2001). Pour la phase aqueuse du sol, les composés organiques et l'eau constituent les ligands les plus abondants et conséquemment l'hydrolyse et la complexation organique constituent les réactions les plus communes dans les solutions de sols (Kabata-Pendias, 2001). Les substances humiques exercent un effet stabilisateur sur les processus environnementaux et, par conséquent, ils se comportent comme un réservoir de nutriments traces et de contaminants. La MO peut ainsi agir comme un important régulateur de la mobilité des ET dans les sols.

1.4.5 Transport des éléments traces

Le transport des ET peut s'effectuer soit par diffusion à travers la solution de sol ou par le mouvement de cette solution de sol (écoulement massif, lessivage) (Kabata-Pendias, 2001). Pour les milieux tempérés, froids et humides, comme à l'Hermine, où les précipitations sont plus élevées que l'évaporation, le lessivage des ET vers le bas du profil est supérieur à leur accumulation, à moins qu'il y ait un apport important de ces éléments dans le sol (Kabata-Pendias, 2001; Gobat *et al.*, 2003). En outre, ce lessivage peut être substantiellement gêné par l'adsorption des éléments dissous sur les particules de sols. Pour ces milieux, c'est la migration descendante de l'eau qui domine, bien que les transferts latéraux existent et dépendent des conditions locales, p. ex. la pente et la perméabilité du socle rocheux sous-jacent (Gobat *et al.*, 2003). Bien que l'eau exerce un contrôle important sur le transport des ET, les facteurs chimiques de cette eau et du milieu environnant assurent également le transport des ET. La réponse hydrochimique des ET d'un cours d'eau est influencée par une série de facteurs autant physiques que chimiques qui génèrent une désorption des ET précédemment accumulés dans les sols.

1.4.6 Perspectives sur l'utilisation des ET

À la lumière de la prépondérance de facteurs de mobilisation des ET tels que pH, p_e, COD et le statut hydrique dans certains milieux naturels, tels que les milieux humides et les versants, il est légitime de penser que des unités topo-hydrologiques dans un bassin versant

peuvent influencer différemment le relâchement et la rétention des ET lors d'un apport de pluie. En réalité, certaines parties du bassin versant peuvent constituer des puits ou des sources d'ET en fonction des différents moments de l'année (Girard *et al.*, 2005). L'emploi des ET dans les mesures hydrogéochimiques pour améliorer la compréhension de l'écoulement de l'eau dans les sols, reste marginal, bien que de plus en plus d'études s'y attardent. Au vu de la haute sensibilité des ET à l'égard des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, il est à prévoir que la signature de certaines sources par les ET puisse être brouillée en raison de transformations physico-chimiques des ET lors du transport de la source vers le cours d'eau. Ce non conservatisme est également présent chez les éléments majeurs. Toutefois, vu la diversité du comportement des ET en fonction du COD, pH et p_e et conditions hydriques, ils constituent *a priori* des éléments ayant le potentiel de signer des compartiments tant sur le plan vertical selon les différents horizons que sur le plan horizontal selon des aires humides ou sèches.

1.5 Synthèse des sources en eau et approche méthodologique pour le bassin versant de l'Herminie

1.5.1 Sources en eau et écoulement dans le bassin versant de l'Herminie

La structure de ce projet de maîtrise s'appuie en partie sur des travaux scientifiques antérieurs réalisés à l'Herminie. En effet, l'identification des sources contributrices potentielles en eau repose sur ces travaux. À la **figure 1.7**, les cercles permettent de spatialiser les sources contributrices sur le plan horizontal alors que les flèches permettent de temporaliser l'écoulement sur le plan vertical. L'amalgame de ces deux composantes de l'écoulement permet d'identifier les types d'écoulement préférentiel qui s'opère lors d'une connexion hydrologique. Certaines sources ciblées par les auteurs, telles que la zone humide amont et la zone humide nord, n'ont pas été échantillonnées pour en mesurer la composition chimique. Ces deux milieux humides portent potentiellement une signature géochimique particulière donné par les ET sensibles aux conditions de faible p_e , pour peu que des conditions réductrices y prévalent. Or, il devient nécessaire d'intégrer ces zones contributrices au sein du modèle conceptuel d'écoulement à l'Herminie et ainsi d'en mesurer le rôle particulier dans le relâchement et la rétention des ET à l'Herminie. La méthodologie qui suit permet cette intégration.

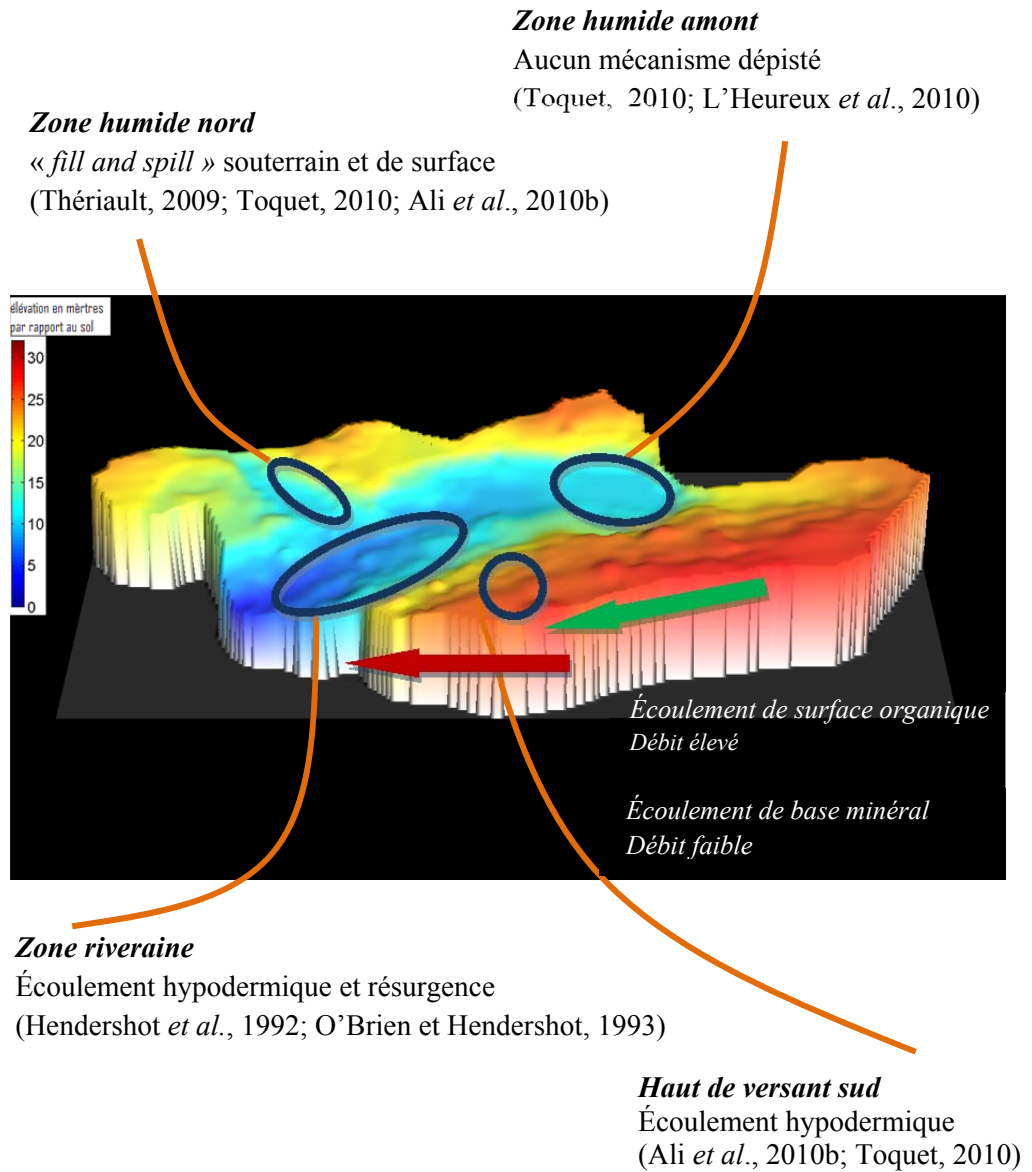


Figure 1.7 : Sources contributrices au cours d'eau sur les plans vertical (flèches) et horizontal (cercles) du bassin versant de l'Herminie et leurs mécanismes respectifs d'écoulement identifiés dans des publications scientifiques.

1.5.2 Élaboration d'un cadre méthodologique intégré de détection de la connectivité hydrologique

Sur le plan théorique, les définitions de la connectivité hydrologique (c.-à-d. associées au flux hydrique) et écologique (c.-à-d. associées au flux de matière) sont intimement liées. Cette interdépendance peut se concrétiser sur le plan pratique, pour peu que des mesures hydrologiques et hydrogéochimiques intégrées puissent être réalisées dans un même cadre méthodologique. En raison du caractère dynamique de la connectivité hydrologique, c.-à-d. l'alternance entre connexion et déconnexion, Ali et Roy (2009) suggèrent que la mesure de cette dernière se réalise à une échelle temporelle fine afin de permettre l'échantillonnage de ces instants névralgiques. À l'échelle du bassin versant, un événement pluvial constitue un apport d'eau qui peut permettre l'activation de la connectivité hydrologique. Il est admis que l'échantillonnage aux échelles temporelles quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou annuelle ne permet pas d'intégrer les conséquences immédiates d'un apport de précipitation sur le bassin, tel que le permet un échantillonnage à l'échelle événementielle. Sur le plan spatial, il est préférable que les mesures hydrologiques se réalisent dans un petit bassin versant où une dense instrumentation permet de mesurer la corrélation spatiale, soit le continuum, d'une variable hydrologique. Il est donc tout à propos de mesurer les variables hydrogéochimiques également sur une même base événementielle. Ainsi, la combinaison des mesures hydrologiques et géochimiques pour un petit bassin versant de premier ordre durant un événement de précipitation constitue un cadre méthodologique théorique adapté pour détecter la connectivité hydrologique.

Chapitre 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs de la recherche

Ce projet de recherche a pour objectif global d'améliorer la compréhension des mécanismes contrôlant l'écoulement de l'eau et la production des débits de crue dans un petit bassin forestier en combinant des mesures hydrologiques et géochimiques. Il vise à mesurer la connectivité hydrologique à l'aide du comportement de la NP et à tester le potentiel des ET pour l'identification des sources et des patrons de connexion et déconnexion hydrologique. Trois objectifs spécifiques structurent ce projet de maîtrise.

Le premier objectif est de nature hydrologique et consiste en l'identification des hydrotopes et des connexions hydrologiques dans le bassin de l'Hermine. Le jeu de données utilisé est composé de profondeurs de NP mesurées à l'échelle hebdomadaire et à une échelle plus serrée pour deux événements de précipitation (n = 50 mesures des puits). La spatialisation de neuf analyses différentes servira à déceler les hydrotopes. Afin de détecter la connectivité hydrologique, nous représentons les séries temporelles des patrons spatiaux de hauteur de la NP de deux événements de précipitation. Cette approche hydrologique unique consiste en un suivi à haute densité spatiale et à fréquence temporelle élevée du niveau de la NP en utilisant un réseau de 94 puits. Une estimation de la vitesse et du débit de l'écoulement souterrain à l'endroit des connexions est réalisée lors du maximum de connectivité hydrologique. Les mécanismes d'enclenchement de la connectivité hydrologique sont explorés. Des hypothèses quant aux sources des eaux de ruissellement durant une crue sont ensuite formulées.

Le deuxième objectif est de nature géochimique et consiste en l'identification de la variabilité spatio-temporelle et la signature géochimique des cinq sources potentielles en eau ciblées à l'aide des éléments majeurs (COD-CE-Fe-H-Mn-OD-Si) et traces (As-Ba-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Ni-Pb-Rb-Se-Sr-Tl-V-Y-Zn). Les jeux de données proviennent des échantillons recueillis dans les sources en eau potentielles durant un événement de précipitation en 2010.

Le troisième objectif est de nature hydrochimique et géochimique et vise à cibler la contribution spatio-temporelle respective des sources en eau du bassin lors de l'événement de précipitation 2010. Pour ce faire, nous utiliserons des analyses hydrochimiques dans le cours d'eau, les signatures géochimiques des sources en eau et l'évolution des zones pédohydrologiques dans le bassin. En outre, les graphiques de mélange permettent de comprendre d'un point de vue qualitatif l'influence de l'écoulement de l'eau dans un horizon sur l'hydrochimie à l'exutoire. Le jeu de données utilisé est composé de 29 échantillons pris à l'exutoire durant un événement de pluie 2010.

2.2 Site à l'étude

2.2.1 Portrait géologique et sédimentologique

Le bassin versant de l'Herminie est situé dans la partie méridionale du Bouclier canadien du Québec au Canada à St-Hippolyte, à 80 km au nord Montréal (45°59' N, 74°01' W, altitude de 400 m) (**figure 2.1**). Le lieu d'étude, dont la superficie est de 5,1 ha (0,051 km²), fait partie de la Station de Biologie des Laurentides (SBL) de l'Université de Montréal. Une différence de 31 m existe entre l'exutoire et le plus haut point du bassin (Ali *et al.*, 2010a). Le socle rocheux est composé d'anorthosite du Précambrien de la série de Morin sur lequel repose un till de fond glaciaire d'environ un à deux mètres d'épaisseur à l'exception de la présence d'affleurements rocheux. Un till d'ablation est sus-jacent au till de fond plus dense. La minéralogie de ces derniers est similaire à celle du substrat rocheux, c.-à-d. composée majoritairement de quartz avec des feldspaths plagioclases et alcalin (feldspath-K) (Courchesne *et al.*, 2005).

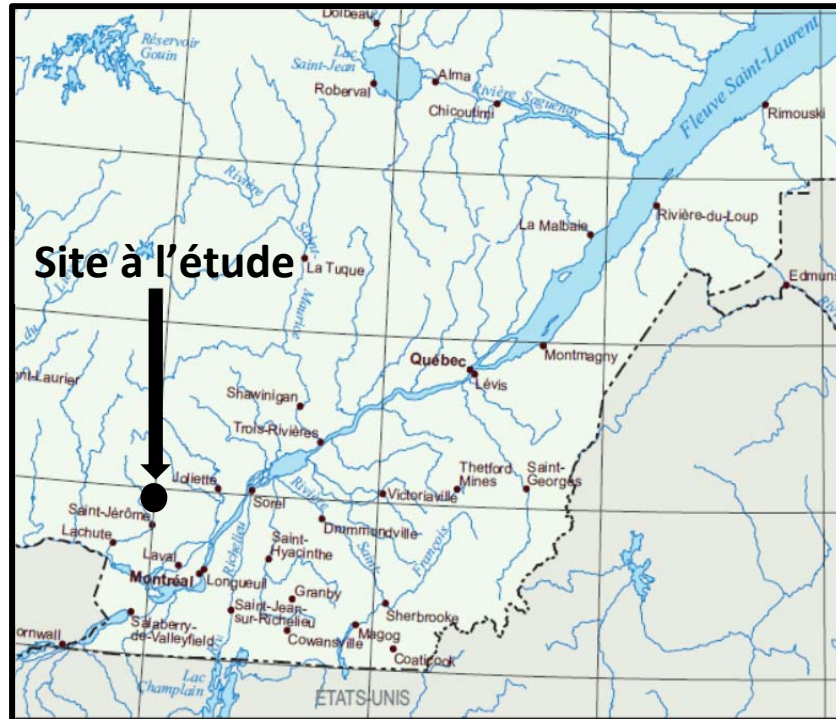


Figure 2.1 : Localisation du bassin versant de l'Hermine. Source : MRNF, 2006.

2.2.2 Portrait hydrologique

Le bassin versant de l'Hermine est drainé par un cours d'eau intermittent. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 1 150 mm (+/-136 mm) depuis les 30 dernières années dont 30 % chute sous la forme solide (Biron *et al.*, 1999). Les températures journalières moyennes les plus élevées sont observées au mois de juillet (+25°C), alors que les minima moyens sont mesurés au mois de janvier (-30°C). Le système hydrologique du bassin versant est marqué par la non linéarité entre les précipitations et l'écoulement dans les versants (Ali *et al.*, 2010a). La présence d'écoulement hortonien dans le bassin est considérée comme peu probable en raison de la haute capacité d'interception de la canopée durant la saison de croissance, de la haute capacité d'infiltration du sol et de l'évapotranspiration estivale. La présence d'une NP perchée durant des périodes humides appuie un probable écoulement latéral suite à une précipitation importante (Ali *et al.*, 2010a). Pour les 12 dernières années, des mesures de NP réalisées à neufs endroits, respectivement dans la zone riveraine, la mi-pente et le haut de versant, montrent une fluctuation de NP entre la surface et 108 cm dans le sol avec une moyenne de profondeur de 68 cm (Ali *et al.*, 2010a). Les saisons hydrologiquement actives s'étendent de la fin du

printemps jusqu'à la fin de l'automne et le début de l'hiver. La transpiration est minimale entre octobre et avril et ainsi, les changements de l'humidité du sol et de la NP sont principalement gouvernés par des mouvements de drainage vers le bas de pente. On distingue deux zones humides dans le bassin : la zone humide amont (ZHA) et la zone humide située sur le versant nord (ZHN). Deux rigoles intermittentes sont observables dans la zone à l'étude, soit la rigole amont (RA) qui se jette dans la ZHA et la rigole nord (RN) qui draine la ZHN. Un tel écoulement épidermique se rencontre lors d'événements pluviaux. Au chapitre 1, des zones d'écoulement souterrain préférentiel potentiel ont été mises en lumière, telles que le bas de versant sud (BVS), le haut de versant sud (HVS), le haut de versant nord (HVN) et la zone riveraine (**figure 2.2**).

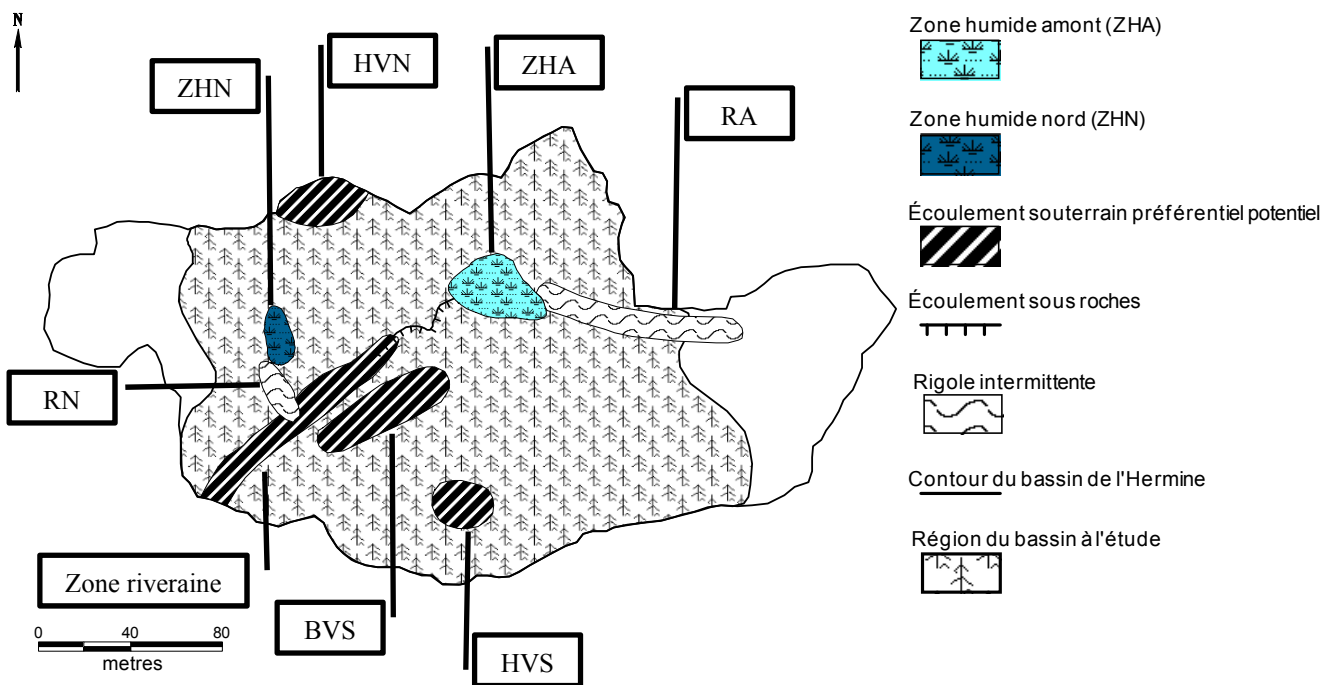


Figure 2.2 : Spatialisation des trois différents types d'éléments hydrologiques dans le bassin versant de l'Herminie, soit les zones humides incluant la zone humide amont (ZHA) et la zone humide nord (ZHN), les rigoles intermittentes comprenant la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA), ainsi que les zones d'écoulement souterrain préférentiel potentiel incluant le haut de versant sud (HVS), le bas de versant sud (BVS), le haut de versant nord (HVN) et la zone riveraine.

2.2.3 Portrait pédologique

Dans le till sableux se sont développés des podzols ferro-humiques et humo-ferriques gleyifiés ou orthiques (Turmel *et al.*, 2005). À partir d'une description morphologique de 16 profils de sol, de l'observation visuelle des conditions de drainage et de la topographie dans le bassin de l'Herminie, quatre unités pédogéomorphologiques sont identifiées par Savoie (1988) (**figure 2.3**). L'unité 1, associée à la zone riveraine et les sous-bassins, est représentée par des podzols ferro-humiques et humo-ferriques gleyifiés (5 % du bassin); l'unité 2, associée à un replat de fond de bassin, est représentée par des podzols ferro-humiques gleyifiés (5 % du bassin); l'unité 3 s'apparente à une zone s'étendant du bas vers le haut du versant nord-est et est représentée par des podzols humo-ferriques orthiques (15 % du bassin) et l'unité 4 s'apparente au restant du bassin dont les pentes peuvent être douces ou abruptes. Elle est caractérisée par des sols podzols ferro-humiques gleyifiés ou des folisols sur les affleurements rocheux (75 % du bassin) (Savoie, 1988). Les sols acides de l'Herminie comprennent une densité de macroorganismes relativement faible, et conséquemment la perturbation biologique des horizons est peu manifeste. Un horizon compact de type fragique spatialement discontinu se situe entre 50 et 75 cm de profondeur dans le bassin. L'impact biologique et hydrologique de ce dernier est peu connu. Toutefois, il est possible de souligner les impacts potentiels de cet horizon : 1) diminution de la pénétration racinaire; 2) réduction de l'infiltration de l'eau dans les horizons sous-jacents en fonction du niveau d'humidité et 3) augmentation de la probabilité d'un écoulement hypodermique latéral. Ainsi, les sols de l'Herminie présentent une horizonation différenciée tant sur le plan géochimique que physique en raison de : 1) la nature podzolique des sols; 2) la présence d'un horizon compact discontinu et 3) l'existence potentielle d'un gradient de conductivité hydraulique croissant vers la surface, propre aux tills glaciaires (Rodhe, 1989; Kendall *et al.*, 1999; Cory *et al.*, 2007)

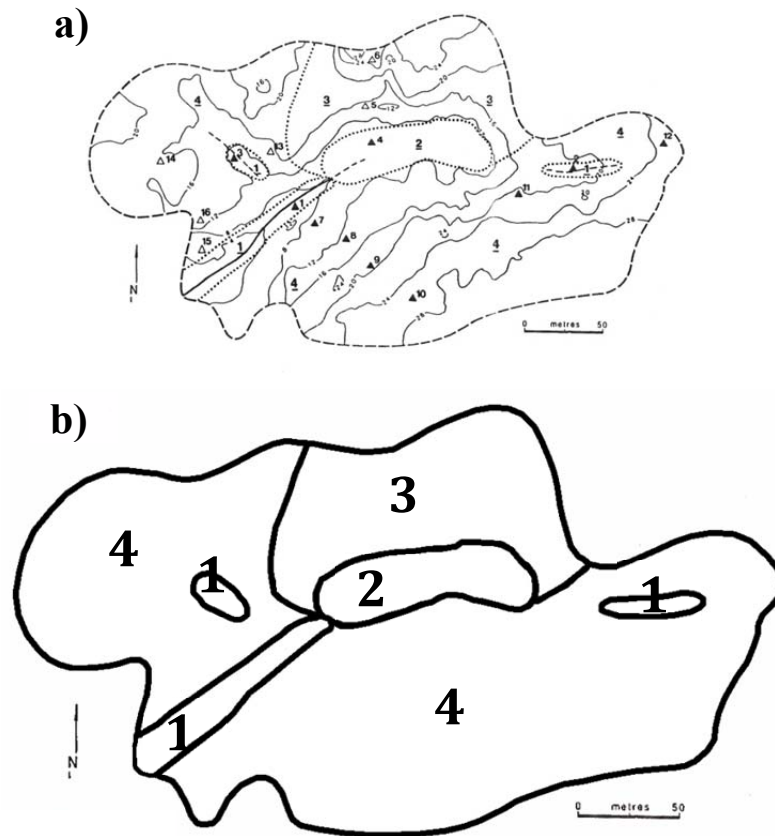


Figure 2.3 : a) Carte originale de Savoie (1988) du bassin versant de l'Herminie incluant la localisation des profils décrits et la délimitation des unités pédogéomorphologiques. Les triangles noirs représentent les profils de sol complètement échantillonnés et les triangles vides représentent les profils de sol partiellement échantillonnés. b) Carte modifiée du bassin versant de l'Herminie montrant clairement la délimitation des quatre unités pédogéomorphologiques. Source : Savoie, 1988, p.78.

2.2.4 Portrait floristique

La couverture végétale du bassin de l'Herminie est composée majoritairement d'espèces décidues dont 78 % de la surface terrière est composée d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), 9 % d'hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrn.) et 6 % de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) (Turmel *et al.*, 2005). Les espèces compagnes sont le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) et le peuplier à grandes dents (*Populus*

grandidentata Michx.) (Courchesne *et al.*, 2001). La composition floristique n'est pas uniforme pour l'ensemble du bassin. En effet, les espèces pionnières telles que les peupliers faux-tremble et à grandes dents et le bouleau blanc se concentrent en haut de versant tandis que les espèces non pionnières, telles que l'érable à sucre et le bouleau jaune, se regroupent en bas de versant (Ali *et al.*, 2010b). Au début du XX^e siècle, le bassin de l'Herminie a été soumis à une coupe forestière ou un feu (Bélanger *et al.*, 2002).

La forêt domine l'ensemble du bassin à l'exception d'un large replat humide de bas de versant à l'amont du bassin, nommé « kettle » par Ali *et al.* (2010b). Cette zone est représentée par l'unité 2 de Savoie (1988) (**figure 2.3**) et est nommé « zone humide amont » (ZHA) pour le reste du mémoire (**figure 2.2**). Quelques arbres y poussent. L'expression claire d'un gradient de végétation allant d'une dominance des strates muscinale et herbacée à l'est (en amont) vers une dominance de la strate arbustive vers l'ouest (en aval), révèle la présence d'un gradient d'humidité. Les strates muscinale et herbacée comprennent, entre autres, des hépatiques (*Hepatica* spp.), une thalle de sphaignes (*Sphagnum* spp.), des gaillets (*Galium* spp.), des fougères (*Osmunda* spp.) et des plantes graminoides sur une surface de matière organique noire gorgée d'eau alors que les roches sont couvertes par des hypnes (*Pleurozium schreberi* BSG.) et les oxalides de montagne (*Oxalis montana* Raf.) (**figure 2.4**). La présence de ces deux strates s'atténue à mesure qu'on se dirige à l'ouest (en aval) où les viornes à feuilles d'aulne (*Viburnum alnifolium* Marsh.) s'imposent sur ce terrain plus montueux et sec. La présence de végétaux de l'embranchement des bryophytes, tels que les hépatiques et les sphaignes, indique une présence forte d'humidité en raison de leur mode d'alimentation et/ou de reproduction tributaire de l'eau (Raven *et al.*, 2000; Payette et Rochefort, 2001).

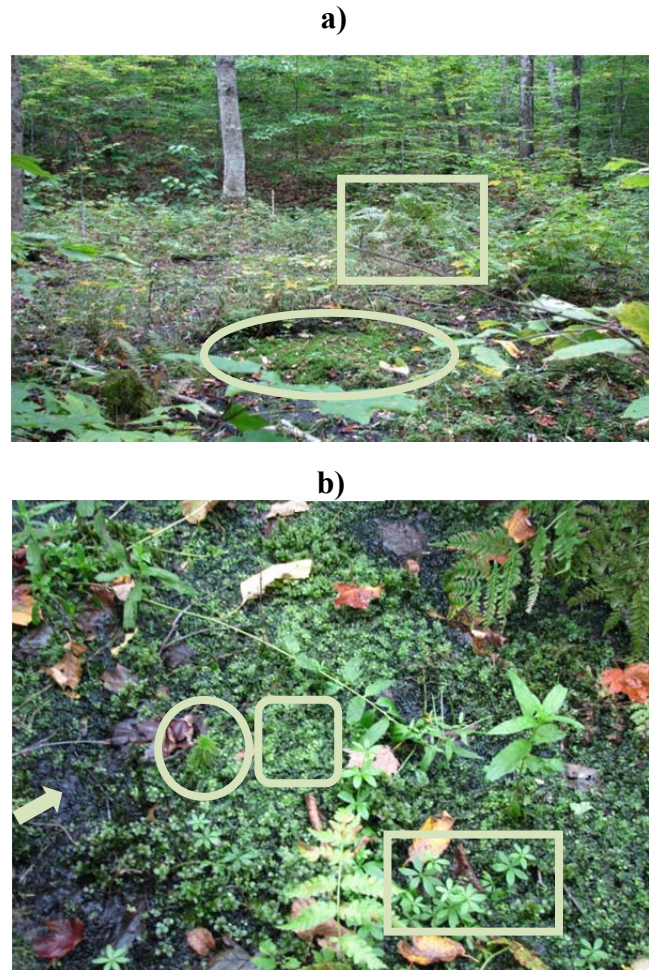


Figure 2.4 : a) Vue de la partie la plus humide de ZHA à partir du puits H87 (bas de versant). Le cercle délimite une colonie de sphaignes (*Sphagnum* spp.) alors que le rectangle délimite des fougères. b) Vue du substrat de surface et de la végétation de surface dans la partie la plus humide de ZHA. Le cercle délimite une sphaigne (*Sphagnum* spp.), le carré délimite les gaillets (*Gallium* spp.), le rectangle émoussé délimite une section d'hépatiques (*Hepatica* spp.) et la flèche montre le substrat noir gorgé d'eau. Photos prises par Caroline L'Heureux 2010-09-23.

2.3 Échelle temporelle d'échantillonnage

Deux types d'échelles temporelles d'échantillonnage sont employés dans ce projet, soit les échelles événementielle et hebdomadaire. L'échantillonnage événementiel s'est effectué pour deux événements pluviaux automnaux. La saison automnale a été choisie en raison de la faible évapotranspiration induite par la senescence des plantes vasculaires, permettant une probable réponse hydrologique plus prononcée que durant la période la plus active sur le plan biologique en été. En outre, la comparaison de deux événements de même saison permet d'écartier les dissemblances de conditions physiques liées à la saisonnalité. Pour

l'événement 2009, les précipitations ont débuté à 13h45 le 23 octobre 2009 et se sont terminées à 13h35 le 24 octobre 2009 et les mesures se sont étalées sur une période allant du 23 au 27 octobre 2009. L'événement de précipitation 2010 a débuté à 9h15 le 30 septembre et s'est arrêté à 21h15 le 30 septembre 2010 et les mesures ont été prises durant la période allant du 30 septembre au 4 octobre. Les caractéristiques des deux événements sont résumées au **tableau 2.1**. L'événement 2009 comprend neuf périodes de mesure de la NP incluant les conditions antécédentes d'humidité (CAH) quelques heures avant le début de la pluie, les temps de mesure 1 à 7 durant l'événement de pluie et quelques heures suivant l'arrêt de la pluie et le temps de mesure 8, soit deux jours après l'événement. L'événement 2010 comprend neuf temps de mesures de NP incluant la mesure des CAH deux jours avant le début de la pluie c.-à-d. lors d'un autre événement de pluie, les temps de mesure 1 à 7 durant l'événement de pluie et quelques heures suivant l'arrêt de la pluie, et le temps de mesure 8, soit trois jours après l'événement.

Ces deux événements ont été échantillonnés et choisis en raison de leur contraste de CAH. Les CAH sont décelées par le pourcentage de puits où la nappe phréatique était présente. Pour l'événement 2010, les CAH deux jours avant le début de la pluie (CAH2), présentent un haut pourcentage de puits humides (90 %). De fait, un événement de précipitation a précédé l'événement 2010. Les conditions d'humidité (CH) au temps 1, soit après l'arrivée des 11 premiers millimètres de pluie, montrent également un haut pourcentage (80 %). Pour l'événement 2009, les CAH et les CH au temps 1 sont de 27 %, ce qui est inférieur aux valeurs de l'événement 2010. De fait, des conditions de faibles précipitations antécédentes (PA) ont prévalu pour l'événement 2009. La différence entre les valeurs des caractéristiques de 2010 et 2009 (**tableau 2.1**) permet de mettre en lumière que : 1) les CAH sont plus élevées pour 2010 que pour 2009; 2) les précipitations antécédentes (PAx) sont plus élevées pour 2010 que pour 2009; 3) la quantité de précipitation totale de 2010 est plus élevée que celle de 2009; 4) le débit initial avant le début de la pluie de 2010 est plus élevé de plus d'un ordre de grandeur que le débit maximal de 2009 ; 5) le débit maximal de 2010 est beaucoup plus élevé que celui de 2009 et 6) les températures sont plus élevées en 2010 qu'en 2009.

Tableau 2.1: Résumé des caractéristiques des deux événements de précipitation. Toutes les caractéristiques « antécédentes » sont estimées à partir du temps 1 d'échantillonnage de la nappe phréatique. Les valeurs de CAH et CH sont le pourcentage de puits pour lesquels la présence de l'eau de la nappe phréatique a été décelée.

CARACTÉRISTIQUES	Événement 2009	Événement 2010	Différence entre 2010 et 2009
CAH avant précipitation (% puits humides)	27	ND	ND
CH Temps1 (% puits humides)	27	80	53
CAH2 ^a (% puits humides)	ND	90	ND
CAH3 (% puits humides)	17	15	-2
CAH (13et10) respectivement (% puits humides)	28	12	-16
CH maximum (% puits humides)	91	98	6
PA1 ^b (mm)	0	11	11
PA2 (mm)	13	48	35
PA3 (mm)	13	77	64
PA5 (mm)	13	79	66
PA7 (mm)	13	106	93
PA14 (mm)	21	118	97
Précipitation totale ^c (mm)	31	44	13
Durée de la pluie (heures)	12	12	0
Débit initial avant début pluie (L/sec)	0,4	2,5	2,1
Débit initial au temps 1 (NP) (L/sec)	0,4	3,7	3,3
Débit maximum (L/sec)	1,8	24,9	23,1
TA1 ^d (°C)	-1,4	11,9	13,3
TA7 (°C)	2,4	11,7	9,3
Feuillage	Absence	Présence	ND

^aCAHx = conditions antécédentes d'humidité où x = nombre de jours antécédents.

^bPAx = précipitations antécédentes où x = nombre de jours antécédents.

^cRéfère aux précipitations liquides. Pour l'événement 2009, une faible neige est tombée mais n'est pas comptabilisée.

^dTAx = températures antécédentes où x = nombre de jours antécédents.

Afin d'élargir le spectre des conditions d'humidité, des mesures de NP ont également été réalisées à une fréquence hebdomadaire à l'automne 2009 (n = 8) et au cours de la période du printemps à l'automne 2010 (n = 25). Le nombre total de temps de mesures du niveau de la NP est donc 50. Le **tableau 2.2** illustre les principales caractéristiques des 50 mesures de NP.

Tableau 2.2: Statistiques descriptives des caractéristiques des 50 mesures de nappe phréatique effectuée entre l'automne 2009 et l'automne 2010 durant la période hydrologiquement active.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type	Coefficient de variation
% de puits humides	6	98	46	37	34	0,73
débit (L/sec)	0,03	24,98	2,37	0,61	4,63	1,95
PA1^a (mm)	0	75	14	5	18	1
TA1^b (°C)	-1,43	26,39	11,09	12,06	6,90	0,62

^aPAx = précipitations antécédentes où x = nombre de jours antécédents.

^bTAx = températures antécédentes où x = nombre de jours antécédents.

2.4 Collecte des données hydrologiques

2.4.1 Débit et précipitation

Le bassin versant de l'Hermine possède une station de jaugeage à son exutoire (**figure 2.6**). Le débit du ruisseau (Q) est mesuré à chaque 15 minutes à l'aide d'un capteur à ultrason de marque *STI* à l'endroit d'un déversoir triangulaire (90°). La quantité de précipitations incidentes est mesurée à chaque 15 minutes par la station météorologique du ministère de l'Environnement du Québec située sur le territoire de la SBL à environ 1 km du bassin versant à l'étude.

2.4.2 Profondeur de la nappe phréatique

À l'Herminie, les profondeurs de NP ont été mesurées à l'aide d'un réseau de 94 puits sur une aire qui couvre 60 % du bassin versant (**figure 2.5**). Les puits sont constitués d'un tuyau de plastique ABS¹ d'un diamètre de 2,5 cm qui sont perforés dans le bas sur 30 cm (environ 20 trous de 5 mm de diamètre) ce qui permet à l'eau de pénétrer dans le dispositif une fois qu'il est enfoncé dans le sol. Les tuyaux sont enfoncés dans le sol à une profondeur variant de 31,5 à 92 cm : 9 % se situent entre 35 à 50 cm, 53 % entre 50 à 70 cm et 38 % entre 70 à 92 cm (**figure 2.5**). La haute densité spatiale de 31 puits par hectare (100 m²), constitue une des caractéristiques originales du projet et permet de visualiser le comportement tridimensionnel de la zone saturée. La mesure a été effectuée à l'aide d'une sonde munie d'un capteur de conductivité qui émet un signal sonore au contact de l'eau. Durant un événement hydrologique, l'intervalle de temps entre les prises de mesures est d'environ cinq heures en excluant la mesure des CAH et des dernières périodes de mesure. Cette fréquence élevée de mesure permet de saisir avec précision les comportements hydrologiques de la zone saturée dans le bassin. Un total de neuf périodes de mesures de profondeurs de NP a été réalisé pour les événements 2009 et 2010. À l'échelle hebdomadaire, un total de 33 mesures ont été réalisées dont 8 pour l'année 2009 et 25 pour l'année 2010. Ainsi, le jeu de données complet comprend 50 mesures.

¹ Acronyme pour acrylonitrile butadiène styrène.

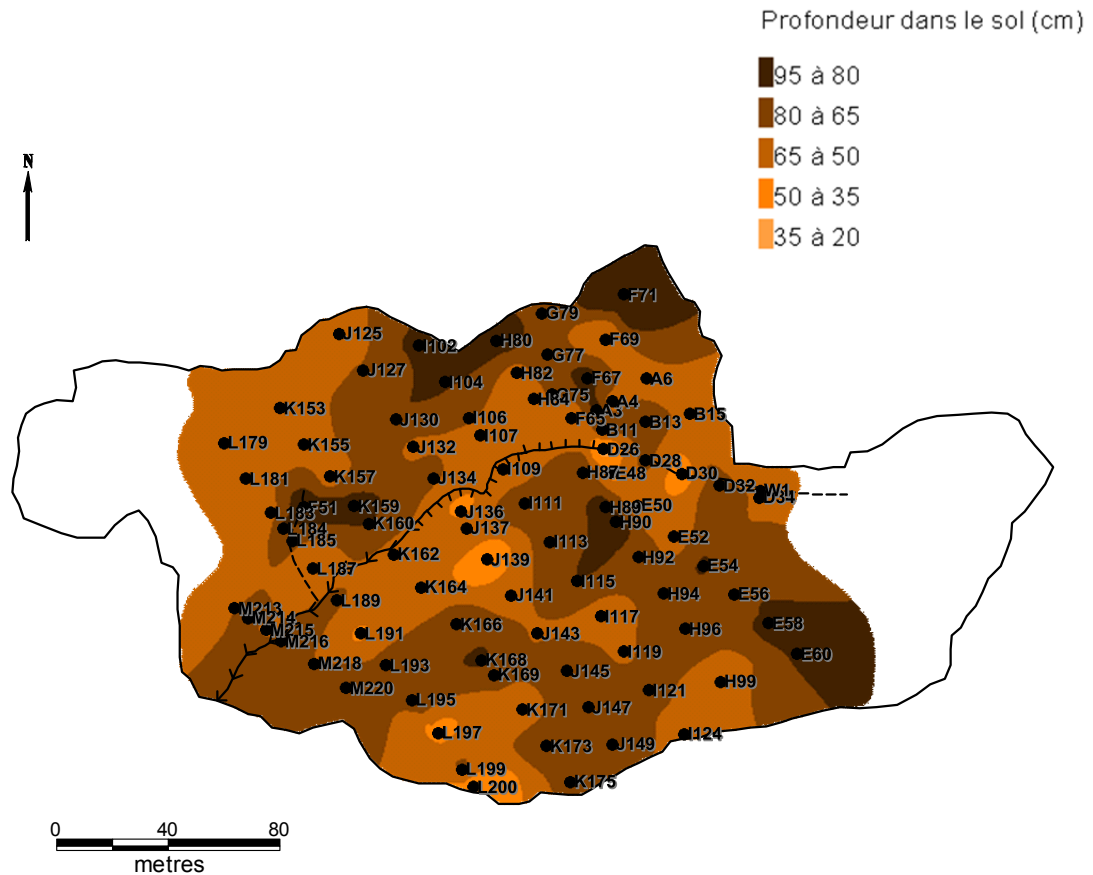


Figure 2.5: Interpolation à l'aide de l'algorithme du voisinage naturel simple, de la profondeur maximale de chaque puits de la zone à l'étude. Chaque puits est représenté par un cercle plein noir et identifié par une lettre et un nombre.

2.5 COLLECTE DES DONNÉES HYDROGÉOCHIMIQUES

2.5.1 Hydrochimie à l'exutoire

Pour l'événement 2010, des échantillons d'eau du ruisseau ont été recueillis à l'exutoire du bassin versant à chaque heure à l'aide d'un échantillonneur automatique *ManningPST* de 24 bouteilles de plastique inerte (**figure 2.6**). Cette fine résolution temporelle permet de saisir précisément la réponse des éléments dissous dans le cours d'eau pour l'événement pluvial 2010. À l'aide de la sonde oxymètre *YSI 550A*, des mesures d'oxygène dissous et de température ont été prises à cinq reprises durant l'événement à l'endroit de l'exutoire.

2.5.2 Géochimie des sources potentielles en eau

À la lumière des résultats des études antérieures réalisées à l'Hermine, cinq sources hypothétiques sont identifiées et échantillonnées lors de l'événement 2010 afin de comprendre la provenance de l'eau dans le cours d'eau. Les sources potentielles en eau sont : 1) l'eau de l'horizon organique LFH des sols bien drainés de haut et bas de versant; 2) l'eau de l'horizon B des sols bien drainés de haut et bas de versant; 3) la NP de l'horizon C des sols bien drainés de haut et bas de versant; 4) la NP de la zone humide amont (ZHA) et 5) la NP de la zone humide nord (ZHN). Afin de tester l'invariabilité spatiale et temporelle au sein d'une source, chacune d'elle dispose de plusieurs puits (collecteurs), et est échantillonnée à plusieurs reprises durant l'événement 2010. Il existe deux façons de prélever l'eau de ces sources, soit par l'eau libre de NP ou l'eau du sol. Toutes les sources ont été échantillonnées cinq fois pendant l'événement et une autre fois trois jours après la fin de la pluie ce qui permettait d'atteindre un nombre théorique d'échantillons de l'ordre de six fois le nombre de collecteurs. Toutefois, à certains moments, les collecteurs étaient secs. Le pluviolessivat n'est pas considéré comme une source en eau dans cette étude. De fait, le ruisseau occupe une faible superficie et un apport en eau sans contact avec le sol du bassin versant est considéré comme négligeable. À l'instar du pluviolessivat, l'écoulement le long des troncs des arbres n'est pas considéré puisque nous nous intéressons à la chimie de l'eau suite à son passage dans les différents horizons du sol.

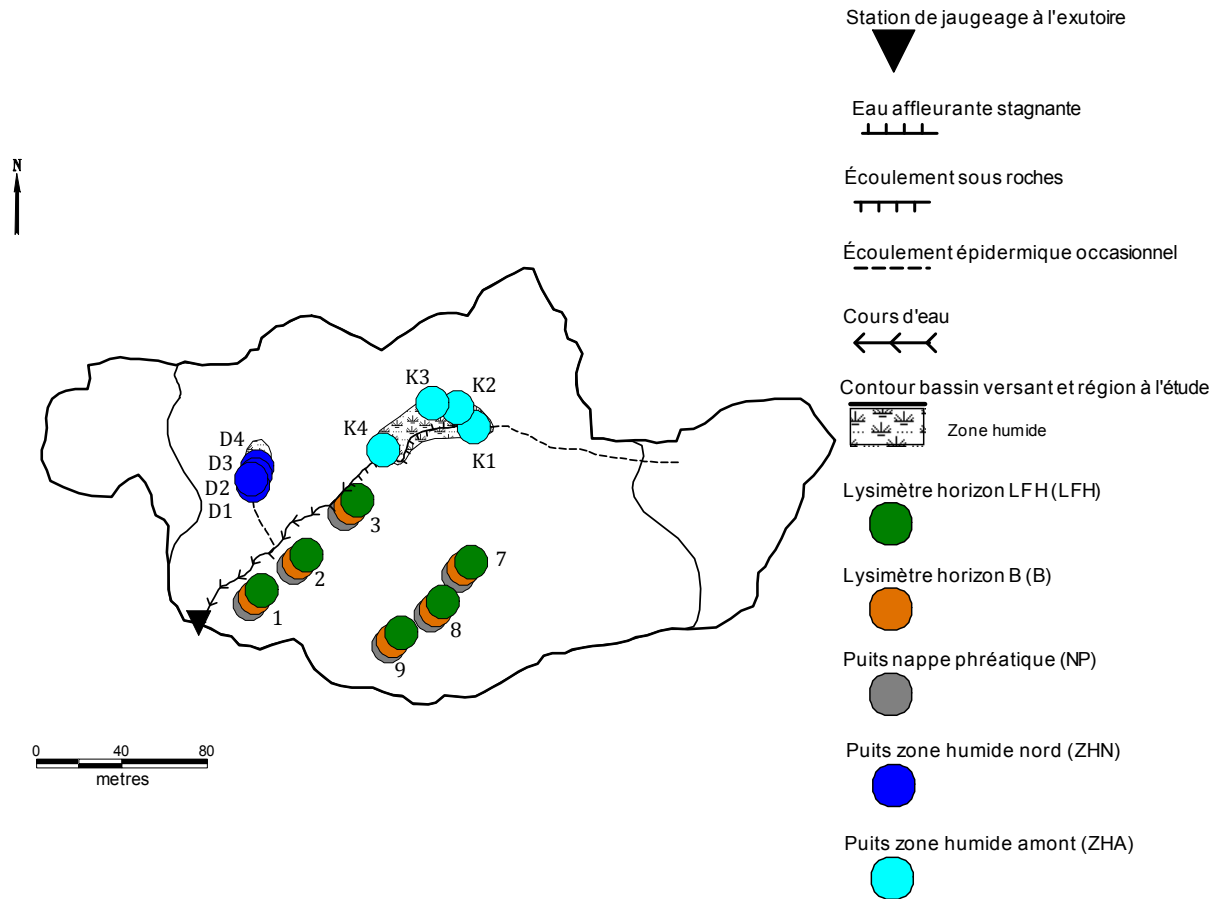


Figure 2.6 : Bassin versant de l’Hermine et les instruments utilisés pour récolter l’eau des sources potentielles en eau. Les stations 1, 2 et 3 représentent le bas de versant alors que les stations 7, 8 et 9 représentent le haut de versant.

2.5.2.1 Géochimie de la nappe phréatique

La nappe phréatique de l’horizon C de sol bien drainé est échantillonnée à l’aide de six puits, soit trois en bas de versant (stations 1, 2, 3) et trois en haut de versant (7, 8, 9) (**figure 2.6**). Les puits ont un diamètre de cinq cm et s’enfoncent dans le sol à une profondeur entre 70 à 130 cm. Un total de 18 échantillons a été pris durant l’événement. Les zones humides nord et amont constituent des zones humides où la NP est proche de la surface ou affleurante. Dans ces conditions, la mesure de la chimie de l’ensemble de la NP non confinée est suffisante même s’il peut y avoir des gradients chimiques le long d’un profil vertical. Ainsi, la chimie de ZHN et ZHA permet de vérifier la contribution de zones humides sur le plan horizontal dans le bassin. Pour chacune des deux zones humides, quatre puits de cinq cm de diamètre sont insérés dans le sol. Les puits K1, 2, 3 et D2, 3, 4 ont été

installés au printemps 2010 alors que K4 et D1 ont été installés il y a plus d'une dizaine d'années (**figure 2.6**). Les puits de ZHN ont une profondeur entre 20 et 30 cm à l'exception du puits D1 dont la profondeur est de 90 cm. Ceux de ZHA ont une profondeur entre 25 et 35 cm à l'exception du puits K4 dont la profondeur est de 80 cm. Un puits par zone humide, soit K1 pour ZHA et D3 pour ZHN, est dédié à la mesure de l'oxygène dissous (OD) et la température (**figure 2.7**). Les mesures se prennent *in situ* à l'aide d'une sonde oxymètre *YSI 550A*. Ces puits ont été choisis en raison de la présence continue de la NP à la surface du sol. Cette mesure permet d'estimer le potentiel d'oxydoréduction du milieu. Les mesures d'OD sont réalisées le long d'un profil vertical à 10, 20 et 30 cm à partir du fond, peu importe la hauteur d'eau dans le puits. L'eau des puits a été extraite à l'aide d'une pompe péristaltique et immédiatement bouchonnée dans des bouteilles de plastique inerte. Peu importe la profondeur des puits, l'échantillonnage de l'eau se fait à 10 cm du fond du puits. Ainsi, l'eau des sols humides a été échantillonnée 24 fois durant l'événement 2010. Durant cet événement, trois échantillonnages du débordement épidermique de ZHN ont été effectués à l'amont de RN, à l'aide d'une bouteille de plastique inerte.

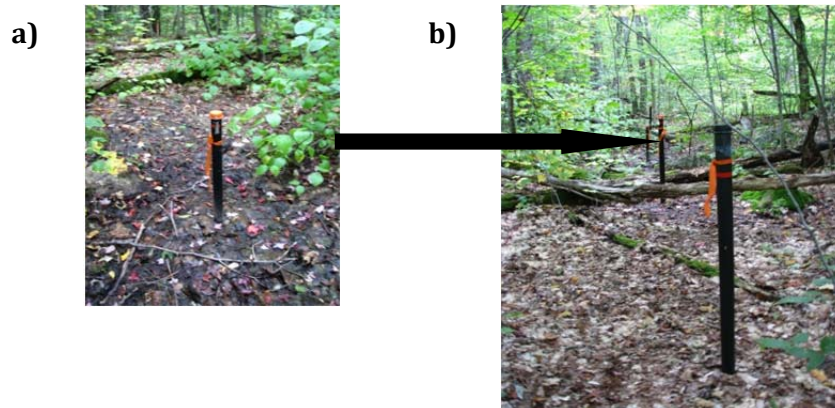


Figure 2.7 : Clichés de la zone humide nord et des puits d'échantillonnage. a) Vue sur le puits d'échantillonnage D3 dédié aux mesures d'oxygène dissous et de température. Le substrat est humide et sans végétation. b) Vue des puits d'échantillonnage de l'amont (sec) vers l'aval (humide). Photo prise par Caroline L'Heureux 2010-09-23.

2.5.2.2 Géochimie de la solution de sol

La majorité du bassin versant se compose de sols non saturés. Ainsi, la solution de sol est extraite des différents horizons à l'aide de lysimètres sans tension aux stations 1, 2, 3 pour le bas de versant et 7, 8, 9 pour le haut de versant (**figure 2.6**). Les lysimètres sans tension sont constitués d'un puits d'accès menant à une bouteille de plastique inerte dans laquelle s'accumule la solution de sol ayant précédemment percolé à travers un entonnoir de sable inerte logé sous l'horizon de sol à échantillonner. Les lysimètres des horizons organiques sont situés sous les horizons LFH et ceux des horizons B, à 50 cm de profondeur soit dans l'horizon B podzolique. Entre chaque échantillonnage de la solution de sol, le lysimètre est vidé. Le prélèvement de 13 échantillons des horizons LFH et 18 des horizons B, s'est effectué lors de l'événement 2010. La solution de sol des lysimètres a été extraite à l'aide d'une pompe péristaltique.

2.5.3 Protocole d'échantillonnage sur le terrain

Il est important de souligner qu'aucun sous-répliquat n'a été pris au sein d'un même puits ou lysimètre pour un moment d'échantillonnage donné. Ainsi, les collecteurs d'une même source sont considérés *a priori* comme des répliquats spatiaux. Les bouteilles d'échantillonnage de terrain sont composées de polyéthylène de haute densité ce qui constitue un matériau inerte. Toutes les bouteilles ont été trempées dans de l'acide nitrique HNO_3 à 20 % pendant 30 minutes, rincer six fois avec de l'eau ultra-pure déionisée (milliQ) et transportées sur le terrain dans des sacs de plastique. Chaque échantillonnage de l'eau des sources sur le terrain comprend : 1) une vérification que le tube de la pompe péristaltique est propre avant de l'insérer dans le puits ou le lysimètre; 2) le conditionnement de la pompe péristaltique et de la bouteille de plastique inerte et son bouchon avec l'eau de la source à échantillonner; 3) l'embouteillage de l'eau dans la bouteille de plastique inerte et 4) la conservation de l'échantillon à 4° C jusqu'à la réalisation des analyses en laboratoire. Puisque les lysimètres et la presque totalité des puits dédiés à la géochimie sont installés depuis plusieurs années (> 10 ans), nous jugeons que la solution de sol est en équilibre avec le collecteur. La sonde oxymètre *YSI 550A* est calibré dans de l'air saturé en eau avant chaque séance (temps) d'échantillonnage des deux zones

humides ainsi que du cours d'eau. La sonde est lavée à l'eau ultra-pure (milliQ) entre chaque mesure dans les deux puits de chaque zone humide.

2.6 ANALYSES EN LABORATOIRE

2.6.1 Protocole de qualité en laboratoire

Tous les réactifs utilisés lors des expériences de laboratoire sont de grade métaux traces. L'eau ultra-pure déionisée du laboratoire de pédologie du département de géographie est doublement déionisée par un système MilliQ (Millipore™) (résistivité inférieure à 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Tous les échantillons des sources en eau et du cours d'eau ont été maintenus à 4 °C et analysés dans un délai de un à trois jours au laboratoire de pédologie du département de géographie. La mesure d'une solution standard, de répliques des échantillons et d'un blanc de laboratoire à chaque dix échantillons a permis le contrôle de la qualité des analyses pour toutes les analyses décrites dans les sections suivantes. L'erreur standard est obtenue de plusieurs analyses de solution avec de faibles concentrations, par exemple pour les blancs de laboratoire (0,5 ou 1 mg/L). Ces erreurs standards sont multipliées par trois et sont considérées comme la limite de détection de la méthode. Toutes les concentrations obtenues ont été corrigées en fonction des concentrations des blancs de laboratoire. Les instruments sont lavés à l'eau ultra-pure déionisée (milli-Q).

2.6.2 Mesure pH et CE

Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur la portion non filtrée des échantillons d'eau à l'aide respectivement d'un *pHmètre* et d'un conductivimètre *Radiometer*.

2.6.3 Mesure des éléments dissous

Les échantillons ont été filtrés à travers une membrane de nylon d'ouverture de 0,45 μm de marque *Magna*. Une nouvelle membrane pour chaque échantillon est utilisée et conditionnée avec un peu d'eau de l'échantillon à traiter. L'élément Si a été mesuré à l'aide la méthode de colorimétrie selon le protocole du Centre St-Laurent (LCPCSL, 1993). L'estimation du contenu en COD a été réalisée à l'aide d'un spectromètre *Perkin Elmer* (adsorbance 254 nm) en utilisant un standard de platine pour la calibration à tous les dix

échantillons. Les concentrations en COD de 5 % des échantillons a ont été mesurées à l'aide d'un analyseur de COD (Shimadzu, Kyoto, Japan). Nous avons utilisé une équation de régression entre la concentration de COD et l'adsorbance afin de mesurer la concentration de 95 % des échantillons.

Un volume de 10 ml de la portion filtrée de l'échantillon a été acidifié avec 0,04 ml d'une solution d'acide nitrique HNO_3 (50 % acide concentré et 50 % d'eau déionisée (milliQ)) afin de prévenir la précipitation dans le flacon et d'éviter l'adsorption des éléments aux parois du contenant. Les standards ont été préparés de la même façon, soit en ajoutant 0,8 ml de solution d'acide nitrique à 20 ml de l'échantillon. Cette partie de l'échantillon a été analysée pour mesurer les concentrations en éléments majeurs (Fe-Mn) et traces (As-Ba-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Ni-Pb-Rb-Se-Sr-Tl-V-Y-Zn). La mesure s'est réalisée à l'aide d'un spectromètre de masse à torche au plasma ICP-MS (*Inductively coupled plasma – mass spectrometry*) dans un laboratoire de l'Université de McGill - Natural Resource Sciences - qui utilise des échantillons certifiés pour la majorité des éléments de l'Institut national de recherche sur les eaux du Canada. Les limites acceptées des recouvrements de concentration oscillent entre 90 et 100 %. Le laboratoire de l'Université McGill participe également à tous les concours inter-laboratoire organisés par l'institut national de recherche sur les eaux du Canada.

2.7 Traitement des données

2.7.1 Traitement cartographique

2.7.1.1 Choix de l'algorithme d'interpolation : Voisinage naturel simple

Les analyses cartographiques sont effectuées à l'aide du logiciel cartographique *MapInfo Vertical Mapper 3,5*. L'ensemble du réseau de puits est géoréférencé (**figure 2.5**). L'attribution d'une valeur, liée à la mesure de NP, à chaque puits, permet de générer des cartes thématiques de différentes natures et d'explorer la spatialisation d'un large spectre d'analyses. La haute densité de puits dans le bassin rend possible l'utilisation de l'interpolation. Les techniques d'interpolation spatiale se basent sur le concept d'autocorrélation positive (Drouin, 1999). L'algorithme du voisinage naturel simple ou « VNS » (*Simple Natural Neighbour*) a été utilisé afin d'interpoler les valeurs associées à toutes les analyses de cette recherche. Le choix de cet algorithme se base sur le travail

réalisé par Drouin (1999) dont l'objectif visait à créer un modèle numérique d'élévation *ad hoc* pour le bassin de l'Hermine. Ainsi, les résultats de Drouin (1999) montrent que la surface la plus représentative de l'Hermine est générée grâce à la méthode d'interpolation du VNS. Un des défis de l'auteur était de cibler une méthode d'interpolation qui puisse créer une surface « qui soit représentative de la topographie réelle, voire de la micro-topographie, puisque c'est le facteur hydrologique explicatif dominant. » (Drouin, 1999, p.49). Cette approche est tout aussi d'intérêt dans l'application d'une interpolation sur des profondeurs de NP puisque celles-ci sont, entre autres, tributaires de la topographie souterraine qui est souvent irrégulière (Buttle *et al.*, 2004; Tromp-van Meerveld & McDonnell, 2006b). Or, l'utilisation de l'algorithme VNS s'avère un choix judicieux pour l'interpolation des données ponctuelles de NP dans le bassin de l'Hermine. Cet algorithme produit une surface qui représente un gradient continu de valeurs à partir de données ponctuelles dispersées (Drouin, 1999). C'est une méthode dite « exacte » puisqu'elle génère une surface interpolée passant par les valeurs mesurées aux points originaux. Le VNS se base sur une technique d'estimation géométrique qui utilise les polygones de *Thiessen* (ou *Voronoi*) dont les limites sont équidistantes des différents points du voisinage. Ainsi, l'aire d'influence de chaque profondeur de NP mesurée est trouvée à l'aide de ces polygones. La valeur d'un point non échantillonné est trouvée et superposée aux aires d'influence des points échantillonnés (Drouin, 1999). La méthode réalise un calcul de la moyenne des valeurs voisines pondérées par l'aire qu'elles occupent dans le voisinage naturel de la valeur à trouver. En outre, la méthode VNS tient compte des valeurs minimales ou maximales des points mesurés dans leur voisinage afin d'éviter les sous et sur-estimations des valeurs interpolées.

2.7.1.2 Interprétation de l'interpolation

Il est à noter que peu importe la méthode d'interpolation, il peut y voir création d'artefacts hydrologiques, comme par exemple, la création d'un lien hydrologique entre deux mesures réelles prises dans deux dépressions topographiques indépendantes. *A contrario*, la méthode d'interpolation permet aussi de créer un patron spatial de la zone saturée dans le sol pour un temps donné, dans un contexte. En ce sens, l'interpolation constitue un outil indispensable pour visualiser les patrons de hauteurs de la NP et l'activation et la désactivation de la connectivité hydrologique pour l'ensemble du bassin versant pour peu qu'elle soit jumelée

à d'autres méthodes, c'est-à-dire des analyses géohydrochimiques, et suivi d'une interprétation rigoureuse.

2.7.2 Traitements statistiques univariés

2.7.2.1 Comparaison des distributions et des variances

Les statistiques univariées sont effectuées dans le progiciel R (2010). La normalité des distributions est testée par le test de *Shapiro-Wilk*. La comparaison entre des distributions qui ne respectent pas le postulat de normalité s'est effectuée par le test de *Wilcoxon-Mann-Whitney*. La comparaison entre deux variances est effectuée par une analyse de variance. Pour être significative, une différence doit avoir une valeur de probabilité inférieure à 0,05.

2.7.2.2 Coefficient de corrélation de Spearman

Le coefficient de corrélation de rang de Spearman est utilisé pour décrire la force qui unit deux variables dans le cas de relation linéaire et non linéaire. De fait, il constitue une mesure d'association non-paramétrique qui évalue s'il existe une relation entre le rang des observations, peu importe la forme précise de la relation. Pour être significative, la valeur de la probabilité de la corrélation doit être inférieure à 0,05. Ainsi, tel que nous le verrons dans cette étude, les relations rencontrées ne respectent pas le postulat de linéarité et c'est pourquoi nous utilisons le coefficient de corrélation de Spearman dans un tel cas.

2.7.3 Traitements statistiques multivariés

Les analyses multivariées sont réalisées dans le progiciel R (2010). Les statistiques multivariées sont largement utilisées dans l'analyse de la qualité de l'eau (Hooper & Peters, 1989). De fait, elles ont contribué à améliorer la compréhension des processus biogéochimiques dans de petits cours d'eau de bassin versant (Evans *et al.*, 1996) et la qualité de l'eau pour de plus larges rivières (Haag & Westrich, 2002 ; Vega *et al.*, 1998). En effet, l'hydrochimie constitue un de ces champs d'études qui génèrent une quantité volumineuse de données multidimensionnelles, souvent difficiles à interpréter. Voici une description détaillée des quatre méthodes statistiques multivariées utilisées dans cette recherche.

2.7.3.1 L'analyse de groupement (AG)

Le classement des variables environnementales ou biotiques constituent une condition pour les identifier et subséquemment les nommer. Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons à l'identification de zones hydrologiques d'un bassin versant dont le battement de la nappe phréatique est similaire, soit les hydrotopes. L'analyse de groupement (AG) constitue un outil privilégié pour effectuer une telle tâche. L'AG constitue une opération d'analyse multidimensionnelle qui consiste en le partitionnement d'un ensemble de données, soit des objets ou des descripteurs. Une analyse de groupement selon la méthode de « Ward » sera effectuée. Voici en trois étapes le fonctionnement de cette analyse : 1) création d'une matrice de distance qui correspond au critère de similarité (**S**) utilisé; 2) calcul de la distance (**D**) où $D = 1 - S$ et 3) réalisation du groupement selon la méthode « Ward » qui est une agglomération hiérarchique qui minimise la somme des carrés au sein du groupe (Legendre & Legendre, 2003). La représentation de l'AG est un dendrogramme qui permet de visualiser des groupes à chaque niveau de partitionnement. Le choix du nombre de groupes se réalise à l'aide d'une division par les K centroïdes (K -means). La maximisation de cette division se fait à l'aide de deux critères *calinski* et *ssi*. Finalement, le choix du partitionnement s'exerce en fonction des objectifs de la recherche.

2.7.3.2 L'analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale (ACP) constitue une analyse d'ordination dans un espace réduit (Legendre & Legendre, 2003) permettant la réduction de l'information par la création de composantes principales qui sont indépendantes entre elles, à partir du lien qui existe entre des variables réponses d'un jeu de données. Une composante principale (CP) constitue donc une nouvelle variable qui ressemble le plus à tous les descripteurs de la matrice utilisée. C'est pourquoi elle est également nommée « variable synthèse ». Les composantes principales représentent un pourcentage de variation des variables réponses (matrice Y). Voici les étapes qui servent à produire une ACP : 1) calcul d'une matrice de covariance sur la matrice Y ; 2) calcul des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de covariance; 3) création d'une matrice des vecteurs propres (U) et 4) création d'une matrice (F) qui consiste en la multiplication de la matrice initiale brute avec la matrice U (vecteurs propres) pour cadrage de type 1 alors qu'un cadrage de type 2 implique la création d'une matrice $U2$ par la multiplication de U par la diagonale des valeurs propres

exposant 0,5. La représentation graphique d'une ACP consiste en un diagramme de double projection. Toutes les matrices utilisées pour les ACP sont centrées et réduites et le cadrage de type II est utilisé puisqu'il permet de considérer les angles des descripteurs comme des corrélations.

2.7.3.3 L'analyse canonique de redondance (ACR)

L'analyse canonique de redondance (ACR) combine les concepts d'ordination et de régression en faisant intervenir une matrice explicative (X) et une matrice réponse (Y) (Legendre & Legendre, 2003). L'ACR consiste en l'ordination de Y sous la contrainte de X. Ainsi, les résultats obtenus permettent de quantifier l'explication de la matrice Y par la matrice X. Le diagramme de double projection d'une ACR est analysé comme celui d'une ACP puisque les axes canoniques (AC) constituent des variables synthèses qui représentent un pourcentage de variation des variables expliquées. L'intérêt fondamental de l'ACR est de cibler des variables qui expliquent significativement les variables réponses. La sélection des variables explicatives significatives est réalisée à un seuil alpha de 0,05. Une fois sélectionnées, seulement ces variables explicatives significatives sont utilisées dans la réalisation du modèle ACR. La relation canonique de l'ACR est testée à l'aide d'un test du R^2 en imposant un nombre prédéterminés de 999 permutations aléatoires. Ainsi, ce test consiste en la réalisation de permutations par tranches de 100 jusqu'à ce que la probabilité soit jugée différente du seuil alpha de 0,05 (Legendre, 2009). Un test automatique des valeurs propres canoniques individuelles, soit les axes canoniques (AC), est réalisé, à l'aide du même test par permutation.

2.7.3.4 Coordonnées principales de matrice de voisinage (CPMV)

Il existe dans l'environnement des communautés ou des éléments abiotiques (par ex. l'eau dans le sol) qui présentent des structures spatiales particulières. Ces dernières peuvent être induites par deux catégories de mécanismes (Legendre, 2005). En prenant l'exemple de la nappe phréatique dans un sol peu profond, son patron spatial peut constituer la conséquence de 1) l'autocorrélation au sein même de la nappe phréatique et 2) l'influence des variables explicatives qu'elles soient environnementales (par ex. la pente de la topographie de surface), biotiques (par ex. la présence d'arbres matures) ou historiques. La méthode CPMV a été développée afin de pouvoir intégrer les structures spatiales, c.-à-d.

l'autocorrélation, dans les modèles statistiques (Legendre, 2005). Cette méthode permet de créer des variables CPMV qui sont associées à toutes les échelles spatiales observables par le patron spatial d'échantillonnage (Legendre & Borcard, 2003). Ces échelles ne peuvent donc pas être plus grandes que la zone à l'étude ou plus petite que l'espace entre les sites d'échantillonnage. La création et la sélection de ces variables se fait en trois étapes : 1) calcul d'une matrice de distances géographiques (distances euclidiennes) à partir des coordonnées géographiques des sites; 2) création de la matrice de voisinage à partir d'une matrice tronquée d'une certaine distance choisie et réalisation d'une analyse en coordonnées principales (AcoP) sur la matrice de voisinage; 3) affichage des I de Moran (coefficient d'autocorrélation spatiale) des variables CPMV et sélection des variables dont le I de Moran est positif et significatif à $\alpha = 0,05$. L'AcoP constitue une analyse similaire à l'ACP mais qui se présente seulement dans l'espace euclidien en raison de l'utilisation d'une fonction de distance ou de similarité. Tel que nous le verrons, si le modèle général n'est pas significatif avec les variables CPMV choisies à la troisième étape, le choix des variables sera restreint en fonction d'une hypothèse adéquatement ciblée et le modèle sera à nouveau testé.

Les variables CPMV choisies forment une matrice de vecteurs propres qui ont une valeur propre positive. Elles peuvent être utilisées comme matrice explicative (X) dans une ACR. Cette intégration de la structure spatiale dans un modèle permet de prédire la part de la variation expliquée par la structure spatiale, représenté par les variables CPMV choisies. Aucune transformation n'est effectuée sur la matrice réponse Y composée des profondeurs de NP. Voici les six étapes à suivre à partir de la réalisation de l'ACR jusqu'à la représentation graphique des structures spatiales : 1) réalisation d'un modèle ACR avec les variables CPMV choisies; 2) sélection progressive des variables CPMV dans le modèle ACR; 3) réalisation de l'ACR avec les variables CPMV sélectionnées progressivement, soit les variables explicatives (X), et la matrice de profondeurs de NP, soit les variables expliquées (Y), et estimation du R^2 ajusté; 4) réalisation d'un test de signification du modèle global et des AC; 5) estimation du R^2 ajusté des AC significatifs et 6) représentation cartographique des valeurs des l'AC significatifs (première colonne de la matrice Z). La visualisation des structures spatiales se fait sur la carte en fonction de la taille des taches et de leur valeur positive ou négative.

2.7.4 Approches pour estimer les variables d'écoulement hypodermique

2.7.4.1 Calcul des vitesses d'écoulement de l'eau souterraine

L'estimation de la vitesse de l'écoulement latéral de l'eau souterraine a été réalisée à l'aide de l'équation de Darcy:

$$q = -K * \Delta H / \Delta L$$

où q est une distance par unité de temps (m/s), K est la conductivité hydraulique, ΔH est la différence entre les deux charges hydrauliques et ΔL est un intervalle de distance, et où $\Delta H / \Delta L$ constitue le gradient hydraulique (Rose, 2004). Ce calcul est appliqué à quatre épaisseurs de sol pour chaque connexion hydrologique que l'on a isolé, soit un profil de sol complet (0 à 95 cm dans le sol), un écoulement hypodermique de surface (0 à 30 cm dans le sol), un écoulement hypodermique de moyenne profondeur (30 à 55 cm dans le sol) et un écoulement hypodermique profond (55 à 95 cm dans le sol).

2.7.4.2 Calcul de la conductivité hydraulique à saturation (K_s) pour un podzol typique à l'Hermine

Il n'existe pas de valeurs mesurées de conductivité hydraulique à saturation (K_s) pour les sols de l'Hermine. Les valeurs de K_s pour un profil de sol typique du bassin de l'Hermine (Turmel *et al.*, 2005) sont estimées en effectuant la moyenne des valeurs de K_s de chaque horizon, obtenues à l'aide de: 1) la fonction de pédotransfert (FPT) de Vereecken (1990) qui inclue les variables % sable, % argile, % MO et densité apparente; 2) la FPT de Rawls et Brakensiek (1985) qui inclue les variables % de sable, % argile et la porosité et 3) trois profils de podzols laurentiens et scandinaves sur till glaciaire (Mehuys et Kimpe, 1976; Lind et Lundin, 1990; Nyberg, 1995). Les valeurs de densité apparente sont extraites de Turmel *et al.* (2005). Elles sont transformées en % de porosité par la formule :

$$1 - (P_b / P_s) * 100 \%$$

où P_b représente la densité apparente et où P_s représente la densité du solide fixé à 2,65 pour le quartz. Les valeurs de % sable et % argile sont extraites de Savoie (1988) et sont estimées à partir des textures des horizons de tous les profils sols. Les valeurs de % MO

sont extraites de Savoie (1988) et sont obtenues à partir de la moyenne de % CO des horizons de tous les profils de sol par la formule :

$$\% \text{ CO} * 1,724$$

où le % CO correspond au % de carbone organique et où 1,724 constitue un facteur de conversion approprié pour les sols du Québec (Sheldrick, 1984). Les valeurs obtenues à l'aide des FPT sont pondérées par le pourcentage de fragments grossiers dans chaque horizon à l'aide de la formule de Brakensiek et Rawls (1994) qui considère que si le pourcentage de fragments grossiers est de 20 %, la valeur de Ks doit être multipliée par 80 % (100 % - 20 % = 80 %) puisqu'on assume qu'il n'y a pas de mouvement d'eau dans les fragments grossiers. Les variables utilisées dans les FPT sont présentées à la **figure 2.8**. Les trois profils de sol sont choisis en fonction de la ressemblance des conditions environnantes. De fait, Mehuys et Kimpe (1976) ont effectué leur mesure dans des podzols de milieu forestier sur till du Bouclier canadien avec fragipan, donc, un contexte similaire à ce que l'on retrouve dans le bassin de l'Hermine. Nyberg (1995) a réalisé ses mesures dans un podzol de milieu forestier sur till en Scandinavie. Seule la valeur de Ks de l'horizon C de la revue de littérature de Lind et Lundin (1990) est utilisée dans le calcul de la moyenne. La **figure 2.9** présente les valeurs de Ks pour ces trois auteurs.

La valeur de Ks pour LFH est approximée puisque les FPT s'appliquent seulement aux sols minéraux et qu'aucune valeur de Ks de LFH n'a été trouvée dans la littérature. Ainsi, nous supposons que la valeur de Ks de LFH est supérieure d'un ordre de grandeur proportionnel à celle du pourcentage de différence entre la porosité de l'horizon Bhf1 et de LFH, soit supérieur de 13 % selon les données de porosité de Turmel *et al.* (2005). La valeur précise de Ks de l'horizon compact à l'Hermine n'a jamais été mesurée et ne sera pas considérée dans l'estimation de Ks pour le profil de sol.

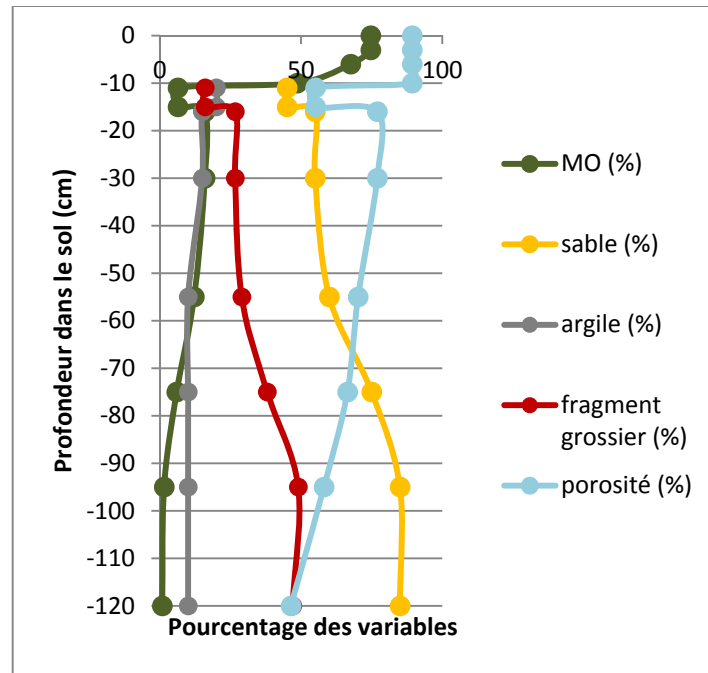


Figure 2.8 : Distribution verticale des variables utilisées dans les fonctions de pédotransfert afin d'estimer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) pour un profil de sol podzolique typique à l'Herminie. Les valeurs absentes entre les 0 et 10 cm dans le sol, soit pour les horizons LFH, n'ont pas été mesurées pour les horizons organiques. Les variables sont extraites de Turmel *et al.* (2005) et de Savoie (1988).

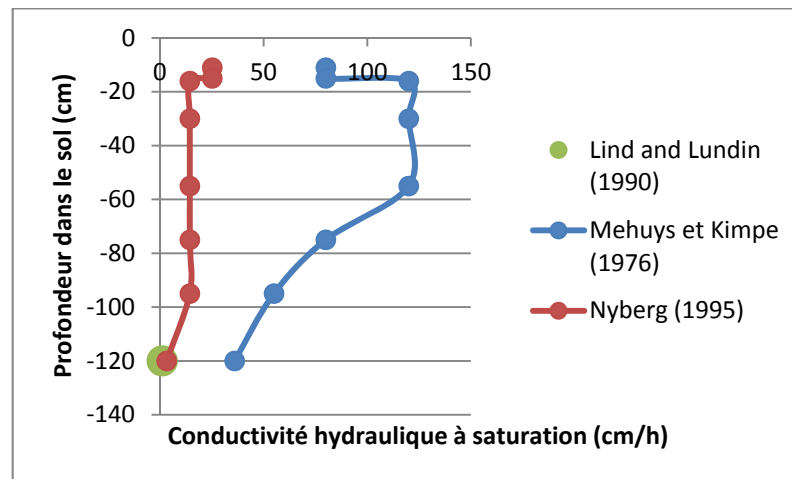


Figure 2.9 : Valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_s) (cm/h) selon trois auteurs. Ces valeurs sont utilisées dans le calcul de l'estimation de la valeur de K_s pour un profil typique de podzol à l'Herminie.

2.7.4.3 Calcul du débit de l'écoulement de l'eau souterraine

Afin de considérer la contribution d'une zone en estimant un débit (L/sec), quatre étapes sont suivies (**tableau 2.3**). La largeur de l'aire de déversement de l'eau à l'aval de chaque zone de connexion hydrologique est fixée à 15 m (1500 cm) pour trois raisons : 1) il est risqué de mesurer l'aire de déversement de chaque zone de manière précise à l'aide de l'interpolation; 2) il est préférable d'avoir la même valeur pour comparer les débits et 3) une largeur de 15 m constituent une estimation appropriée en regard de l'ensemble des connexions. Les variables qui caractérisent les horizons du profil incluses dans les calculs sont extraites de Savoie (1988) et Turmel *et al.* (2005) (**figure 2.8**). Le résultat de débit souterrain en cm^3/h est subséquemment converti en L/s. Ces calculs sont effectués pour les même quatre épaisseurs de sol qu'à la **section 2.7.4.1**.

Tableau 2.3 : Étapes suivies afin d'estimer l'écoulement souterrain de l'eau au point des zones de connexion hydrologique. Cet exemple est valide pour un profil complet à saturation.

ÉTAPES
ÉTAPE #1: Teneur en eau à saturation de chaque horizon (%) = Porosité (%) * (100 % - % fragment grossier) * 94 % (= valeur réelle)
ÉTAPE #2: Moyenne pondérée de la teneur en eau pour un profil complet (%) = SOMME (teneur en eau à saturation d'un horizon * (= pondérée par) % d'épaisseur de cet horizon dans le profil)
ÉTAPE #3: Calcul de l'aire de déversement de l'eau à l'aval de la zone de connexion pour un profil complet à saturation (cm^2) = Largeur (1500 cm) * Épaisseur (cm) * Teneur en eau à saturation du profil (%)
ÉTAPE #4: Flux de volume d'eau d'une zone de connexion (cm^3/h) = Aire de déversement de l'eau (cm^2) * Vitesse d'écoulement de l'eau (K_s) (cm/h)

2.7.5 Mesures associées à la relation entre la profondeur de la nappe phréatique et le débit (NP/Q)

Nous examinerons les relations entre la profondeur de la nappe phréatique et le débit (NP/Q) du ruisseau à l'exutoire du bassin. Puisque ces relations sont souvent caractérisées par un plafonnement, nous caractériserons ces relations NP/Q, entre autres, à l'aide de la mesure de l'angle entre les deux portions de la relation. Nous explorons aussi les facteurs explicatifs potentiels de cet angle et du niveau de plafonnement. Voici l'explication de ces mesures.

2.7.5.1 Mesure de l'angle de la relation NP/Q

Le degré de l'angle de la relation NP/Q est investigué à l'aide de l'angle à l'endroit du point d'inflexion de la relation NP/Q. La **figure 2.10** montre un exemple de la formation de ces angles. Le point d'inflexion correspond au centre de la section où les valeurs de la relation changent de direction. Les angles sont formés de deux segments rectilignes qui se calquent à la forme de la relation NP/Q et se rejoignent à l'endroit du point d'inflexion. Un premier segment est formé entre la valeur de plus faible débit et de plus basse profondeur de NP et la valeur du point d'inflexion. Un deuxième segment se dessine entre la valeur du point d'inflexion et la valeur de plus haut débit, soit 25 L/sec. Cette dernière ne correspond pas forcément à la valeur la plus élevée de NP dans le profil de sol mais s'en rapproche. Les relations linéaires obtiennent une valeur d'angle de 180° alors que les relations fortement autolimitées se rapprochent de 90°.

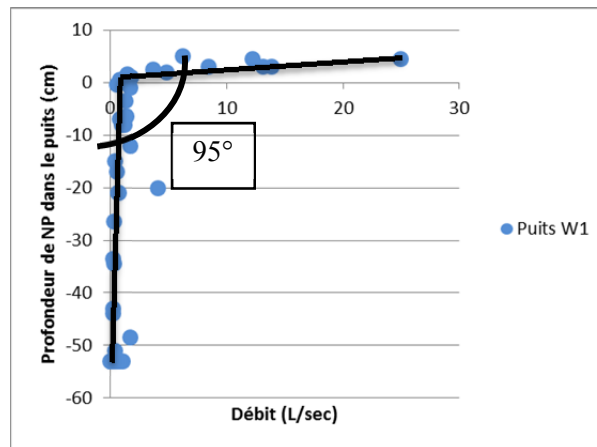


Figure 2.10 : Angle des deux segments qui forment la relation entre la profondeur de NP du puits W1 et le débit à l'exutoire du cours d'eau (NP/Q). Les lignes droites noires représentent les segments de la relation, l'arc noir représente l'angle et la valeur de l'angle est située dans le rectangle noir.

2.7.5.2 Facteurs explicatifs des caractéristiques des relations NP/Q

Afin d'expliquer les formes et les caractéristiques des relations NP/Q de chaque puits, quatre facteurs explicatifs sont utilisés : 1) la distance du puits au cours d'eau; 2) la distance du puits aux limites du bassin; 3) l'indice topographique et 4) l'horizonation du profil de sol.

Les distances entre un puits et le ruisseau et les limites du bassin versant sont mesurées à partir d'une ligne perpendiculaire au ruisseau. Cette ligne passe par la position géographique du puits et s'étend jusqu'à la frontière du bassin versant. Ainsi, pour chaque puits, la distance au cours d'eau et aux limites du bassin versant sont mesurées à partir d'une même ligne théorique.

L'indice de similarité topo-hydrologique (ou topographique) de Beven et Kirby (1979) est calculé pour chaque puits. Cet indice repose sur l'hypothèse que la topographie exerce un contrôle dominant sur la distribution spatiale de l'humidité du sol. Ainsi, pour chaque puits i dans le bassin de l'Hermine, l'indice topographique λ_i est calculé via la formule :

$$\lambda_i = \frac{a_i}{\tan \beta_i}$$

où a_i est l'aire contributrice en amont du puits et $\tan \beta_i$ représente la tangente de l'angle de la pente locale. La variable a_i est dérivée à partir d'un modèle numérique d'élévation qui se base sur les variations de la topographie de surface pour calculer le nombre de cellules qui contribue au ruissellement jusqu'au point considéré si le ruissellement suit la pente du terrain. Cette valeur est calculée pour chacun des 94 puits à l'aide de l'extension *TauDEM* (Tarboton, 2005) construite pour le logiciel ArcGIS 9.1. Les valeurs de a_i ont été exprimées en mètres carrés. L'angle de la pente locale est dérivé pour chacun des 94 sites de mesure à l'aide du module *Spatial Analyst* du logiciel ArcGIS 9.1. Les fonds de vallée ont des valeurs élevées d'indice topographique, en raison de leur gradient de pente faible et/ou de la grande aire contributive qui leur est associée, tandis que les hauts de versants ont de plus faibles valeurs d'indice topographique. Dans le bassin de l'Hermine, les zones avec les valeurs d'indice topographique les plus élevées se situent près du cours d'eau et correspondent aux zones qui, théoriquement, devraient se saturer le plus rapidement.

L'épaisseur des horizons est estimée pour quatre profils de sol représentant les quatre unités pédogéomorphologiques de Savoie (1988) (**figure 2.3**). Les valeurs originales des épaisseurs de sol sont extraites des annexes de Savoie (1988). L'épaisseur d'un horizon constitue une moyenne de tous les profils (n) pour chaque unité (unité 1 ($n = 3$), unité 2 ($n = 1$), unité 3 ($n = 2$), unité 4 ($n = 9$)). Par exemple, les différents types d'horizons tels que

Bf1, Bf2, Bfg et Bfj, sont regroupés dans un horizon standard nommé « Bf ». Pour les horizons LFH et Ae, la même valeur d'épaisseur est octroyée aux quatre profils de sol en raison de la similarité des moyennes entre les quatre unités, du faible écart-type pour tous les horizons confondus des quatre unités et du même pourcentage de présence pour les quatre unités. En outre, l'épaisseur moyenne de LFH est confirmée par les travaux de Manna (2003). Une valeur d'épaisseur distincte est octroyée aux horizons Bhf, Bf, BC et Cg pour chaque unité, en raison de l'existence d'une différence des moyennes entre les unités et d'un écart-type élevé pour tous les horizons confondus des quatre unités. Les deux profils de sol de l'unité 3 ne comportent pas d'horizons BC ni Cg. Bien que l'horizon compact soit discontinu dans le bassin, il est situé entre 50 et 75 cm de profondeur pour tous les profils de sol. Les moyennes d'épaisseur d'horizon sont illustrées en quatre profils de sol représentant les quatre unités pédogéomorphologiques (**figure 2.11**).

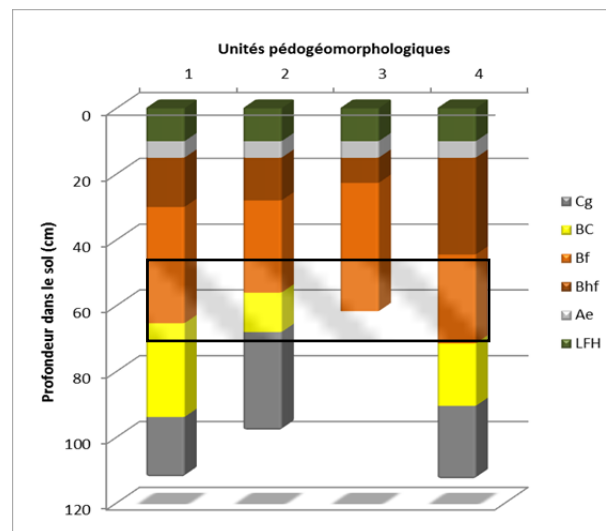


Figure 2.11 : Épaisseur moyennes des horizons pour les quatre profils de sol podzoliques des unités pédogéomorphologiques (Savoie, 1988). Les unités 1 à 4 sont spatialisées à la **figure 2.3**. La zone hachurée représente l'horizon compact discontinu.

2.7.6 Traitement de l'objectif 1

L'objectif 1 est divisé en deux parties : 1) la détection des hydrotopes soit des zones dont le comportement hydrologique est similaire et 2) la détection de la connectivité hydrologique. Dans le cadre de cette étude, un hydrotope se définit comme une zone dans le bassin versant dont le comportement de la zone saturée est similaire. Il n'existe pas de méthodes éprouvées pour détecter et caractériser les hydrotopes. En l'absence d'une méthode standard, nous proposons d'utiliser neuf méthodes différentes dont les résultats sont spatialisés pour chaque puits géoréférencé. Les matrices utilisées pour chaque analyse sont décrites dans la partie des résultats. Les neuf analyses sont : 1) la moyenne; 2) l'écart-type; 3) le minimum; 4) le maximum; 5) l'analyse de groupement; 6) la profondeur du plafonnement des relations entre la position dans le sol de NP et le débit (NP/Q); 7) les coefficients de Spearman des relations NP/Q; 8) l'angle des relations NP/Q et 9) l'analyse de coordonnées principales de matrice de voisinage (CPMV). Il est important d'admettre la part d'arbitraire que recèle l'identification des hydrotopes à chaque analyse. Toutefois, notre approche méthodologique diversifiée vient pallier à cette lacune par l'utilisation d'un large spectre de méthodes statistiques autant univariées que multivariées. Ainsi, nous nous intéresserons à la convergence des résultats des différentes méthodes pour identifier les hydrotopes. Des comparaisons de distributions et de variances sont effectuées suite aux analyses 1 et 2. Le lien entre la profondeur de plafonnement des relations NP/Q et les caractéristiques de ces relations (coefficients de Spearman et l'angle) est quantifié à l'analyse 6 à l'aide du coefficient de Spearman. Le lien entre, d'une part, trois facteurs explicatifs potentiels, soit la distance au ruisseau, la distance aux limites du bassin et l'indice topographique, et d'autre part, les profondeurs maximales et minimales des relations NP/Q, est aussi quantifié à l'analyse 6 à l'aide du coefficient de Spearman. Un profil de pourcentage de fréquence des profondeurs maximales et minimales est comparé aux profils de sol de l'Hermine de Savoie (1988) afin de détecter l'influence potentielle de l'horizonation sur les profondeurs d'autolimitation dans le sol. Aux analyses 7, 8 et 9, le lien entre d'une part les caractéristiques des relations NP/Q, soit le coefficient de Spearman et l'angle, et d'autre part les facteurs explicatifs potentiels, soit la distance au ruisseau, la distance aux limites du bassin et l'indice topographique, est quantifié à l'aide du coefficient de Spearman. Finalement, une synthèse des hydrotopes détectés par l'ensemble des neuf

analyses est réalisée. Une interprétation est effectuée et une spatialisation des hydrotopes est réalisée à l'aide d'une méthode intégratrice expliquée dans les résultats.

Afin de déceler la connectivité hydrologique, les hydrogrammes, les hyétoqrammes et les séries temporelles des patrons spatiaux de hauteurs de la NP des deux événements de précipitation sont présentés. Les valeurs spatialisées constituent les profondeurs de NP par rapport à la surface du sol. Les zones de connexion hydrologique sont identifiées. Le profil des valeurs estimées de Ks d'un sol à l'Hermine est illustré. Pour l'événement 2010 et précisément pour le moment où la connectivité hydrologique est à son maximum, la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol est estimée pour les zones de connexion identifiées. L'équation de Darcy est appliquée à deux positions de NP mesurées, entre lesquelles une connexion a été détectée à l'aide de l'interpolation. Le débit de l'écoulement est calculé pour chaque zone de connectivité hydrologique. En outre, la vitesse et le débit sont estimés pour différentes tranches de sol afin de détecter l'influence potentielle de Ks sur les caractéristiques de l'écoulement souterrain. Finalement le type d'enclenchement des connexions hydrologiques est déduit en mettant en relation, la profondeur de NP d'un puits en aval avec la profondeur de NP d'un puits en amont d'une zone de connectivité hydrologique.

2.7.7 Traitement de l'objectif 2

Afin de répondre au deuxième objectif qui consiste en l'identification de la variabilité spatio-temporelle et de la signature géochimique des cinq sources potentielles en eau ciblées à l'aide des éléments majeurs et traces, trois étapes sont réalisées. Tout d'abord, une comparaison des moyennes entre les différentes sources en eau est réalisée à l'aide de l'erreur type de la moyenne. Deuxièmement, la détection de la variabilité spatio-temporelle des sources est effectuée à l'aide de trois ACP. Une ACP est réalisée sur l'ensemble des sources potentielles en eau. Ses quatre composantes principales sont présentées en deux diagrammes de double projection. Les mécanismes géochimiques sous-jacents sont exposés. Les deux autres ACP sont réalisés respectivement pour les sources de sols bien drainés (LFH, B et NP) et les celles des sols humides (ZHN et ZHA). En troisième lieu, il est question des facteurs de mobilisation des ET dans les sols humides. Deux ACR sont effectuées avec les variables explicatives COD, Fe, Mn et H⁺, respectivement pour ZHN et

ZHA. Les variables explicatives significatives et leur pourcentage d'explication sont exposées. Deux ACP sont ensuite réalisées respectivement sur la géochimie du puits D3 de ZHN et K1 de ZHA qui comprend les variables descriptives oxygène dissous et température. La corrélation entre ces variables et les autres éléments sert à détecter la sensibilité des éléments vis-à-vis des processus d'oxydoréduction. Finalement, une synthèse de signatures géochimiques pour chaque source potentielle en eau est proposée.

2.7.8 Traitement de l'objectif 3

Pour répondre à la question de la contribution des sources à la chimie du cours d'eau de l'Hermine lors d'un événement pluvial, trois étapes sont suivies. Premièrement l'évolution des éléments dissous dans le cours d'eau est analysée à l'aide de tous les chemogrammes groupés en quatre graphiques. Afin de réduire l'information que recèle l'ensemble des variations des éléments dissous, une ACP est réalisée et ses quatre CP sont présentées en deux diagrammes de double projection. Les éléments qui forment les CP 1, 2, 3 et 4 et qui signent une source en particulier sont retenus pour les analyses suivantes. En deuxième lieu, la contribution des compartiments à la chimie du cours d'eau est analysée à l'aide de trois graphiques de mélange réalisé à l'aide des éléments ciblés dans l'ACP de l'hydrochimie du cours d'eau. Troisièmement, afin de spatialiser la contribution des différents horizons, une cartographie pédohydrologique est réalisée. Cette cartographie consiste en la détection des horizons les plus superficiels saturés par la NP. Ainsi, la désignation des horizons baignés par la NP est produite par une transformation des données hydrologiques *in situ*, c'est-à-dire la profondeur de NP dans le profil de sol, en un horizon basé sur un profil de sol de l'unité no.4 de Savoie (1988) (**figure 2.3**). Les graphiques de mélange et les cartes pédohydrologiques contribuent à confirmer ou infirmer l'interprétation des CP de l'ACP et à détecter les sources contributrices. Finalement une synthèse est réalisée sur l'évolution des sources contributrices en eau lors de l'événement d'automne.

Chapitre 3 RÉSULTATS

3.1 Détection des hydrotopes et de la connectivité hydrologique–Objectif 1

L'objectif 1 sera traité en deux temps. Premièrement, la détection des hydrotopes à l'Hermine repose sur neuf analyses distinctes des données de hauteurs de la nappe phréatique : 1) la moyenne. 2) l'écart-type. 3) le minimum. 4) le maximum. 5) l'analyse de groupement. 6) la profondeur du plafonnement des relations entre la position dans le sol de NP et le débit (NP/Q). 7) les coefficients de Spearman des relations NP/Q. 8) l'angle des relations NP/Q et 9) l'analyse de coordonnées principales de matrice de voisinage (CPMV). Cette approche permet d'une part de cerner la notion d'hydrotape et de tester la convergence de différentes méthodes dans l'identification de zones montrant un comportement similaire. L'observation des patrons spatiaux propres à chaque analyse permet la détection d'un certain nombre de zones hydrologiques ou hydrotopes à l'Hermine. Afin, de synthétiser l'ensemble des informations pour toutes les analyses, l'amalgame des neuf critères est réalisé à la fin de cette section.

Une deuxième approche consiste à déceler la connectivité hydrologique à l'aide des séries temporelles des patrons spatiaux de saturation de la NP des deux événements de précipitation. Des estimations de la vitesse d'écoulement et du débit à l'endroit des connexions hydrologiques sont réalisées. On tentera de mettre en lumière les types d'enclenchement des connexions hydrologiques dans le bassin.

3.1.1 Spatialisation des moyennes et des écarts-types des profondeurs de la nappe phréatique

Nous avons estimé la moyenne des profondeurs de NP mesurées à partir des relevés hebdomadaires pour les années 2009 et 2010 ($n = 30$) pour les 94 puits. La fréquence hebdomadaire d'échantillonnage est jugée suffisante pour assurer l'indépendance des observations, ce que les mesures à l'échelle événementielle ne peuvent garantir. Le calcul de la moyenne et de l'écart-type nécessite l'attribution d'une valeur dans le cas d'absence d'eau dans les puits. Ainsi, les valeurs de profondeurs de NP ont été transformées en pourcentage de hauteur du puits occupé par la nappe phréatique. Ces nouvelles valeurs

correspondent au pourcentage de saturation du profil de sol ($\%_{\text{sat}}$) et s'obtiennent par l'équation :

$$(P_{\text{maxPuits}} - P_{\text{NP}}) / P_{\text{maxPuits}} * 100 = \%_{\text{sat}}$$

où P_{maxPuits} est la profondeur maximale du puits et P_{NP} , est la profondeur de la NP dans le sol. Ainsi, un puits sec obtient la valeur 0 % alors qu'une NP affleurant à la surface du sol représente 100 % de saturation en eau. L'utilisation de la variable $\%_{\text{sat}}$ suppose que : 1) la P_{maxPuits} correspond à l'atteinte d'un horizon compact, une roche ou du socle rocheux et 2) la NP se développe au-dessus de ces derniers. La spatialisation des moyennes et des écarts types calculés à partir des $\%_{\text{sat}}$ pour chaque puits est présentée à la **figure 3.1**.

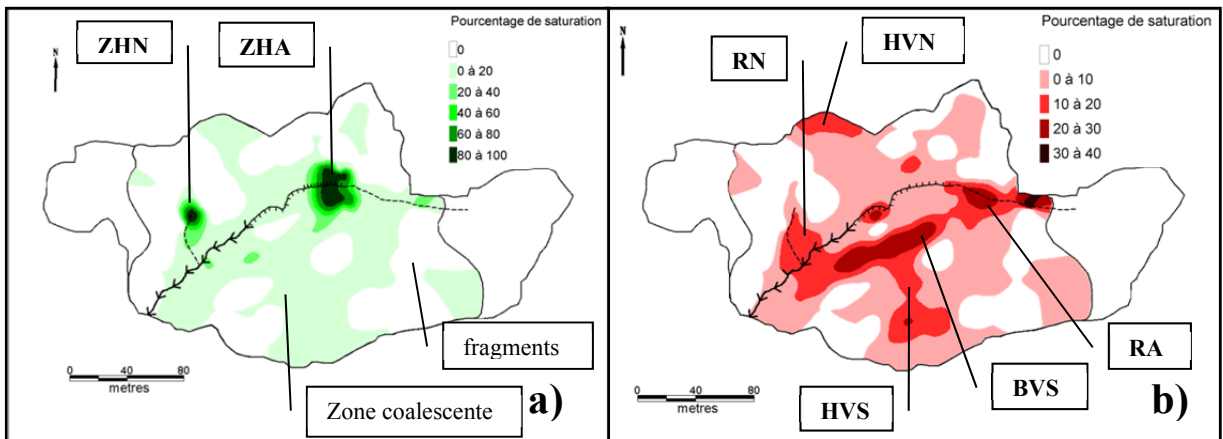


Figure 3.1 : Spatialisation **a)** des moyennes et **b)** des écarts-types de la variable $\%_{\text{sat}}$ estimés à partir de mesures de profondeur de NP pour 94 puits à une échelle hebdomadaire pour l'automne 2009 et le printemps, l'été et l'automne 2010 ($n = 30$). Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

L'interpolation des moyennes du $\%_{\text{sat}}$ rend compte des conditions hydriques contrastées dans le bassin, soulignant l'existence de trois hydrotopes : 1) les sols humides, soit en amont (ZHA) et sur le versant nord (ZHN), dont la moyenne de $\%_{\text{sat}}$ est élevée ($> 20\%$); 2) de larges zones sur les versants dont la moyenne de $\%_{\text{sat}}$ est faible ($< 20\%$) et 3) les fragments aux quatre coins du bassin dont le $\%_{\text{sat}}$ est nul. Le versant sud présente une présence de NP plus soutenue que le versant nord. L'interpolation des écarts-types met en lumière une asymétrie marquée entre les deux versants. Le versant nord recèle de faibles écarts-types à l'exception de la partie aval de ZHN, soit la rigole nord (RN) et du haut de versant nord (HVN). La présence de zones coalescentes longilignes dans le haut de versant

sud (HVS), le bas de versant sud (BVS) et à l'amont de ZHA, soit la rigole amont (RA), dont les valeurs d'écart-type sont plus élevées, confère au versant sud une plus grande organisation structurale qu'au versant nord. Ici aussi, trois hydrotopes sont détectables: 1) des coalescences longilignes sur les versant sud dont l'écart type est élevé ($> 10\%$); 2) de larges coalescences dont l'écart type est faible ($< 10\%$) et 3) des fragments aux quatre coins dont l'écart-type est nul.

La **figure 3.1** permet de constater qu'il existe dans le bassin de l'Herminie des zones non contigües dont le comportement hydrologique semble similaire. Nous examinerons s'il existe néanmoins des différences statistiques significatives entre les variances et les distributions des valeurs de $\%_{\text{sat}}$ dans ces zones. Ces comparaisons sont effectuées entre des zones hydrologiques suffisamment éloignés et *a priori* sans connectivité hydrologique, afin d'éliminer la présence d'autocorrélation spatiale entre les zones comparées. Puisque les distributions sont anormales, un test non paramétrique est utilisé pour tester la différence entre les distributions. Certaines zones hydrologiques sont représentées par une moyenne de $\%_{\text{sat}}$ de plusieurs puits.

Tableau 3.1: Résultat des tests sur l'égalité des variances et de la comparaison des distributions pour quatre paires de zones hydrologiquement indépendantes.

	ZHN ^a	ZHA ^b	RN ^c	HVS ^d	RN	RA ^e	RN	BVS ^f
Nombre de puits	1	5	3	4	3	5	3	4
Écart-type (%sat)	11,4	5,7	15,3	15,2	15,3	19,6	15,3	22,5
Test d'égalité des variances F (valeur p)	0,000		0,98		0,18		0,04	
Test de Wilcoxon- Mann-Whitney de comparaison de distribution (valeur p)	0,000		0,000		0,000		0,000	

^aZHN est représenté par le piézomètre F51.

^bZHA est représenté par la moyenne du $\%_{\text{sat}}$ des puits H87, F65, B11, D26 et E48.

^cRN est représenté par la moyenne du $\%_{\text{sat}}$ des puits F51, L185 et L187.

^dHVS est représenté par la moyenne du $\%_{\text{sat}}$ des puits K171, J147, J143 et J141.

^eRA est représenté par la moyenne du $\%_{\text{sat}}$ des puits W1, D32, D28, D30 et D26.

^fBVS est représenté par la moyenne du $\%_{\text{sat}}$ des puits I113, J139, K164 et H89.

Le **tableau 3.1** montre que les variances ne sont pas significativement différentes (seuil $\alpha < 0,05$) entre RN et HVS ainsi qu'entre RN et RA. Il existe toutefois une différence des

variances entre les deux sols humides, montrant que le ZHN possède une plus grande variance que le ZHA et entre RN et BVS montrant que ce dernier possède une plus grande variance. Les distributions de toutes les zones hydrologiques comparées en paire sont significativement différentes.

3.1.2 Spatialisation des minima et maxima des profondeurs de la nappe phréatique

Le jeu de données complet des valeurs de profondeur de NP ($n = 50$) est utilisé afin de cartographier les minima et les maxima pour chaque puits. La **figure 3.2a)** met en exergue l'absence d'une NP dans le sol pour l'ensemble du bassin versant en conditions sèches minimales, à l'exception de ZHN et ZHA. Ainsi, on distingue deux hydrotopes : 1) les zones où les sols sont humides et 2) l'ensemble des versants où les sols sont secs. À la **figure 3.2b)**, les valeurs maximales forment des coalescences longilignes connectées sur le versant sud alors que le versant nord recèle des valeurs plus faibles à l'exception des zones ZHN-RN et du HVN. Il est possible de distinguer quatre hydrotopes : 1) les sols humides dont la NP se situe entre 10 et 30 cm au-dessus du sol; 2) les coalescences longilignes principalement sur le versant sud dont la NP se situe entre 10 cm au-dessus du sol et 30 cm dans le sol (HVN, RN, BVS, HVS, RA); 3) les grandes zones de coalescences sur les versants dont la NP se situe entre 30 à 50 cm sous la surface du sol et 4) les aires fragmentées sur les versants où la NP se situe entre 50 à 70 cm.

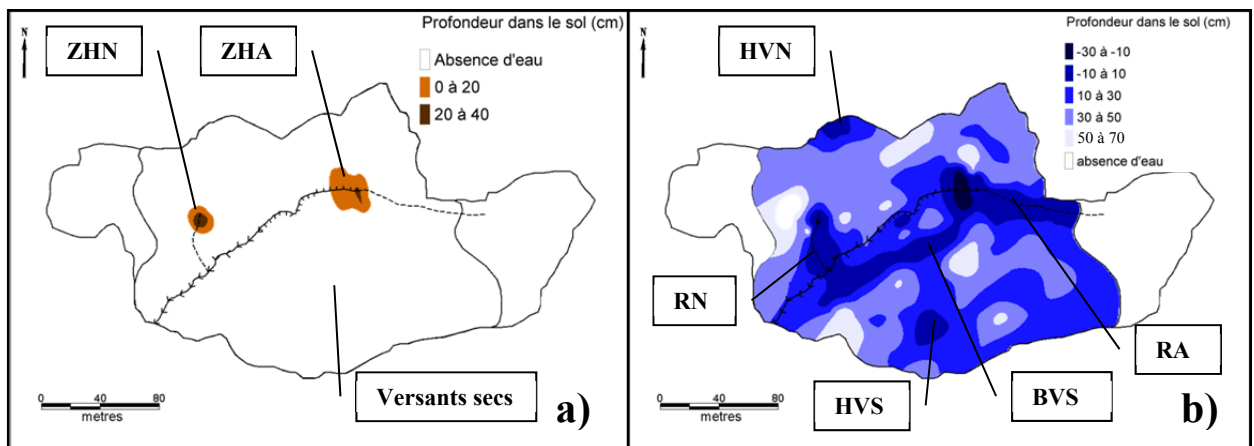


Figure 3.2: Spatialisation de a) les minima et b) les maxima de toutes les mesures de profondeur de NP pour les 94 puits. Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

3.1.3 Spatialisation de l'analyse de groupement

L'analyse de groupement (AG) permet d'identifier les puits pour lesquels la NP fluctue de manière similaire pour l'ensemble du jeu de données ($n = 50$) incluant les relevés hebdomadaires et événementiels. La maximisation de la segmentation se fait à quatre groupes pour le critère *calinski* et à neuf groupes pour le critère *ssi*. L'observation des structures du dendrogramme (**figure 3.3a**) permet de distinguer quatre groupes. Puisque l'objectif consiste à détecter des zones suffisamment similaires, il apparaît raisonnable de partitionner les 94 puits, en quatre groupes plutôt qu'en neuf groupes.

La spatialisation des groupes est présentée à la **figure 3.3b**). Chaque groupe est considéré comme un hydrotope puisqu'il est constitué de puits qui présentent un comportement similaire. Le groupe 1 représente 24 % des puits du bassin versant et se situe majoritairement dans des zones morcelées sur les versants. Il présente des coalescences plus larges dans les hauts de versant. Le groupe 2 constitue le plus grand groupe avec 51 % des puits du bassin, et présente la plus large coalescence située surtout sur les versants. Le groupe 3 est le plus petit groupe représentant 6 % des puits, et il incorpore de manière nette les deux zones humides, soit ZHN et ZHA. Le groupe 4 est constitué de 18 % des puits, et représentent plusieurs zones hydrologiques, soit BVS, HVN, HVS, RA et RN.

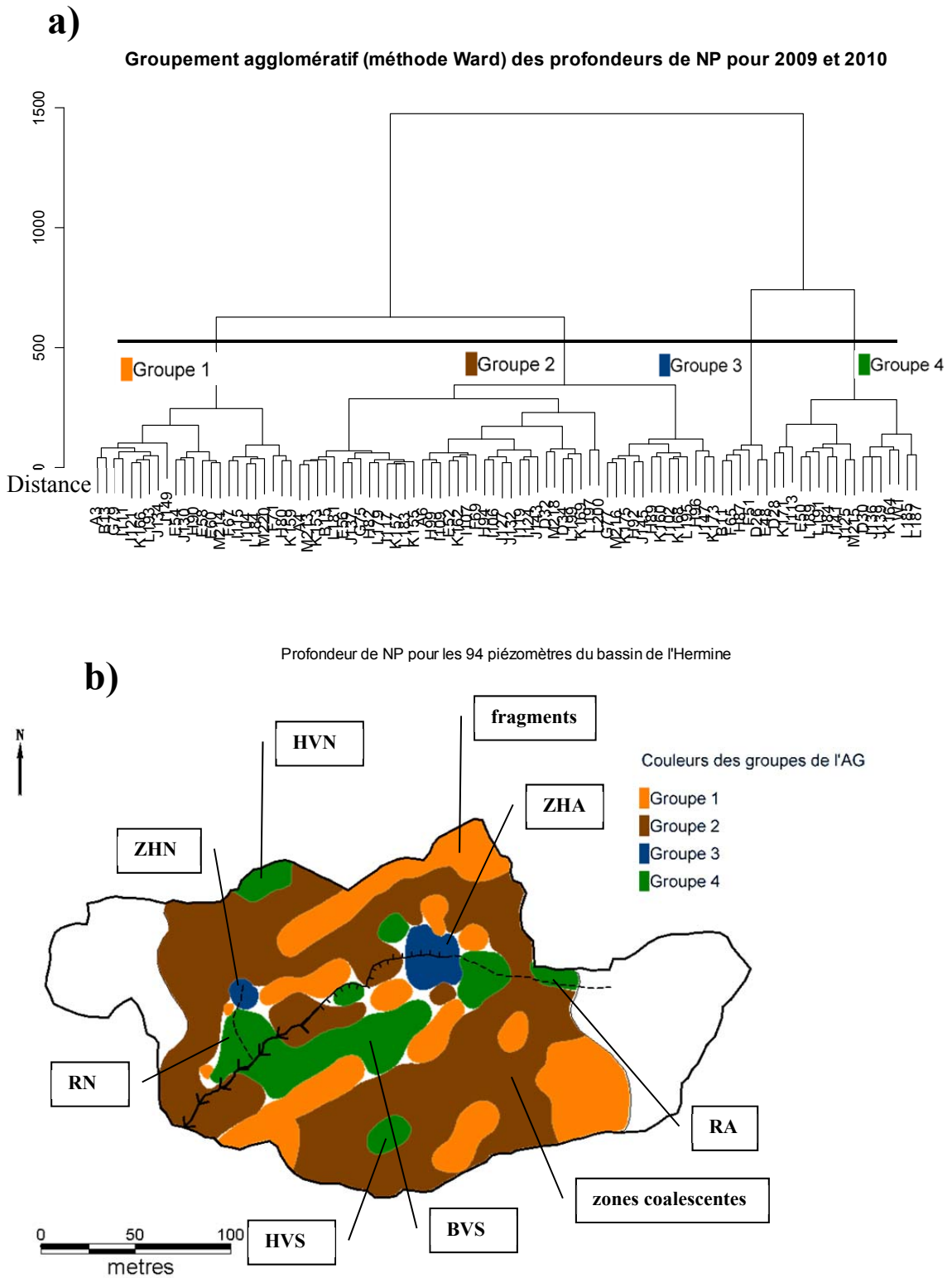


Figure 3.3: a) Dendrogramme de l'analyse de groupement (AG) selon la méthode Ward sur les fluctuations de profondeur de nappe phréatique pour 2009 et 2010 ($n = 50$). La ligne horizontale noire indique le niveau de répartition en groupes choisi. Chaque groupement possède une couleur qui est reprise lors de leur spatialisation. b) Spatialisation des quatre groupements du dendrogramme. Les encadrés montrent les zones hydrologiques mentionnées dans le texte. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

3.1.4 Spatialisation des formes et profondeurs des relations NP/Q

La mise en relation entre les fluctuations de la profondeur de NP de chaque puits et les fluctuations du débit à l'exutoire (Q), représentées par l'acronyme NP/Q, est réalisée à l'aide du jeu de données complet (n = 50). Les puits secs obtiennent la valeur de la profondeur maximale du puits. L'observation des relations NP/Q permet de distinguer deux types de relations : 1) avec seuil ou plafonnement dits autolimités et 2) linéaires. De fait, l'augmentation de la transmissivité de la NP à mesure qu'elle s'élève dans le profil permet un drainage de la zone saturée qui se traduit par une réduction de l'élévation de la NP, voire une stabilisation, qui génère une forme autolimitée de la NP. L'existence de formes linéaires suppose qu'il n'existe pas de contraste entre la transmissivité des horizons permettant à la NP de s'élever de manière linéaire avec le débit. Il existe une diversité de profondeur de plafonnement des relations NP/Q. Ainsi, la création d'une typologie des formes de relation NP/Q basée sur la profondeur s'avère pertinente. Les classes sont formées *a posteriori* sur la base de deux critères hiérarchiques : 1) la profondeur exacte de l'autolimitation d'où la présence de classe très circonscrite de profondeur de NP dans le sol (30 à 40 cm) et 2) le contraste connu entre deux « horizons » p.ex. à la frontière des horizons LFH et de l'eau libre. Les relations NP/Q sont finalement regroupées en six types de forme: 1) autolimitée au-dessus de la surface; 2) autolimitée au niveau de la surface; 3) autolimitée entre 10 et 30 cm de profondeur; 4) autolimitée entre 30 et 40 cm de profondeur; 5) autolimitée entre 40 et 70 cm de profondeur et 6) linéaire et indéfinie (**figure 3.4**). La spatialisation des formes de relation NP/Q de tous les puits basée sur cette typologie est illustrée à la **figure 3.5**.

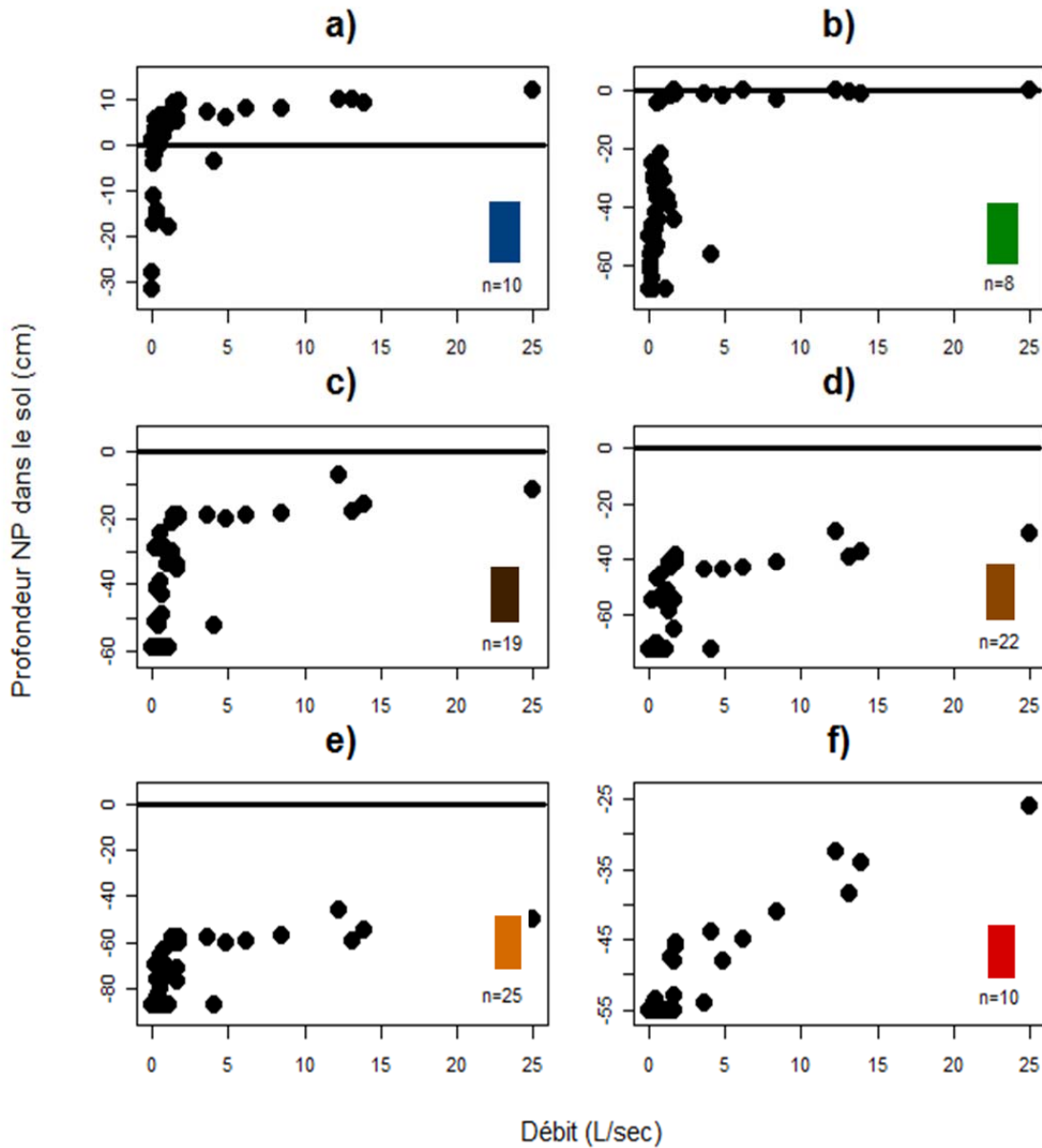


Figure 3.4: Typologie des formes de relation NP/Q basée sur la profondeur de plafonnement de NP par rapport à la surface du sol: a) autolimitation au-dessus de la surface; b) autolimitation au niveau de la surface ; c) autolimitation entre 10 et 30 cm sous la surface du sol; d) autolimitation entre 30 et 40 cm sous la surface du sol; e) autolimitation entre 40 et 70 cm sous la surface du sol; f) relation linéaires. Les formes associées aux lettres a) à f) représentent respectivement les puits, F51, L185, E50, J145, H90 et I109. La ligne noire horizontale correspond à la surface du sol. n = nombre de puits dans la classe. Chaque type de relation est associé à une couleur reprise à la **figure 3.5**.

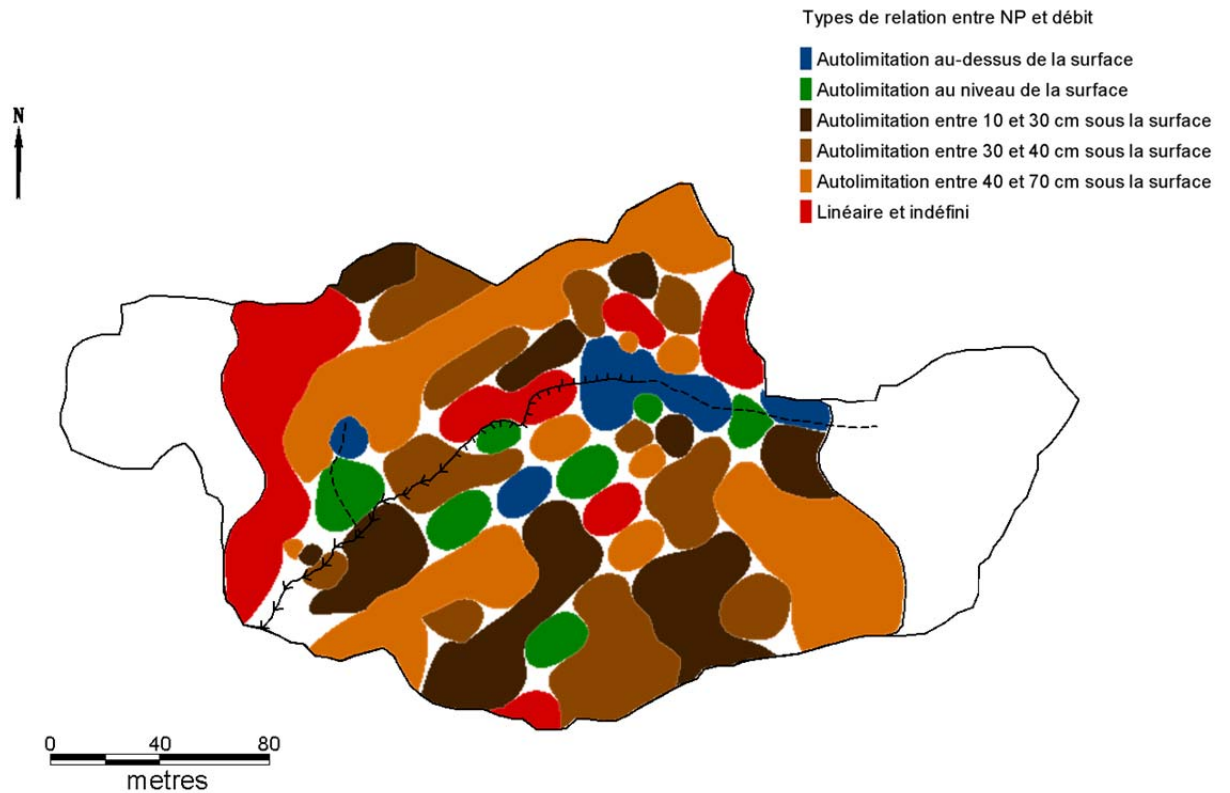


Figure 3.5: Spatialisation des formes de relation entre la profondeur de la nappe phréatique et le débit pour chaque puits selon la typologie élaborée à la **figure 3.4**. L’algorithme d’interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

La présence d’un gradient allant de plafonnements de NP plus bas dans le puits dans le haut de versant vers une autolimitation plus près de la surface du sol dans le bas de versant, donne l’organisation spatiale que l’on voit à la **figure 3.5**. Les deux versants se singularisent par le fait que le versant sud présente une plus grande abondance de relations autolimitées près de la surface du sol alors que le versant nord présente des formes autolimitées plus profondes sous la surface du sol et des relations linéaires plus nombreuses. Ainsi, à l’aide de la spatialisation de cette typologie, on distingue quatre hydrotopes : 1) les milieux dont la NP s’autolimite au-dessus de la surface, soit ZHN, ZHA, RA et BVS; 2) les milieux dont la NP s’autolimite au niveau de la surface, soit RN, BVS, RA et HVS; 3) les zones de coalescence sur les versants où la NP s’autolimite entre 10 et 40 cm dans le sol et 4) les fragments sur les versants où la NP demeure basse et où le seuil de plafonnement se situe entre 40 et 70 cm dans le sol. La classe linéaire se retrouve dans le dernier hydrotope puisque la profondeur minimale de la NP est en deçà de 40 cm.

3.1.4.1 Lien entre la profondeur de plafonnement de NP et les types de relations

NP/Q

L'intérêt porté aux types de relations NP/Q et plus précisément au seuil de plafonnement, repose sur la correspondance potentielle entre l'autolimitation et l'écoulement hypodermique rapide. On postule que la présence d'un plafonnement dans les relations indique l'arrêt de l'élévation de la NP au profit d'un écoulement latéral dans le sol. Ainsi, une relation NP/Q dont le point d'inflexion se manifeste par un angle droit (90°) correspond à l'arrivée de la NP dans un horizon de haute conductivité hydraulique à saturation (K_s), alors qu'un sol dont la valeur de K_s est homogène tend à générer une relation NP/Q plus ou moins linéaire (180°). L'hétérogénéité des sols de l'Hermine sur le plan vertical constitue un postulat raisonnable parce que les sols : 1) comportent une horization pédogénétique bien différenciée incluant des horizons de faible densité (Bhf, Bf) et d'autres qui sont plus denses (Ae, BC, C) et 2) se sont développés sur des tills glaciaires (d'ablation et de fond) dont le gradient de K_s croît vers la surface (**section 2.2.2**). Ainsi, pour caractériser plus précisément les relations NP/Q, deux critères complémentaires sont utilisés : 1) la force de la relation à l'aide du coefficient de corrélation de rang de Spearman et 2) le degré de l'angle marquant la discontinuité entre la tendance linéaire initiale et le niveau de plafonnement de la relation.

Ces deux critères sont mis en relation avec deux types de profondeur dont les valeurs sont négatives dans le sol et positives au-dessus de la surface : 1) la profondeur maximale de l'autolimitation (P_{max}), soit le point d'inflexion et 2) la profondeur minimale (P_{min}) de l'autolimitation, soit le plafonnement de cette dernière. Les relations linéaires obtiennent la profondeur minimale pour P_{max} et P_{min} . Pour quantifier les corrélations, l'utilisation du coefficient de Spearman s'avère adéquate en raison, entre autres, du non respect de la normalité des distributions et de la non linéarité de certaines relations. Le **tableau 3.2** montre ces corrélations et leur niveau de signification.

Tableau 3.2: Corrélations de Spearman entre les profondeurs maximales et minimales des relations NP/Q et le coefficient de Spearman et l'angle de la discontinuité des relations NP/Q.

	Profondeur maximale	Valeur probabilité	Profondeur minimale	Valeur probabilité
Coefficient Spearman (force)	0,34	0,001	0,33	0,002
Angle de la relation	-0,49	0,000	-0,52	0,000

Un lien significatif ($\alpha = 0,05$) positif entre le coefficient de Spearman et les Pmin et Pmax montre que la relation NP/Q, quel que soit sa forme, est de plus en plus forte à mesure que la NP plafonne dans les horizons de surface. Un lien significatif ($\alpha = 0,05$) négatif entre l'angle de la relation NP/Q et les Pmin et Pmax montre que l'angle de la relation NP/Q diminue au fur et à mesure que la NP plafonne dans les horizons plus en surface.

3.1.5 Spatialisation des caractéristiques des relations NP/Q

La distribution spatiale des variables de la force de relation NP/Q et du degré de l'angle, permet de distinguer des types comme le montre la **figure 3.6**. La distribution spatiale des coefficients de Spearman révèle trois hydrotopes (**figure 3.6a**) : 1) le HVN, à l'aval de RN, BVS, HVS et RA et au nord de ZHA où les coefficients sont élevés; 2) les versants présentant des coalescences marquées où les coefficients sont moyens et 3) le HVS, à l'amont et à l'aval du bassin versant, où les coefficients sont faibles. Trois hydrotopes sont aussi révélés par la distribution spatiale des valeurs de l'angle de la relation NP/Q (**figure 3.6b**) : 1) à l'amont et à l'aval du bassin et à l'aval de ZHA qui sont représentés par des zones fragmentées où les angles sont élevés; 2) BVS, RN, à l'aval de RA et au nord de ZHA où les angles sont faibles et 3) les versants où on observe de larges zones de coalescence où les angles sont moyens.

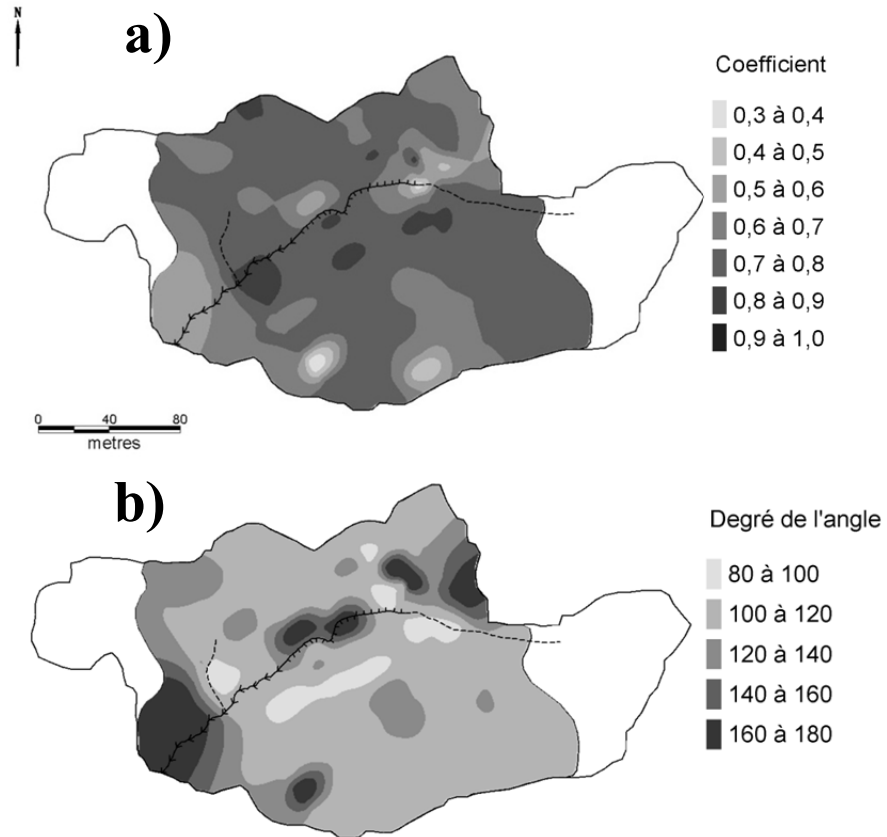


Figure 3.6: Distribution spatiale a) du coefficient de Spearman et b) de l'angle des relations NP/Q pour un réseau de 92 puits. Deux puits sont exclus de cette analyse en raison de leur variation de niveau de NP nulle ou presque nulle. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

3.1.5.1 Facteurs d'influence sur la profondeur du plafonnement et caractéristiques des relations NP/Q

Il existe une diversité de formes de relation NP/Q et de profondeur où la NP atteint un plafond dans le bassin de l'Herminie. Nous examinerons ici l'effet de quatre facteurs qui pourraient jouer sur les profondeurs minimales et maximales de plafonnement et les angles et la force de l'angle des relations NP/Q : 1) la distance la plus courte entre le puits et le cours d'eau; 2) la distance la plus courte entre le puits et la limite amont du bassin versant;

3) l'indice topographique pour chaque puits et 4) l'épaisseur et la profondeur des horizons du sol. Le **tableau 3.3** montre les valeurs des coefficients de corrélation de Spearman entre les quatre caractéristiques et trois facteurs explicatifs potentiels.

Tableau 3.3: Corrélations de Spearman entre les caractéristiques des relations NP/Q et des facteurs explicatifs.

	Profondeur maximale	Profondeur minimale	Coefficient Spearman (force)	Angle de la relation
Distance au cours d'eau	-0,16	-0,13	-0,09	0,05
Distance aux limites du bassin	0,32*	0,32*	0,28*	-0,22*
Indice topographique	0,07	0,07	0,11	0,04

* Significatif à un seuil $\alpha = 0,05$

La distance au cours d'eau et l'indice topographique ne sont significativement ($\alpha = 0,05$) liés à aucune des caractéristiques des relations NP/Q. Par contre, la distance aux limites amont du bassin est reliée positivement au coefficient de Spearman et négativement avec l'angle. Ainsi, plus la distance aux limites du bassin vers l'amont du puits est grande, plus le lien qui unit la NP avec le débit, est fort et plus le degré de l'angle diminue significativement. Par ailleurs, ces relations ne sont pas particulièrement intenses.

Nous explorerons ici, de manière plus visuelle, l'influence potentielle entre les caractéristiques des relations NP/Q et la profondeur et les épaisseurs des horizons de sol. Dans un premier temps, les Pmax et Pmin de plafonnement sont présentées suivi par les angles et les forces des relations NP/Q. Pour chaque tranche de 10 cm, des pourcentages de fréquence des Pmax et Pmin de plafonnement sont déterminés, à l'exception de l'épaisseur de la section de l'eau affleurante qui représente 20 cm au-dessus de la surface. La **figure 3.7** permet une comparaison visuelle entre les quatre profils podzoliques des différentes unités pédomorphologiques (**figures 2.2 et 2.10**) et le pourcentage de fréquence des Pmin et Pmax de plafonnement des relations NP/Q.

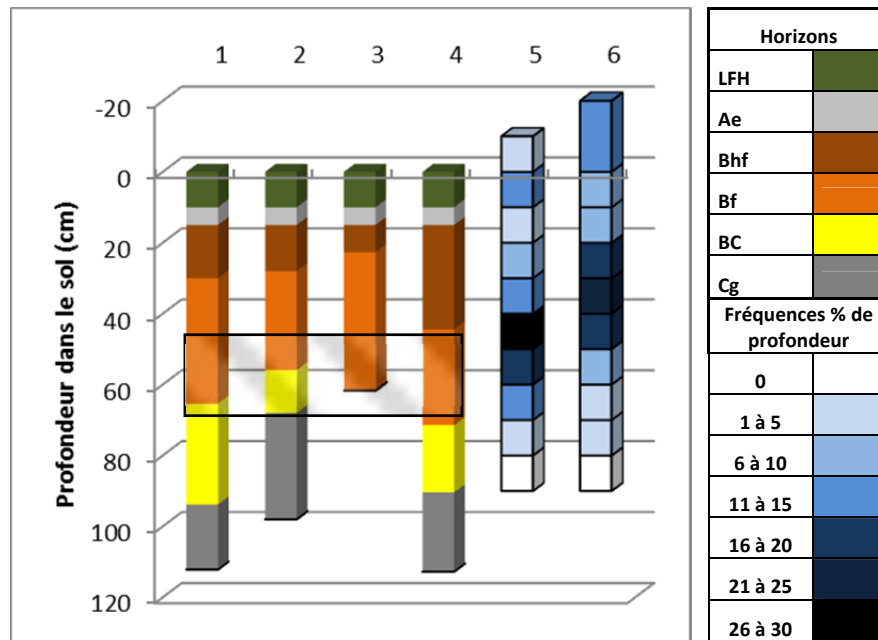


Figure 3.7 : Comparaison entre les quatre profils podzoliques des unités pédogéomorphologiques de Savoie (1988) (colonne 1 à 4), et la fréquence (%) des profondeurs maximales (colonne 5) et minimales (colonne 6) des plafonnements de NP des relations NP/Q (figure 3.5). Les colonnes 5 et 6 incluent également la hauteur maximale atteinte par la NP des relations linéaires. La zone hachurée à l'endroit des profils de sol représente l'horizon compact discontinu.

Il est important de mentionner que les résultats sont, entre autres, tributaires de la distribution spatiale des puits; même si les puits sont répartis systématiquement dans le bassin à l'étude, les versants occupant une superficie plus grande que la zone riveraine sont surreprésentés. Une attention particulière est portée à l'unité 4 puisqu'elle représente la plus grande superficie du bassin versant. Les % de fréquence les plus bas se retrouvent au niveau des horizons BC, Cg et Ae. L'augmentation du % de fréquence des Pmax (colonne 5) se présente principalement à la charnière de l'horizon BC et Bf. Le plus haut % de fréquence de Pmax (colonne 5) se trouve dans Bf et à la charnière des horizons Bf et Bhf et au-dessus de l'horizon compact situé à 50 cm dans le sol. Les plus hauts % de fréquence de Pmin (colonne 6) se situent majoritairement dans les horizons Bf et Bhf. Pour les deux profondeurs (colonnes 5 et 6), l'horizon Ae présente une fréquence plus basse d'autolimitation que l'horizon sous-jacent. En somme, les résultats montrent que l'autolimitation de la NP dans le bassin de l'Herminie s'enclenche majoritairement à la

frontière des horizons Bf et Bhf, soit au-dessus de l'horizon compact, et qu'elle plafonne majoritairement dans les horizons Bhf.

Afin de saisir l'influence potentielle de l'horizonation du sol sur la force et l'angle des relations NP/Q, la moyenne et de l'écart type sont utilisés en comparaison avec le profil de sol de l'unité 4. Les colonnes de moyenne et écart type des coefficients de Spearman et des angles sont segmentées par tranche de 10 cm à l'exception de l'épaisseur de la section affleurante qui représente 20 cm au-dessus de la surface du sol. La **figure 3.8** montre les résultats respectivement pour les Pmin et Pmax des relations NP/Q.

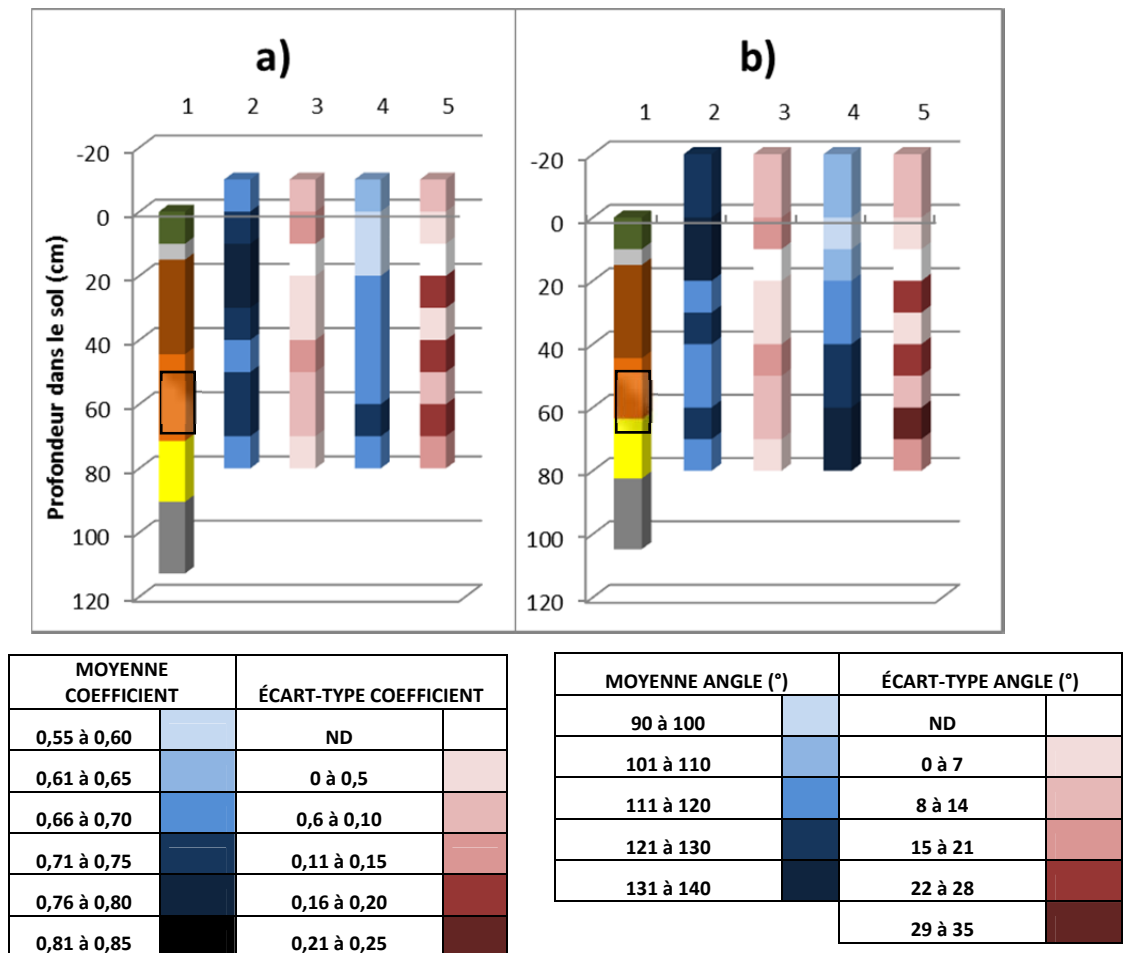


Figure 3.8 : Comparaison entre le profil podzolique de l'unité pédomorphologique no.4 (Savoie, 1988) (colonne 1), et les valeurs de moyenne (colonnes bleues 2-4) et de l'écart type (colonnes rouges 3-5) des coefficients de Spearman (colonnes 2-3) et des degrés d'angle (colonnes 4-5) des relations NP/Q, pour respectivement **a)** les profondeurs maximales et **b)** minimales de plafonnement. La légende de la colonne 1 est disponible à la **figure 3.7**. La zone hachurée à l'endroit du profil de sol (colonne 1) représente l'horizon compact discontinu.

À la **figure 3.8a**, les valeurs les plus élevées du coefficient de Spearman se trouvent dans les horizons Bhf, Bf et LFH montrant que l'enclenchement d'une autolimitation dans ces horizons annonce une forte corrélation entre NP et Q. Les valeurs d'angle sont plus basses dans les horizons LFH et plus élevées dans les horizons BC, Bf et Bhf. À la **figure 3.8b**), les coefficients de Spearman montrent de fortes valeurs principalement dans les horizons LFH et au niveau de l'eau affleurante ainsi qu'à la base de Bhf et Bf. Les valeurs d'angle sont élevées dans les horizons BC et Bf et faibles dans les horizons LFH. Ces résultats montrent que les relations NP/Q fortes s'enclenchent et plafonnent majoritairement dans les horizons situés en haut de profil.

En somme, l'investigation des facteurs d'influence sur les caractéristiques des relations NP/Q a permis de mettre en lumière l'influence significative de la distance au cours d'eau (**tableau 3.3**) et potentiellement de l'horizonation du sol (**figures 3.7 et 3.8**). Nous nous intéresserons maintenant à l'influence des structures spatiales sur le comportement de la NP dans le bassin de l'Hermine.

3.1.6 Détection des structures spatiales par l'analyse de coordonnées principales de matrices de voisinage (CPMV)

La réalisation d'une analyse CPMV permet de visualiser la structure spatiale ou patron de corrélation spatiale qui influence le comportement de NP. La présence d'hydrotopes dans le bassin suppose l'existence d'une organisation spatiale des comportements de la NP dans les puits. Ces structures peuvent changer en fonction de différentes conditions hydrologiques. En outre, l'émergence de la connectivité hydrologique suppose que la structure spatiale des hauteurs de la NP pour une condition d'humidité faible dans le bassin est différente de celle d'une condition d'humidité élevée. Ainsi, l'identification des structures spatiales pour différentes conditions d'humidité permettra de détecter l'ensemble du spectre des hydrotopes qu'il est possible de rencontrer dans le bassin versant de l'Hermine. Il devrait donc y avoir convergence dans la détection des hydrotopes par exemple entre la structure spatiale des conditions sèches des analyses CPMV et l'analyse des minima de la **section 3.1.2**. Nous posons l'hypothèse que pour des conditions d'humidité élevée, la structure spatiale de la NP recèle un plus haut niveau de détail. En effet, les conditions d'humidité élevées permettent une présence soutenue de la NP dans l'ensemble du bassin versant alors

que les conditions d'humidité très faibles ne présentent pas de NP sur les versants (**figure 3.2**). Ainsi, une structure fine en conditions d'humidité élevées peut être attribuable à la microtopographie de surface produite par les chablis, la présence de roche, la végétation, un chemin préférentiel de l'eau, etc, sur les versants. Conséquemment des conditions d'humidité faibles seraient à l'origine d'une structure spatiale grossière imputable à la présence d'unité hydromorphologique de plus grande taille telle qu'une dépression qui recèle de l'eau ou un versant sec. Nous posons également l'hypothèse que pour des conditions d'humidité élevées, la structure spatiale fine explique un plus grand pourcentage du comportement de NP. Des variables CPMV sont produites à l'aide de la matrice des coordonnées géographiques des 94 puits et constituent la matrice explicative X. Les matrices réponses Y représentent différentes conditions d'humidité dans le bassin. Voici les quatre matrices Y utilisées.

3.1.6.1 Matrices utilisées

Quatre conditions d'humidité sont considérées ici, soit intermédiaire, sèche, humide et très humide. La matrice complète (Y_C) des profondeurs de NP des 94 puits (objets) pour les 50 moments d'échantillonnage (descripteurs) représente les conditions d'humidité intermédiaire puisqu'elle intègre toutes les conditions d'humidité mesurées. Les trois autres matrices utilisées, sont extraites de la matrice complète (Y_C). La matrice Y_S , nommée la « matrice sèche », représente la matrice dont les conditions d'humidité sont faibles. Elle est composée des moments de mesure dont le nombre de puits secs est supérieur à 50 ($n = 28$). La matrice Y_H , nommée la « matrice humide », constitue la matrice dont les conditions d'humidité sont élevées. Elle représente les moments dont le nombre de puits secs est inférieur à 51 ($n = 22$). La segmentation à partir de 50 puits secs est quasi arbitraire et constituent une division de la matrice complète Y_C en deux classes, soit conditions sèche et humide d'à peu près d'égale proportion. Ainsi, la matrice humide devait inclure les mesures durant les événements de précipitation et la matrice sèche devait inclure les conditions antécédentes d'humidité de l'événement 2009 où 69 puits étaient secs. Finalement, les conditions les plus humides, représentant les moments dont le nombre de puits secs est inférieur à 25 ($n = 15$), sont extraites d' Y_H pour créer la matrice Y_{TH} , soit la « matrice très humide ». Cette matrice inclue toutes les mesures prises durant un événement de pluie et permet de dégager des structures spatiales propres aux conditions très humides du bassin.

Les variables CPMV sont produites à l'aide de la matrice des coordonnées géographiques des 94 puits.

3.1.6.2 Spatialisation et influence des structures spatiales

Les résultats du **tableau 3.4** sont présentés en cinq étapes expliquées à la **section 2.7.3.4** de la méthodologie. Dans un premier temps, l'ACR avec les 33 variables CPMV choisies expliquent significativement le comportement de la NP pour trois conditions d'humidité. Pour les conditions d'humidité sèche, le modèle ACR produit des résultats significatifs avec les dix premières variables CPMV. Deuxièmement, l'observation des variables CPMV sélectionnées permet de constater que pour des conditions sèches, les variables explicatives significatives correspondent seulement à des structures grossières (1, 3 et 4) alors que pour des conditions très humides, les variables explicatives significatives représentent des structures majoritairement plus fines (22, 2, 13, 33 et 14). À la troisième étape, on constate que pour toutes les conditions d'humidité, les structures expliquent environ 20 % du comportement de la NP. Seulement l'axe canonique 1 est significatif pour les quatre modèles. L'explication du comportement de NP par les AC1 montre une légère augmentation progressive allant de 20,1 % pour les conditions sèches à 25,0 % pour les conditions très humides. Ces valeurs sont relativement faibles et ne présentent pas de différence marquée entre les conditions d'humidité. Ainsi, les structures spatiales dans le bassin versant de l'Herminie semblent jouer un rôle mineur quant au comportement de la zone saturée.

Bien que les structures spatiales n'expliquent pas une grande proportion de la variabilité du comportement de la NP, il est pertinent d'observer la nature des patrons spatiaux. La cartographie des valeurs de l'axe canonique 1 pour chaque puits issues de l'ACR réalisé à l'aide des variables CPMV (**figure 3.9**) permet de souligner la présence d'un gradient de structure spatiale, allant de plus large pour les conditions sèches à plus fine pour les conditions plus humides. De fait, les conditions d'humidité sèche confèrent à la structure spatiale un aspect net et large distinguant seulement deux milieux de dépendances spatiales fortes, soit les versants et les deux zones humides (**figure 3.9a**).

Tableau 3.4: Résultats en cinq étapes des analyses CPMV réalisées sur les quatre matrices représentant des conditions d'humidité différentes dans le bassin versant de l'Hermine.

MODÈLES ANALYSE CANONIQUE DE REDONDANCE	MATRICES Y			
	Y _c (t=50) ^b	Y _s (t=28)	Y _H (t=22)	Y _{TH} (t=15)
1- ACR avec 33 variables CPMV (R ² ajusté) ^a	0,18 *	0,20 *	0,21 *	0,22 *
2- Variables CPMV sélectionnées progressivement	1/2/3/16/22	1/3/4	22/2/13/1/14	22/2/13/33/14
3- ACR avec variables CPMV sélectionnées (R ² ajusté)	0,19 *	0,20 *	0,19 *	0,21 *
4- Axe significatif	Axe 1	Axe 1	Axe 1	Axe 1
5- Axe significatif (R ² ajusté)	0,21 *	0,20 *	0,23 *	0,25 *

^a ACR entre 33 variables CPMV (X) et les matrices explicatives (Y) à l'exception de *Y_s où le modèle avec 33 variables n'était pas significatif ($\alpha = 0,12$) mais le modèle construit avec seulement 10 variables devient significatif.

^b t = temps (moments) de mesures de la nappe phréatique

* Significatif au seuil $\alpha = 0,05$.

Les conditions d'humidité élevée sont marquées par une structure spatiale ayant plus de détails ce qui permet de détecter plusieurs sites de dépendance spatiale sur les versants (**figure 3.9c, d**). Il est possible de distinguer quatre hydrotopes composés par des zones hydrologiques présentant une forte corrélation spatiale: 1) les sols humides (Y_s); 2) des éléments fragmentaires et longilignes, telles que BVS, RA, RN, HVS, HVN (Y_H et Y_{TH}); 3) de larges coalescences sur les versants (Y_c) et 4) des fragments sur les versants (Y_H).

En somme, l'hypothèse de l'existence d'une structure spatiale plus fine pour des conditions humides et plus grossière pour les conditions sèches, semble confirmée par les analyses CPMV. Ainsi, l'hétérogénéité du paysage dans le bassin de l'Hermine a une forte empreinte sur l'hydrologie en condition d'humidité élevée. Bien que les structures spatiales soient différentes selon les conditions d'humidité, elles expliquent toujours environ 20 à 25 % de la variation des matrices réponses, soit les fluctuations de NP. Cet état de fait soutient une influence quantitative spatiale similaire pour un large spectre de conditions hydrologiques dans le bassin mais une influence qualitative différente. Ainsi, il est possible d'affirmer qu'en conditions de faible humidité, l'hydrologie est contrôlée par les grandes irrégularités géomorphologiques et topographiques du paysage associées à une forte rétention d'eau, soit ZHN et ZHA. En condition de forte humidité, l'eau sur les versants d'apparence homogène semble être contrôlée par des irrégularités

pédomorphologiques à une échelle plus fine, tels que les racines, les roches, la microtopographie de la surface, la topographie souterraine de l'horizon compact et les horizons du sol.

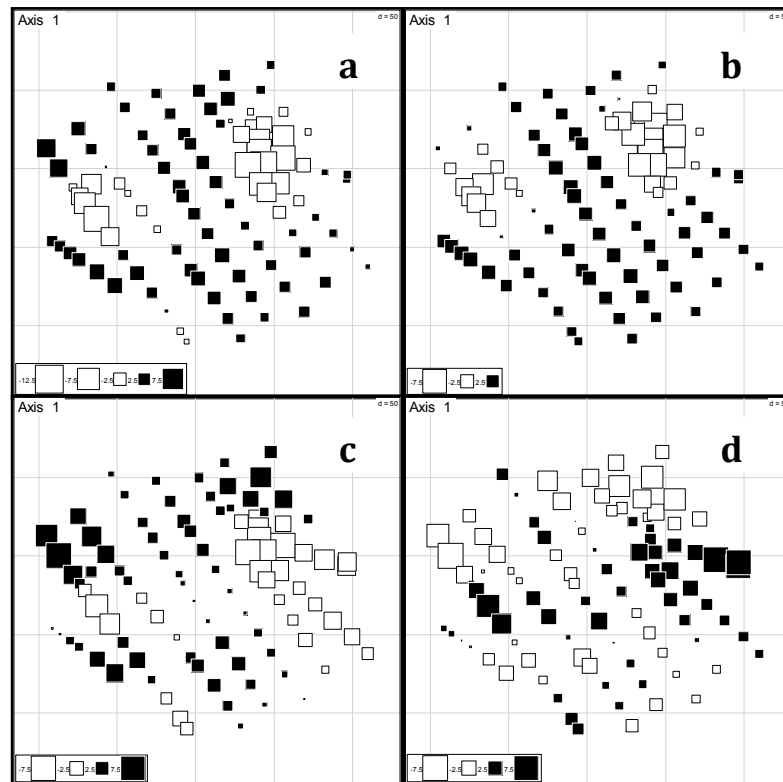


Figure 3.9 : Représentation cartographique de l'axe canonique 1 (première colonne de la matrice Z) issu de l'ACR réalisée à l'aide des variables CPMV sélectionnées respectivement pour les matrices : a) Y_c (complète); b) Y_s (sèche); c) Y_H (humide); d) Y_{TH} (très humide). Les carrés pleins correspondent aux valeurs positives (issues de la 1^{ère} colonne de la matrice Z) pour chaque piézomètre qui contribue à former l'axe canonique 1 de l'ACR alors que les carrés vides représentent les valeurs négatives (issues de la 1^{ère} colonne de la matrice Z) qui contribuent à former ce même axe. Les tailles des carrés sont proportionnelles aux valeurs cartographiées.

3.1.7 Amalgame des critères de détection des hydrotopes

3.1.7.1 Détection et description des hydrotopes

Le **tableau 3.5** collige les informations décrites lors de la détection des hydrotopes à partir des neuf critères d'analyse utilisés dans cette étude. Certains éléments du paysage, (p.ex. les rigoles) sont regroupés dans un même hydrotope. Le regroupement s'est réalisé *a posteriori*, en fonction de la fréquence de détection des hydrotopes pour chaque critère spatialisé. Au **tableau 3.5**, on observe que les hydrotopes sont détectés par au moins six critères sur neuf. L'hydrotope 3 « coalescence sur les versants » est détecté par tous les critères alors que l'hydrotope 1 « ZHN et ZHA » est détecté par le plus bas nombre de critères, soit six. Les critères qui permettent de déceler les quatre hydrotopes sont les maxima de hauteur de NP, l'analyse de groupement de NP, la profondeur des relations NP/Q et l'analyse CPMV. Le critère qui permet de détecter le moins d'hydrotopes, soit deux, est le minimum de la hauteur de NP. En considérant la diversité des critères utilisés, on constate une convergence des résultats quant à la détection de trois à quatre hydrotopes. Puisque les quatre hydrotopes sont détectés par plus de la moitié des critères, il convient de considérer l'existence de quatre hydrotopes plutôt que trois.

Tableau 3.5: Tableau synthèse de la détection des hydrotopes à l'aide des neuf critères.

Nouveaux hydrotopes	1	2	3	4	
Zones hydrologiques des hydrotopes	ZHN, ZHA	RA, RN, HVS, BVS, HVN	Coalescence sur versants	Fragment sur versants	Somme hydrotopes
Critères spatialisés					
Moyenne (%sat)	1		1	1	3
Écart-type (%sat)		1	1	1	3
Minimum (NP)	1		1		2
Maximum (NP)	1	1	1	1	4
Analyse de groupement (NP)	1	1	1	1	4
Profondeur plafonnement (NP/Q)	1	1	1	1	4
Coefficient de Spearman (NP/Q)		1	1	1	3
Angle (NP/Q)		1	1	1	3
Analyse CPMV (NP)	1	1	1	1	4
Somme des critères	6	7	9	8	

L'hydrotape 1 est représenté par les deux zones humides en permanence, les seuls détectés à l'aide des minima de NP et sans l'écart-type. De fait, ZHA et ZHN sont caractérisés par des moyennes de %_{sat} élevées, par la présence d'eau même en conditions sèches des écarts-types faibles similaires aux larges coalescences sur les versants de l'hydrotape 3. Ainsi, la présence d'une nappe phréatique stable dans les deux sols humides permet d'interpréter cet hydrotape comme celui d'une forte convergence de l'eau. L'hydrotape 2 est représenté par des zones hydrologiques circonscrites sur les versants et souvent de forme longiligne. Elles constituent les seules zones à avoir été détectées par l'écart-type sans l'avoir été par la moyenne. De fait, si les moyennes correspondent à celles des coalescences sur les versants de l'hydrotape 3, ces zones hydrologiques s'en différencient par des écarts-types élevés. Pour le reste des critères, ces zones s'apparentent à celles des hydrotapes 3 et 4. Ainsi, la présence d'une nappe phréatique dont les fluctuations sont plus élevées que le reste des versants, permet de mettre en lumière que l'hydrotape 2 constitue une zone de convergence moyenne de l'eau sur les versants. En comparaison aux hydrotapes 1 et 2, les hydrotapes 3 et 4 s'apparentent à des zones de divergence de l'eau. De fait, ils montrent toujours un degré d'humidité faible, que ce soit pour les analyses des moyennes de %_{sat}, des maxima ou

des profondeurs de plafonnement des relations NP/Q. Les hydrotopes 3 et 4 sont détectés par presque tous les critères. Toutefois, l'hydrotope 4 présente des niveaux d'humidité moins élevés que l'hydrotope 3. Par exemple, les relations NP/Q de l'hydrotope 4 montrent un plafonnement entre 40 et 70 cm de profondeur dans le sol suggérant que l'eau se draine rapidement ce qui ne permet pas à la NP de s'élever dans les horizons plus en surface du sol. Ainsi, il est possible d'interpréter l'hydrotope 3 comme un hydrotope de divergence moyenne de l'eau alors que l'hydrotope 4 incarne une divergence forte de l'eau.

Ces considérations soulignent l'existence d'un gradient d'une forte convergence pour l'hydrotope 1 vers une forte divergence pour l'hydrotope 4. La mise en évidence de l'existence de ce gradient de convergence se fonde sur une analyse comparative des hydrotopes. Ainsi, cela suggère que les hydrotopes contigus sont interdépendants et que des mécanismes hydrologiques différents caractérisent chaque hydrotope. L'analyse de la profondeur du plafonnement (**section 3.1.4**) est ici utilisée pour interpréter l'écoulement de l'eau dans les hydrotopes. L'accumulation de l'eau et l'écoulement épidermique semblent s'opérer dans l'hydrotope 1 caractérisé par une forte convergence de l'eau par une NP qui plafonne au-dessus de la surface du sol et devient donc de l'eau de surface. L'hydrotope 2 constituerait une zone d'écoulement hypodermique préférentielle puisqu'il semble que l'eau s'achemine préférentiellement dans ces zones sur les versants et que les relations NP/Q montrent un écoulement à la surface du sol ou au-dessus de cette surface. L'hydrotope 3 semble représenter un écoulement hypodermique diffus puisqu'il représente de large portion du bassin et présente des relations NP/Q qui plafonnent entre 40 et 10 cm dans le sol. Finalement, l'hydrotope 4 présente un écoulement hypodermique fragmenté puisqu'il recèle les niveaux les plus bas de NP entre 70 et 40 cm dans le sol. Le **tableau 3.6** résume l'interprétation sur la nature des hydrotopes détectés. Les qualificatifs de « forte » et « moyenne » attribués au gradient de convergence sont déterminés en fonction de la profondeur du plafonnement de la NP. Ainsi, plus le plafonnement se situe en surface, plus la convergence est estimée forte alors que les plafonnements les plus profonds sont jugés comme des zones de divergence. C'est sur une base comparative que le gradient de convergence est identifié.

Tableau 3.6 : Résumé de l'interprétation du comportement hydrologique des quatre hydrotopes du bassin de l'Hermine.

Hydrotopes	1	2	3	4
Gradient de convergence	Convergence forte	Convergence moyenne	Divergence moyenne	Divergence forte
Mécanisme d'écoulement hydrologique	Accumulation et écoulement épidermique	Écoulement hypodermique préférentiel	Écoulement hypodermique diffus	Écoulement hypodermique fragmenté

3.1.7.2 Spatialisation des hydrotopes

Pour spatialiser la résultante de l'amalgame des neuf critères, il est nécessaire de créer une seule valeur pour chaque puits. En observant la structure spatiale propre à chaque critère, le comportement de la NP de chacun des puits est classé sur une échelle de 1 à 4 par rapport au gradient de convergence de l'eau présenté au **tableau 3.6** : 1) une convergence forte; 2) une convergence moyenne; 3) une divergence moyenne et 4) une divergence forte. Ce classement se fait sur une base comparative au sein même des valeurs du même critère. Par exemple, pour le critère des minima de la NP, on octroie une valeur de « 1 » pour les puits des deux sols humides alors qu'une valeur de « 4 » est octroyée du reste du bassin. De plus, la détection visuelle de trois hydrotopes pour un critère, peut mener tout de même, à la distinction des quatre jalons du gradient. Pour le critère de l'analyse CPMV, les valeurs de la première colonne de la matrice Z des matrices Y_S et Y_H sont divisés en quatre groupes égaux représentant les quatre niveaux de convergence. Finalement, la valeur intégratrice pour chaque puits s'obtient en calculant la moyenne des valeurs de tous les critères. Ces valeurs communes sans unité varient entre 1 et 4 et elles intègrent l'information moyenne de toutes les analyses réalisées. La **figure 3.10** montre la spatialisation des quatre hydrotopes et des valeurs obtenues.

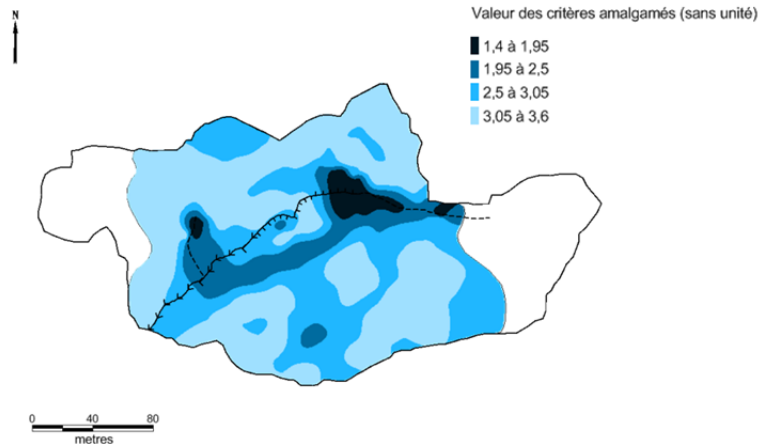


Figure 3.10 : Spatialisation des valeurs des neuf critères pour chaque puits. Les valeurs se rapprochant de 1 correspondent aux zones de convergence alors que les valeurs se rapprochant de 4 correspondent aux zones de divergence. La segmentation en quatre groupes correspondant aux quatre hydrotopes. L’algorithme d’interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

En somme, il est possible de dégager six grandes tendances spatiales à propos des hydrotopes : 1) la forte présence des hydrotopes de convergence d’eau sur le versant sud; 2) la présence de convergence d’eau au haut des versants; 3) les formes longilignes des coalescences des hydrotopes de forte et moyenne convergence; 4) la prédominance de l’hydrotope de divergence moyenne d’eau dans l’ensemble du bassin; 5) le haut degré de fragmentation de l’hydrotope de divergence forte et 6) la présence d’un fort contraste de comportement hydrologique sur le versant nord.

3.1.8 Identification des patrons spatiaux de profondeur de nappe phréatique à l’échelle événementielle

Nous explorerons ici la connectivité hydrologique lors de deux événements de précipitations dans le bassin de l’Hermine. Les hydrogrammes et hyétogrammes des deux événements pluviaux 2009 et 2010 sont présentés à la **figure 3.11**. Les conditions antécédentes d’humidité et le débit sont plus élevés pour l’événement 2010 que pour 2009. Les séries temporelles des patrons spatiaux de hauteur de la NP sont respectivement illustrées aux **figures 3.12** et **3.13**. Les zones où la NP atteint des horizons superficiels sont considérées comme des aires potentielles d’écoulement hypodermique rapide. Cet écoulement est défini comme un écoulement latéral rapide de NP dans les horizons de surface de plus grande conductivité hydraulique que les horizons sous-jacents. Pour

chacune des figures, l'émergence de zones de connectivité hydrologique est mise en lumière par des encadrés incluant le nom la zone.

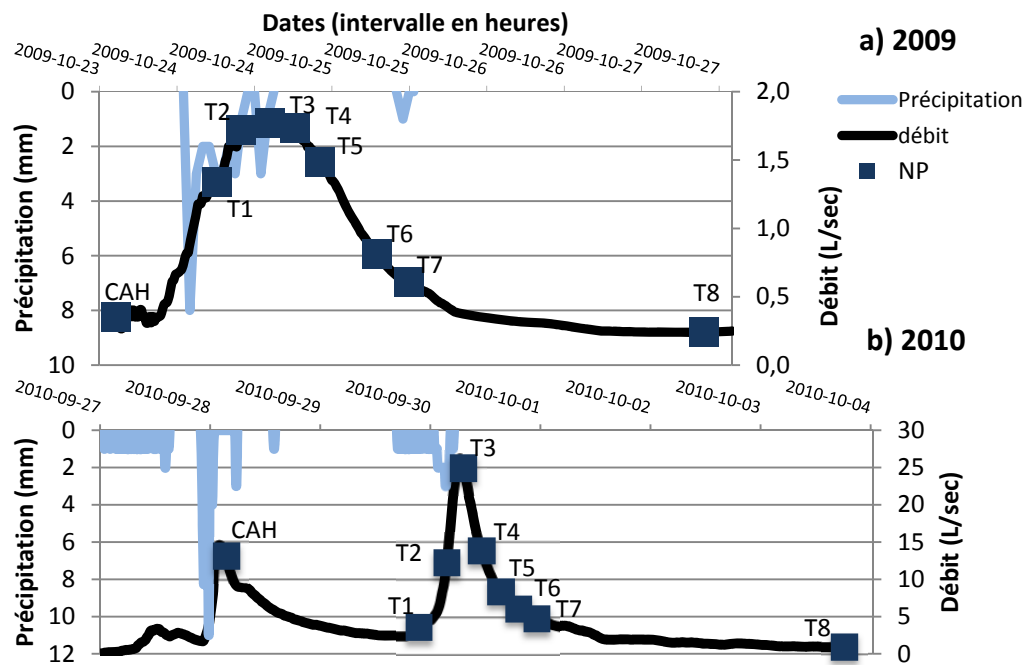


Figure 3.11 : Hydrogramme et hyétogramme des événements de précipitation survenus en **a) 2009** et **b) 2010**. Les échantillonnages de NP sont représentés par les carrés bleus et correspondent aux **figures 3.12** et **3.13**. L'abscisse est segmenté en heure mais jalonné par des dates.

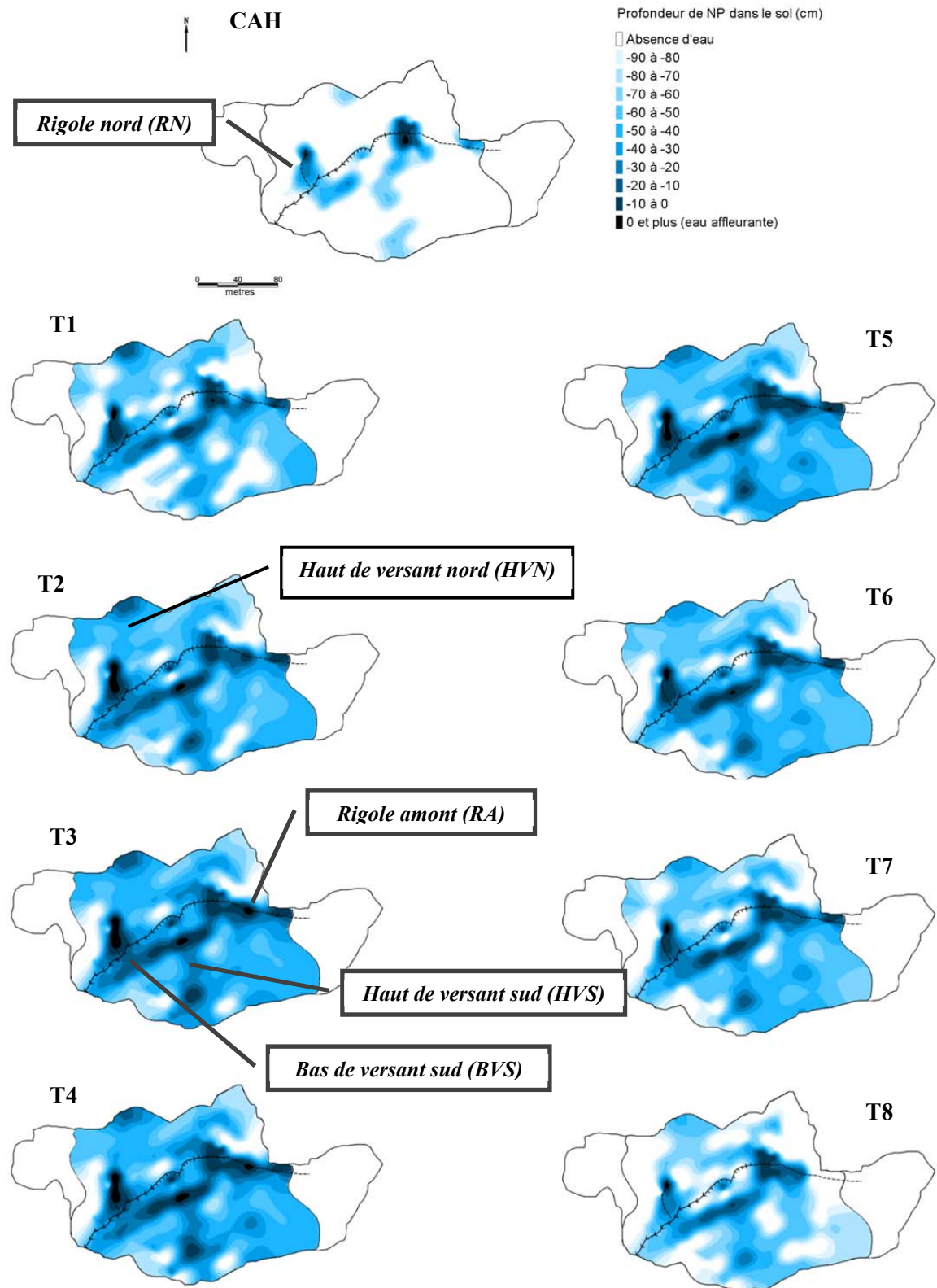


Figure 3.12 : Série temporelle des patrons de saturation de la nappe phréatique pour l'événement 2009. CAH signifie conditions antécédentes d'humidité dans le sol. Les différents temps correspondent à ceux de la **figure 3.11a**.

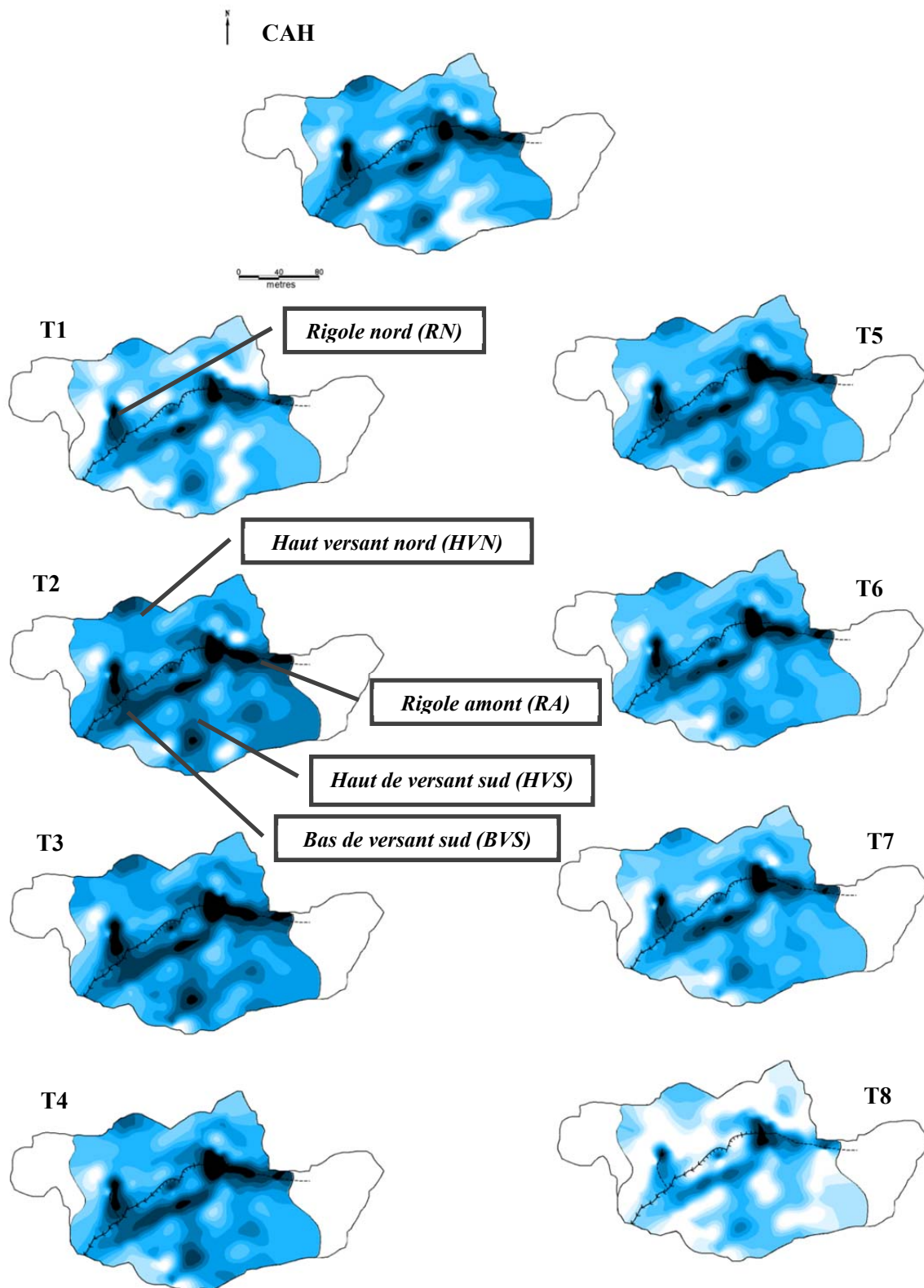


Figure 3.13 : Série temporelle des patrons de saturation de la nappe phréatique de l'événement pluvial 2010. La légende est celle de la figure 3.12. CAH signifie conditions antécédentes d'humidité dans le sol. Les différents temps correspondent à ceux de la **figure 3.11b**.

Pour les CAH de l'événement 2009, la NP se retrouve dans des zones hydrologiques bien circonscrites, soit ZHN-RN, BVS, ZHA, HVS et haut de RA. La seule zone connectée au cours d'eau est ZHN-RN. Pour les CAH de 2010, la NP est présente dans l'ensemble du bassin et elle est particulièrement plus élevée pour les zones ZHN-RN, BVS, ZHA, HVS et RA. Les zones connectées au cours d'eau sont ZHN-RN et BVS. Bien que les CAH diffèrent entre les deux événements, leurs patrons spatiaux des fluctuations de la hauteur de NP dans les puits sont similaires dans le temps. Ainsi, le développement de la connectivité hydrologique à l'Hermine s'opère de manière graduelle en trois étapes. Dans un premier temps (2009-CAH-T1 et 2010-CAH-T1), la zone ZHN-RN est connectée au cours d'eau. Deuxièmement (2009-T2 et 2010-T2), l'élévation de NP dans la zone HVN montre qu'elle se connecte à ZHN en 2009 et à ZHA en 2010. Troisièmement (2009-T3-4) et 2010-T2-3), la zone RA se connecte à ZHA, la zone BVS se connecte au cours d'eau à l'endroit de la connexion de ZHN-RN, et HVS se connecte à BVS. Bien que connectée au cours d'eau dès le début des événements, la zone ZHN-RN est à son maximum au temps 2 et 3 pour 2009 et au temps 3 pour l'événement 2010. Ainsi, la troisième phase constitue le moment où la connectivité est à son maximum. Ensuite, la déconnexion hydrologique s'effectue de manière progressive et les patrons de connectivité hydrologique observés au plus fort de la connectivité hydrologique à l'Hermine restent visibles quelques jours après l'événement de pluie, soit au temps 8.

Ainsi, le développement chronologique en trois temps de la connectivité hydrologique à l'Hermine sur les deux versants se résume selon: 1) un début de connectivité hydrologique caractérisée par une connectivité faible et diffuse sur le versant sud versus une connectivité forte et circonscrite (RN) sur le versant nord; 2) un maximum de connectivité caractérisé par une connectivité forte, large et préférentielle sur le versant sud (HVS et BVS) versus une connectivité forte mais circonscrite (RN) et faible mais circonscrite (HVN) sur le versant nord et 3) une phase de déconnexion caractérisé par une connectivité moyenne, large et préférentielle sur le versant sud versus une connectivité faible et circonscrite (RN) sur le versant nord. Les deux versants sont donc des comportements hydrologiques qui diffèrent ce qui ressortait aussi de l'analyse des hydrotopes.

Il est à noter que l'écoulement épidermique a été observé lors des temps 1 à 7 de l'événement 2010 à l'endroit de RN et RA. Ces observations de terrain confirment la présence de la nappe phréatique au-dessus de la surface du sol pour RN et RA de la **figure 3.13**.

3.1.8.1 Quantification de l'écoulement lors des connexions hydrologiques

La **figure 3.13** permet d'observer que le maximum de la connectivité hydrologique est rencontré au temps 2 et 3 de l'événement 2010. De fait, à ces moments, l'ensemble des zones de connectivité hydrologique montrent un niveau de connexion maximale. Nous avons estimé les vitesses d'écoulement dans le profil de sol pour les cinq zones de connexion ciblées de l'événement 2010 pour le temps 3, soit BVS, HVS, RA, ZHN-RN et HVN, et pour la sortie potentielle de ZHA vers le cours d'eau (**figure 3.14**).

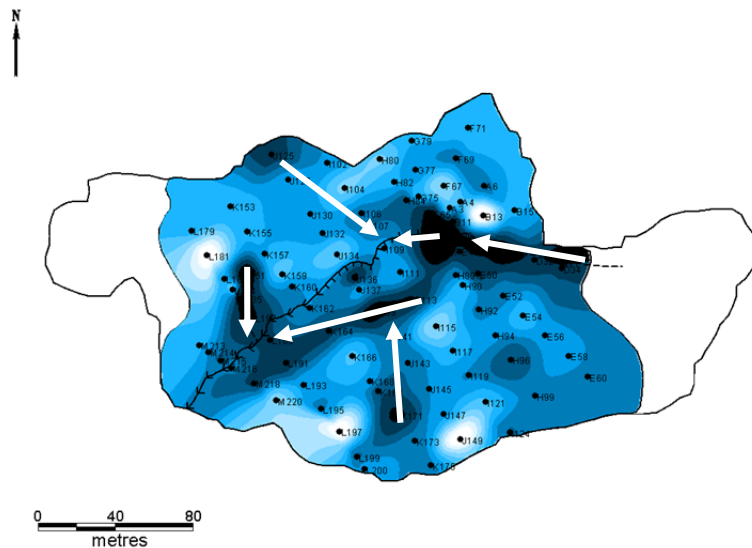


Figure 3.14 : Identification des cinq zones de connexion hydrologique utilisées pour les calculs de la vitesse de l'écoulement et du flux de volume d'eau. Les lignes blanches indiquent la distance parcourue par l'eau et le sens de l'écoulement. L'algorithme d'interpolation utilisé est le voisinage naturel simple.

La distribution verticale des K_s estimées est présentée à la **figure 3.15**. Les valeurs de K_s de l'horizon compact ne sont pas considérées. L'horizon compact est tout de même positionné dans le profil de sol de la **figure 3.15**. Un gradient croissant de K_s s'observe du bas vers le haut de profil à l'exception d'une diminution marquée de K_s à l'endroit de l'horizon Ae. Le **tableau 3.7** montre les vitesses d'écoulement respectivement pour les différentes zones de connexion suite à l'application de l'équation de Darcy. Les valeurs de K_s sont identiques pour les cinq zones de connexion, à l'exception de HVN et HVS où le sol n'est pas saturée jusqu'à la surface (**figure 3.13**). Ainsi, l'estimation de K_s pour HVN et HVS se réalise à partir d'un profil de sol saturé respectivement jusqu'à 30 cm et 15 cm sous la surface du sol. On constate que le gradient hydraulique élevé confère à RN-ZHN de plus fortes valeurs de vitesse d'écoulement latéral comparées à celles des autres zones de connexion. Pour toutes les zones de connexion, le passage d'une tranche de sol de bas de profil vers une tranche de haut de profil est associé à un doublement de la vitesse d'écoulement.

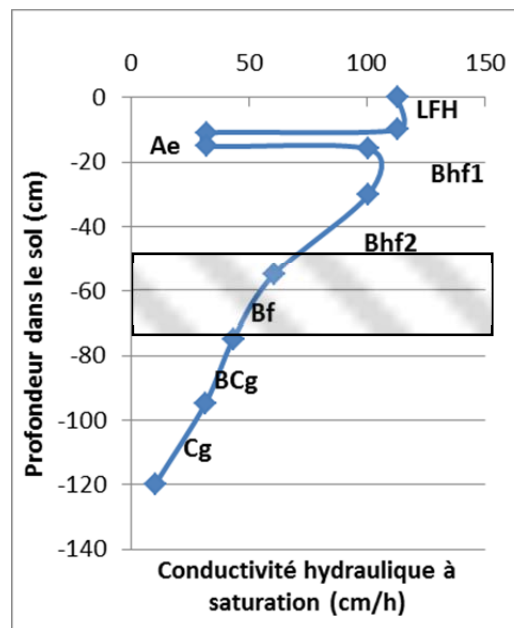


Figure 3.15: Estimation de la conductivité hydraulique à saturation d'un profil podzolique typique de l'Hermine à l'aide des FPT de Vereecken (1990) et de Rawls and Brakensiek (1985) et de trois profils de podzols laurentiens et scandinaves sur till glaciaire (Mehuys et Kimpe, 1976; Nyberg, 1995; Lind et Lundin, 1990). La valeur de LFH est fictive et fixée à 13 % supérieure à celle de Bhf1 (**section 2.7.4**). La zone hachurée représente la position de l'horizon compact. Les valeurs estimées de K_s de cet horizon ne sont pas considérées.

Tableau 3.7 : Valeur des vitesses d'écoulement latéral à saturation (cm/h) pour un profil podzolique typique complet et pour des sections précises du profil, en fonction des différentes connexions dans le bassin de l'Hermine.

<i>Gradient hydraulique (sans unité)</i>		-0,65	-0,14	-0,07	-0,20	-0,10	-0,06
<i>Écoulement (cm/h)^a</i>	<i>Horizons</i>	ZHN-RN	HVN ^b	RA	HVS ^c	BVS	ZHA
Écoulement profil complet (0 à 95 cm)	<i>LFH à BCg</i>	39,95	6,58	4,55	11,43	6,35	3,91
Écoulement hypodermique de surface (0 et 30 cm)	<i>LFH / Ae / Bhf1</i>	60,85	nd	6,93	20,33	9,67	5,96
Écoulement hypodermique moyen (30 et 55 cm)	<i>Bhf2</i>	39,73	8,63	4,53	12,30	6,31	3,89
Écoulement hypodermique profond (55 et 95 cm)	<i>Bf / BCg</i>	24,41	5,30	2,78	7,56	3,88	2,39

^aKs est calculé à partir d'un profil de sol saturé au complet.

^bKs est calculé à partir d'un profil de sol saturé jusqu'à 30 cm sous la surface.

^cKs est calculé à partir d'un profil de sol saturé jusqu'à 15 cm sous la surface.

Le **tableau 3.8** montre les résultats des flux de volume d'eau par zone de connectivité hydrologique. La connexion RN obtient le plus haut débit d'écoulement souterrain suivi par HVS, BVS, RA, ZHA et HVN. Pour toutes les zones de connexion, les valeurs de volume d'écoulement pour les deux tranches les plus profondes, soit de 30 à 95 cm, sont similaires alors que les flux dans la tranche près de la surface, soit entre 0 et 30 cm, sont deux fois supérieurs à ceux des tranches sous-jacentes. C'est pour cette raison que HVN, où l'eau n'atteint pas les horizons de surface, est associé à de faibles débits bien que son gradient hydraulique soit relativement élevé (-0,14). Cet état de fait est induit par le fait que la porosité augmente vers la surface et que le pourcentage de fragments diminue vers la surface (**figure 2.8**).

Tableau 3.8: Débit de l'écoulement pour les cinq zones de connexion ciblées en plus de la sortie de ZHA. Les épaisseurs du profil de sol saturé sont les mêmes qu'au **tableau 3.7**.

Profondeur de la zone de connexion hydrologique		Profondeur de la zone de connexion hydrologique	
	Écoulement (L/sec)		Écoulement (L/sec)
RN (0 à 95 cm)	0,81	HVS (0 à 95 cm)	0,26
RN (0 à 30 cm)	0,48	HVS (0 à 30 cm)	0,16
RN (30 à 55 cm)	0,19	HVS (30 à 55 cm)	0,06
RN (55 à 95 cm)	0,14	HVS (55 à 95 cm)	0,04
HVN (0 à 95)	0,07	BVS (0 à 95)	0,13
HVN (0 à 30 cm)	nd	BVS (0 à 30 cm)	0,08
HVN (30 à 55 cm)	0,04	BVS (30 à 55 cm)	0,03
HVN (55 à 95 cm)	0,03	BVS (55 à 95 cm)	0,02
RA (0 à 95 cm)	0,09	ZHA (0 à 95)	0,08
RA (0 à 30 cm)	0,05	ZHA (0 à 30 cm)	0,05
RA (30 à 55 cm)	0,02	ZHA (30 à 55 cm)	0,02
RA (55 à 95 cm)	0,02	ZHA (55 à 95 cm)	0,01

3.1.8.2 Détermination des types de relations des connexions hydrologiques

Afin de comprendre les mécanismes de mise en branle du raccordement des zones de connectivité hydrologique, soit HVS, BVS, HVN, ZHN-RN, RA et ZHA, nous avons examiné les relations entre la profondeur de NP d'un puits en aval de la connexion et celle du puits en amont de la zone de connexion, soit la source. Les puits « amont » et « aval » sélectionnés pour chaque zone sont présentés à la **figure 3.16**. L'intérêt de cette analyse repose sur la compréhension de l'influence des fluctuations d'une zone en aval sur une zone en amont dans un contexte où la zone est marquée par une corrélation spatiale. La présence de seuil est considérée seulement si l'accroissement de la hauteur de NP de la partie en aval de la connexion (en ordonnée) s'entame à une profondeur plus grande que la position de NP de la source en amont (en abscisse) au même moment. Les flèches indiquent les points d'inflexion, c.-à-d. des changements de forme dans les relations. Ce type de point d'inflexion souligne la présence potentielle d'un obstacle physique qui gêne l'écoulement de l'eau en aval si un seuil n'est pas dépassé. Ce mécanisme d'écoulement s'apparente au mécanisme *fill and spill*. À la **figure 3.17**, les connexions ZHN/RN, RA et HVS présentent

des relations non linéaires qui s'apparentent au phénomène du *fill and spill* rencontré dans la littérature lorsque le socle rocheux présentait des irrégularités (Spence et Woo, 2003; Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006b). Le HVN présente une relation linéaire correspondant vraisemblablement à un écoulement continu sans entrave majeure. Le BVS et ZHA présentent des relations plus ou moins bien définies. Ceci provient entre autres du fait que l'eau de ces zones peut provenir de plusieurs endroits mettant en lumière la difficulté à identifier le puits le plus approprié pour cette analyse.

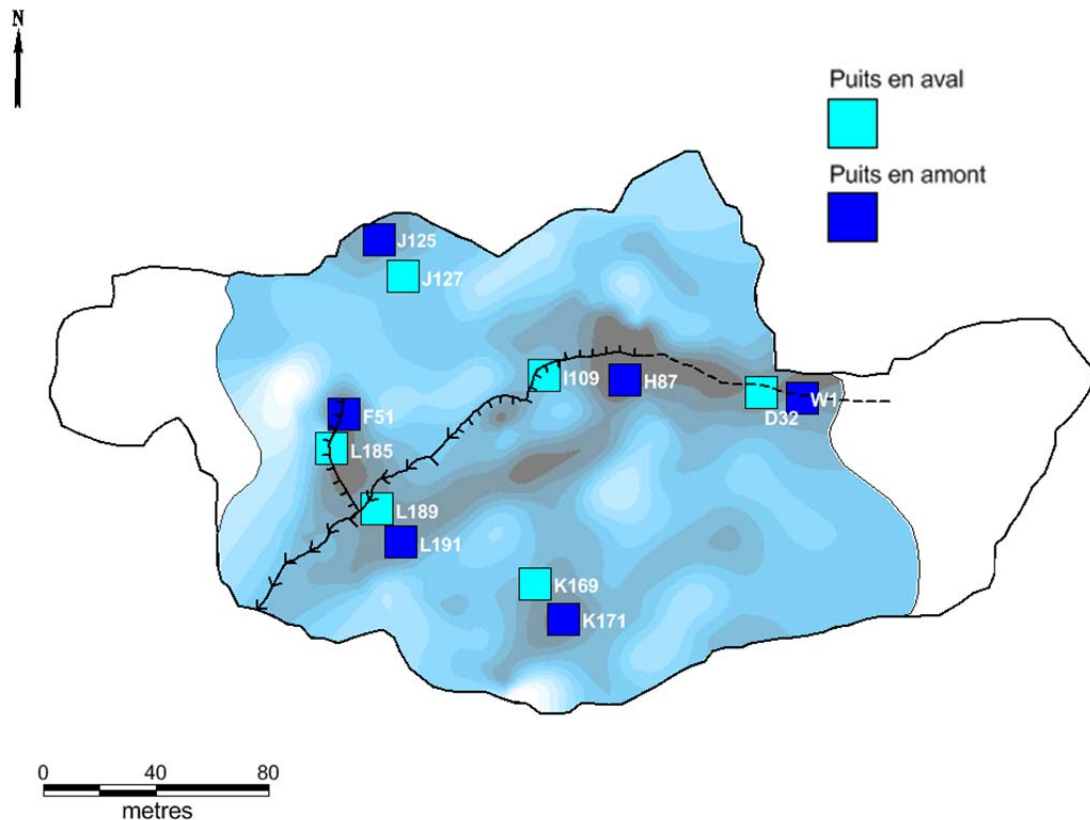


Figure 3.16 : Localisation des puits en amont et en aval sur la carte des patrons spatiaux de profondeurs de NP au temps 3 lors de l'événement de pluie de 2010 (**figure 3.13 modifiée**).

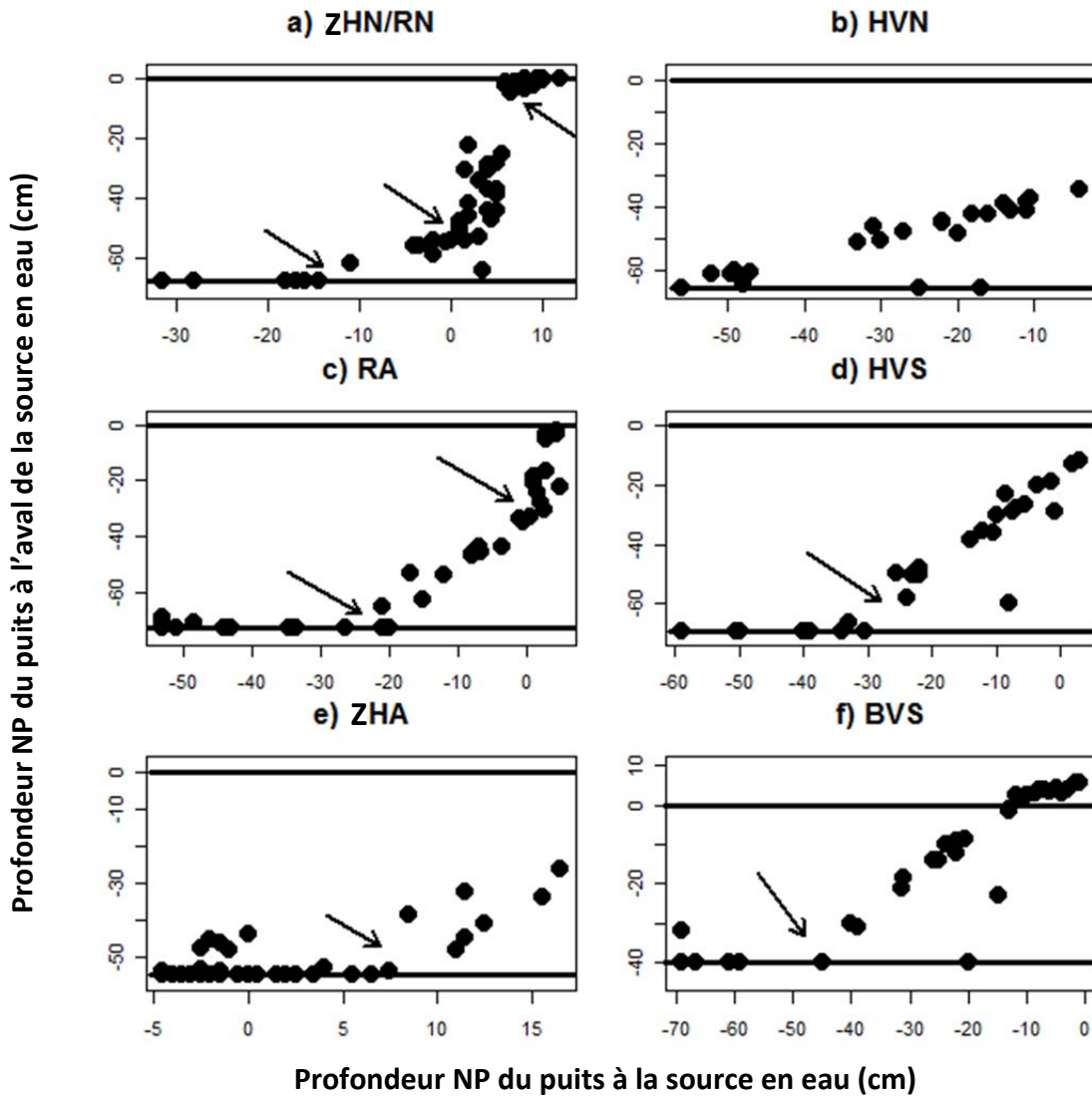


Figure 3.17 : Relation entre la profondeur de NP du puits situé en aval de la source potentielle en eau et celle du puits situé à la source. Les couples de puits aval/source sont : a) L185 / F51; b) J127 / J125); c) D32 / W1; d) K169 / K171; e) I109 / H87; f) L189 / L191. Les flèches noires représentent les points d'inflexion des relations et les lignes noires horizontales indiquent la surface du sol (0 cm) et la profondeur maximale du puits.

3.1.9 Synthèse des résultats de l'objectif 1

Nous avons mis en évidence la diversité des comportements hydrologiques de différentes zones dans le bassin de l'Herminie par la détection d'hydrotopes. Les hydrotopes présentent des niveaux variés de coalescence et occupent des superficies distinctes dans le bassin. La spatialisation de neuf critères a permis de cibler quatre hydrotopes : 1) les zones humides correspondant à une forte convergence d'eau (ZHN et ZHA); 2) les zones d'écoulement préférentiel d'eau sur les versants correspondant à une convergence intermédiaire de l'eau (BVS, RN, RA, HVS et HVN); 3) les zones d'écoulement diffus sur les versants correspond à une divergence intermédiaire de l'eau (coalescence large sur les versants) et 4) les zones fragmentées d'écoulement faible sur les versants correspondant à une divergence forte de l'eau (coalescence fragmentée sur les versants). Les zones de convergence forte et moyenne de l'eau se situent autant dans la zone riveraine que sur les versants. La distance aux limites du bassin versant constitue un facteur explicatif significatif du comportement de la NP dans le sol. Ceci pourrait être induit par l'impact significatif du volume d'eau sur le comportement de NP au point de mesure. Nous avons aussi montré que l'horizonation du sol peut jouer un rôle important sur le comportement de NP. De fait, la majorité des plafonnements des relations NP/Q s'opère dans les horizons Bhf et LFH. Les horizons près de la surface dans le bassin de l'Herminie semblent plus transmissifs comme en témoignent l'existence de relations NP/Q plus fortes et d'angles de ces relations plus faibles en surface. La distribution spatiale des hydrotopes, montre que la zone riveraine et les versants constituent des zones dont le comportement hydrologique est hétérogène, spécifiquement en condition de forte humidité, et que les facteurs qui contrôlent ce comportement s'apparentent plus aux caractéristiques pédologiques qu'à la topographie de surface.

Ensuite, nous avons analysé les zones de connexion hydrologique durant deux événements de précipitation afin d'en estimer la contribution au débit du cours d'eau. Les zones de forte connectivité hydrologique sont RN, BVS, RA, HVS et HVN. Elles correspondent à l'hydrotope de convergence moyenne. Il semble que la connexion RN possède une grande capacité à transmettre rapidement l'eau du versant vers le cours d'eau en raison de son gradient hydraulique élevé et de la présence de la NP dans les horizons près de la surface.

Ainsi, le versant nord présente un drainage plus fort en raison de l'existence d'une connectivité hydrologique circonscrite forte en comparaison au versant sud où la connectivité hydrologique est plus diffuse. Les horizons près de la surface seraient également les horizons présentant les plus hauts débits. Certaines zones de connexion hydrologique, soit ZHN-RN, RA et HVS, semblent se comporter selon le mécanisme du *fill and spill* ce qui suggère l'existence d'obstacles à l'écoulement dans le sol ou de dépressions souterraines.

En somme, deux mécanismes non linéaires sont décelés à l'Hermine, soit 1) la transmissivité rétroactive positive de la NP dans les sols et 2) l'existence du phénomène du *fill and spill* de la zone saturée. La connectivité hydrologique à l'Hermine est caractérisée par : 1) des fluctuations de NP dont les écart-types sont élevés; 2) des maxima d'élévation de NP dans le sol; 3) des relations NP/Q non linéaires qui présentent une autolimitation à angle fort se situant entre 30 cm sous la surface du sol et 20 cm au-dessus de la surface du sol; 4) des coefficients de Spearman élevés pour les relations NP/Q à l'aval des zones de connexion et 5) une dépendance spatiale forte.

3.2 Variabilité spatio-temporelle et signature géochimique des sources potentielles en eau pour l'événement d'automne 2010 - Objectif 2

3.2.1 Traitement des données

Le **tableau 3.9** montre les valeurs de limites de détection pour chaque élément trace incluant Mn et Fe. Puisque le dosage a été réalisé en deux jours et que les limites de détection sont calculées quotidiennement, il existe deux valeurs pour chaque élément. Pour certains éléments, soit As, Cd, Pb, Se et Tl, plus de 50 % des concentrations sont sous la limite de détection (sld) pour quelques sources et le cours d'eau. Une valeur sld peut ainsi être représentée par une valeur négative ou positive. L'élément Tl est évacué des analyses puisque la majorité de ses concentrations sont négatives. Malgré le fait qu'As, Cd, Pb et Se, présentent un pourcentage élevé de valeurs sld, ces dernières sont conservées dans les analyses. Pour les cas isolés de sld négatives, elles sont remplacées par la valeur minimale des concentrations de cet élément dans un compartiment incluant les valeurs sld. Cette méthode de substitution des valeurs sld permet de conserver des éléments dont les

concentrations dans les sources sont faibles et de considérer une variabilité raisonnable dans une série temporelle. En effet, notre approche étant exploratoire, il devient pertinent de considérer ces valeurs. Néanmoins le comportement de ces éléments est analysé avec discernement. Un nombre restreint d'éléments présentent des concentrations anormalement élevées. Le cas échéant, la valeur a été remplacée par une concentration moyenne de l'ensemble des sites d'un compartiment. La plupart de ces valeurs jugées anormales sont conservées dans les figures et évacuées des tableaux. C'est le cas de T26, pour lequel s'observe une concomitance de concentrations élevées en Cu, Ni, Zn et Fe dans le cours d'eau et dans le puits D2. C'est également le cas pour le site 9 dont les concentrations sont élevées pour DOC, Mn, Zn, Rb et Fe. Puisque l'utilisation des éléments traces dans cette étude s'inscrit dans une approche exploratoire, il est légitime d'inclure ces concentrations élevées dans les analyses afin de pouvoir faire la lumière sur la nature possiblement erronée ou porteuse d'information de ces valeurs. En discussion (**section 4.9**), nous reviendrons sur cet aspect de la méthodologie.

Tableau 3.9: Limite de détection pour chaque élément trace à l'étude incluant Fe et Mn.

Éléments traces	Concentration (µg/L)	Éléments traces	Concentration (µg/L)
As	0,050-0,089*	Ni	0,064-0,083
Ba	0,010-0,033	Pb	0,023-0,024
Cd	0,008-0,009	Rb	0,005-0,008
Ce	0,005-0,007	Se	0,012-0,044
Co	0,007-0,020	Sr	0,003-0,007
Cr	0,007-0,016	Tl	0,012-0,040
Cu	0,078-0,103	V	0,012-0,020
Fe	0,132	Y	0,007-0,013
Mn	0,006-0,031	Zn	0,101-0,136

* les valeurs individuelles correspondent à la limite de détection quotidienne.

3.2.2 Signatures géochimiques des sources potentielles

Dans cette section, les sources LFH, B et NP sont regroupés sous l'appellation de « sols bien drainés », alors que les zones ZHN et ZHA sont dénommés « zones humides » ou « sols humides ». Cette distinction est basée sur l'hypothèse que le régime hydrologique d'un sol influence sa géochimie. La comparaison des concentrations moyennes entre les sources potentielles en eau permet de cibler les éléments identificateurs de ces dernières (**tableaux 3.10 et 3.11**). Dans ces tableaux, les collecteurs de chaque source potentielle en eau sont considérés comme des répliquats spatiaux alors que dans les graphiques qui suivent, les collecteurs sont analysés indépendamment afin d'extraire l'information sur leur variabilité spatio-temporelle. L'erreur type de la moyenne (EtMoy) aide à cibler de manière efficace les différences significatives entre les moyennes puisqu'il décrit la précision de l'estimation de la moyenne dans une population. De fait, il estime la taille de la fluctuation dans les moyennes qui est causée par l'erreur d'échantillonnage. De plus, le fait que EtMoy diminue lorsque n augmente montre son lien avec la notion de puissance. Les horizons LFH recèlent des concentrations moyennes en élément dissous globalement plus élevées que les horizons B et la NP, notamment pour COD, Fe et H⁺. La Si constitue le seul élément qui présente des concentrations plus élevées pour les sources B et NP comparativement à LFH. Les zones humides se caractérisent par les concentrations les plus élevées en Mn et de faibles concentrations en H, Cd et Pb. La différence entre les deux zones humides repose sur des concentrations plus élevées en Mn et Co pour ZHN et en Si, Sr et CE pour ZHA. Dans l'ensemble, certaines sources, telles que les zones humides, présentent un coefficient de variation (%CV) élevé, ce qui témoigne d'une haute variabilité temporelle ou spatiale des concentrations dissoutes au sein de la source.

Tableau 3.10: Statistiques descriptives des caractéristiques physico-chimiques des sources potentielles situées dans des milieux humides.

Physico-chimie	ZHA (n = 24) ^a			ZHN (n = 24) ^b			Débordement-ZHN (n = 3) ^c		
	Moy ^d	CV(%) ^e	EtMoy ^f	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy
Éléments majeurs									
CE (µS/cm)	43,5	48	4,3	18,0	23	0,85	18,0	33	3,5
COD (mg/L)	6,6	32	0,43	4,1	64	0,54	7,3	16	0,67
Fe (µg/L)	62,1	128	16,2	27,3	151	8,4	9,7	64	3,6
H (µmol/L)	0,29	180	0,11	1,0	95	0,20	2,2	77	0,98
Mn (µg/L)	67,3	174	24,0	177,1	99	35,6	58,8	3	0,97
OD-fond (mg/L)	0,11	18	0,004	0,21	116	0,05	nd ^g	nd	nd
OD-milieu	2,4	72	0,35	1,2	146	0,36	nd	nd	nd
OD-surface	3,0	57	0,35	1,7	109	0,37	nd	nd	nd
moyenne-OD	1,8	53	0,20	1,0	87	0,18	nd	nd	nd
Si réactive (mg/L)	18,0	39	1,4	3,7	15	0,11	3,1	3	1,0
Éléments traces (ug/L)									
As	<u>0,08</u> ^h	<u>54</u>	<u>0,01</u>	<u>0,09</u>	<u>54</u>	<u>0,01</u>	0,09	36	0,02
Ba	14,45	87	2,55	10,32	16	0,33	9,30	19	1,04
Cd	<u>0,02</u>	<u>148</u>	<u>0,01</u>	0,04	28	0,002	0,04	27	0,01
Ce	0,09	84	0,02	0,35	96	0,07	0,12	34	0,02
Co	0,16	107	0,04	0,59	117	0,14	0,18	40	0,04
Cr	0,18	77	0,03	0,14	56	0,02	0,10	30	0,02
Cu	0,25	73	0,04	0,33	105	0,07	0,25	19	0,03
Ni	0,22	52	0,02	0,39	37	0,03	0,32	20	0,04
Pb	<u>0,06</u>	<u>168</u>	<u>0,02</u>	0,06	94	0,01	<u>0,06</u>	<u>111</u>	<u>0,04</u>
Rb	0,35	84	0,06	0,55	68	0,08	0,44	31	0,08
Se	<u>0,03</u>	<u>59</u>	<u>0,004</u>	<u>0,03</u>	<u>56</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>69</u>	<u>0,005</u>
Sr	34	49	3,4	14	15	0,45	12	7	0,47
Tl	sld	sld	sld	sld	Sud	sld	sld ⁱ	sld	sld
V	0,47	98	0,09	0,13	58	0,02	0,14	39	0,03
Y	0,19	52	0,02	0,34	84	0,06	0,14	15	0,01
Zn	6,55	168	2,24	7,43	21	0,32	7,09	16	0,64
Température (°C)									
Température-au fond	11,92	8	0,39	11,60	6	0,26	nd	nd	nd
Température-au milieu	11,77	9	0,45	11,60	6	0,28	nd	nd	nd
Température-en surface	11,82	10	0,49	11,68	7	0,32	nd	nd	nd
Température moyenne	11,83	1	0,05	11,63	1	0,03	nd	nd	nd

^aZHA = Zone humide amont où n = 24 soit 4 puits x 6 moments d'échantillonnage.

^bZHN = Zone humide nord où n = 24 soit 4 puits x 6 moments d'échantillonnage.

^cÉchantillonnage fixe à 3 moments lors du débordement épidermique de ZHN.

^dMoy = Moyenne.

^e%CV = % Coefficient de variation.

^fEtMoy = Erreur type de la moyenne.

^gnd = non disponible.

^hLes valeurs soulignées signifient que plus de 50 % des concentrations du compartiment sont sous la limite de détection.

ⁱsld = sous limite de détection.

Tableau 3.11 : Statistiques descriptives des caractéristiques chimiques des sources potentielles situées dans des milieux bien drainés.

Éléments	LFH-BVS (n = 6)			LFH-HVS (n = 7)			B-BVS (n = 9)			B-HVS (n = 9)			NP-BVS (n = 9)			NP-HVS (n = 9)		
	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy	Moy	CV(%)	EtMoy
Majeurs																		
CE (µS/cm)	26,0	35	3,7	40,2	32	4,8	11,3	8	0,29	14,9	23	1,2	15,9	25	1,3	16,5	16	0,86
COD (mg/L)	28,5	19	2,2	36,9	24	3,3	2,5	9	0,08	2,2	16	0,12	0,38	48	0,06	0,36	38	0,04
Fe (µg/L)	218	28	24,8	217	45	36,8	3,1	41	0,42	2,4	50	0,40	3,4	48	0,55	2,4	53	0,43
H (µmol/L)	36,3	71	10,4	85,2	33	10,7	2,1	50	0,34	1,6	63	0,34	1,4	117	0,54	0,98	44	0,14
Mn (µg/L)	29,8	46	5,6	7,5	63	1,8	2,8	43	0,40	3,4	45	0,51	1,6	48	0,26	2,6	59	0,51
OD (mg/L)	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Si réactive (mg/L)	1,8	52	0,38	0,80	51	0,16	2,9	3	0,03	3,3	9	0,10	3,7	22	0,28	3,3	11	0,12
Traces (ug/L)																		
As	0,22	40	0,04	0,46	22	0,04	<u>0,06</u>	<u>23</u>	<u>0,005</u>	<u>0,06</u>	<u>74</u>	<u>0,02</u>	<u>0,06</u>	<u>74</u>	<u>0,02</u>	<u>0,06</u>	<u>57</u>	<u>0,01</u>
Ba	23,8	24	2,3	22,7	22	1,9	8,4	28	0,78	7,9	13	0,35	7,1	48	1,1	7,5	5	0,12
Cd	0,23	48	0,04	0,11	65	0,03	0,04	15	0,002	0,03	81	0,01	0,04	42	0,01	0,04	50	0,01
Ce	0,49	63	0,13	0,75	53	0,15	0,10	22	0,01	0,09	48	0,01	0,07	45	0,01	0,06	80	0,02
Co	0,20	21	0,02	0,42	17	0,03	0,40	10	0,01	0,23	51	0,04	0,33	48	0,05	0,32	20	0,02
Cr	0,30	28	0,03	0,34	17	0,02	0,10	13	0,004	0,12	52	0,02	0,09	20	0,01	0,10	22	0,01
Cu	1,4	14	0,09	1,3	35	0,17	0,23	48	0,04	0,23	100	0,08	0,22	44	0,03	0,20	55	0,04
Ni	1,0	33	0,14	1,3	33	0,16	0,35	31	0,04	0,24	22	0,02	0,31	42	0,04	0,21	36	0,03
Pb	14,6	73	4,4	16,2	54	3,3	3,3	23	0,26	1,0	92	0,31	0,18	65	0,04	0,05	53	0,01
Rb	0,36	83	0,12	0,22	48	0,04	0,12	57	0,02	0,11	96	0,03	0,09	53	0,02	0,09	79	0,02
Se	0,13	33	0,02	0,18	23	0,02	<u>0,004</u>	<u>99</u>	<u>0,001</u>	<u>0,03</u>	<u>124</u>	<u>0,01</u>	<u>0,03</u>	<u>157</u>	<u>0,01</u>	<u>0,03</u>	<u>112</u>	<u>0,01</u>
Sr	18,6	24	1,9	13,2	23	1,1	9,9	9	0,29	13,1	23	1,0	14,4	36	1,7	13,9	12	0,54
Tl	sld	sld	sld	sud	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld	sld
V	0,92	20	0,08	1,7	11	0,07	0,10	16	0,01	0,08	65	0,02	0,08	28	0,01	0,06	40	0,01
Y	0,25	61	0,06	0,29	51	0,06	0,16	27	0,01	0,17	19	0,01	0,18	37	0,02	0,15	24	0,01
Zn	15,9	41	2,7	6,5	46	1,1	7,8	29	0,75	3,7	61	0,76	6,1	57	1,16	2,9	43	0,42

^aLes acronymes, abréviations et surlignages ont la même signification qu'au **tableau 3.10**.

^bBVS = Bas de versant sud.

^cHVS = Haut de versant sud.

^dn = 3 collecteurs x nombre de moments d'échantillonnage.

3.2.3 Variabilité spatio-temporelle des sources et mécanismes géochimiques

Des analyses en composantes principales sont réalisées afin : 1) de cibler la variabilité spatio-temporelle des sources potentielles durant l'événement et 2) de réduire l'information propre à la variabilité de tous les éléments qui reflètent la signature géochimique des sources. Le cadrage de type II est utilisé puisque l'objectif principal est orienté vers l'observation des descripteurs. Dans ces graphiques, les collecteurs des sources potentielles en eau sont considérés indépendamment afin de vérifier s'ils pourraient constituer des répliquats spatiaux ou non.

3.2.3.1 Analyse en composante principale sur l'ensemble des sources potentielles en eau

La matrice utilisée pour réaliser l'ACP sur l'ensemble des sources potentielles en eau est composée de 21 descripteurs correspondant aux éléments dissous dont six éléments majeurs (EM) et 15 éléments traces (ET). Le jeu de données est formé de 97 objets dont 49 pour les sols bien drainés et 48 pour les sols humides. Les objets correspondent à un instrument dans une source et à un temps d'échantillonnage. Ainsi, « K2-T3 » signifie le puits K2 de ZHA échantillonné au temps 3 de l'événement de précipitation. La description détaillée du nombre d'objet par source est disponible aux **tableaux 3.10 et 3.11**. Dans les diagrammes de double projection, les objets sont représentés par des couleurs correspondant aux cinq sources et sont ciblés lorsqu'il y a lieu de préciser l'instrument ou le temps d'échantillonnage. La **figure 3.18a**) des composantes principales 1 et 2 (CP1 et 2) de l'ACP, montre que le regroupement des objets se fait par sources et par collecteurs plutôt que par temps d'échantillonnage. Les sources B et NP montrent une faible variabilité spatio-temporelle alors qu'une plus forte variabilité spatiale s'observe au sein des zones humides et LFH. Les CP1 et CP2 expliquent respectivement 38 % et 18 % de la variance totale. La CP1 est formée par la majorité des vecteurs corrélés entre eux, dont COD, Fe et plusieurs ET. Aucun vecteur ne s'oppose à la CP1 montrant l'absence de corrélations négatives entre les éléments dans sa formation. Néanmoins, la source LFH, associée au maximum de variabilité des éléments, s'oppose aux sources NP, B et à quelques puits de ZHN et ZHA. Ainsi, 38 % de la variance des éléments dissous est expliquée par la présence de MO dans les horizons. L'axe est interprété comme une opposition entre les horizons minéraux (B, NP et partiellement ZHN et ZHA) et organiques (LFH). La CP2 est formée de

cinq vecteurs principaux, soit Si, Se, Mn, Rb et CE, et est associée aux zones humides, principalement le puits K2 de ZHA, et exclusivement le puits D3 de ZHN. Aucun vecteur négativement corrélé ne contribue à former cet axe alors que la source LFH s'oppose aux zones humides. La CP2 est interprétée comme un gradient d'humidité composé en ordre décroissant: des sols fréquemment inondés (ZHA, ZHN), les sols parfois inondés (NP, B) et, enfin, des sols rarement inondés (LFH).

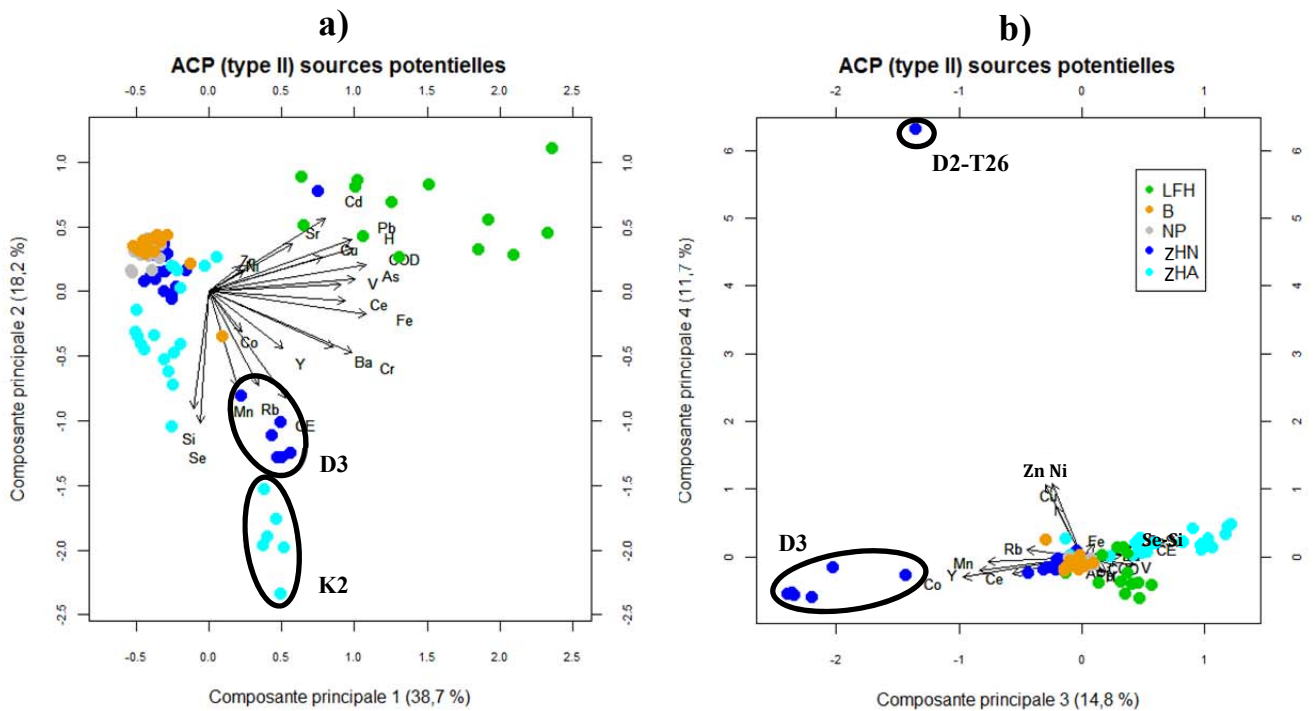


Figure 3.18 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 (a) et 3 et 4 (b) de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de la géochimie des cinq sources potentielles. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points de couleurs représentent les sources potentielles en eau et constituent les objets de la matrice. Les acronymes des sources dans la légende et les figures ainsi que la distribution spatiale des collecteurs se trouvent à la **figure 2.6**. Les cercles noirs délimitent les groupes d'objets qui représentent un minimum de cinq puits identiques sur six.

La **figure 3.18b**) des CP3 et CP4 de l'ACP, montre que le regroupement des objets se fait par source et par collecteur plutôt que par temps d'échantillonnage. Les sources B et NP maintiennent une faible variabilité spatio-temporelle alors qu'une plus forte variabilité spatiale s'observe au sein des zones humides. La CP3 explique 15 % de la variance totale et oppose les vecteurs Mn, Y, Co, Ce et Rb, surtout associés à ZHN, aux vecteurs Si, CE et Se, associés, eux, à ZHA. Ces deux sols humides constituent des zones dont le potentiel d'altération de la matrice minérale devrait être similaire, menant à des concentrations en Si semblables puisque la Si est un produit de l'altération *in situ* du matériel minéral.

Toutefois, la source ZHA présente des concentrations moyennes en Si de loin plus élevées que celles de ZHN (18 vs 3 mg/L). Cette différence marquée pourrait être induite par la présence de silice biogénique sous forme de Si amorphe dans la source ZHA en raison de l'abondance et la nature des végétaux. En effet, ZHA est plus végétalisée que ZHN et sa composition floristique d'herbacées (monocotylédone) est reconnue pour contenir plus de Si que les dicotylédones (Struyf et Conley, 2009) représentant la majorité de la flore forestière du bassin. En outre, Hodson *et al.* (2005) montrent que les plantes non vasculaires, particulièrement les hépatiques, qui sont présentes dans ZHA, sont accumulatrices de Si. Ces végétaux puisent la Si de la solution de sol et la déposent dans leur tissu sous forme de corps siliceux de Si amorphe nommée phytolithes. La croissance de biomasse de végétaux riches en Si amorphe peut mener à l'accumulation de Si et conséquemment à des concentrations élevées de Si biologique dans les milieux humides. De surcroît, la potentielle présence de diatomées, de thécamoébiens et d'éponges, dont la paroi cellulaire est formée, entre autres, de Si amorphe, pourrait participer à l'augmentation de Si dans les sols humides (Struyf et Conley, 2009). Ainsi, la CP3 incarne une opposition entre, d'une part, une prédominance des processus biochimiques représentée par ZHA où un important recyclage biologique semble s'opérer et, d'autre part, une prédominance des processus géochimiques représentée par ZHN où l'absence de végétaux suggère un faible recyclage biologique végétale. Cette interprétation est consolidée par le lien dans la **figure 3.18b**), entre les sources ZHA et les horizons LFH qui constitue un haut lieu d'accumulation du recyclage biologique et, aussi, entre les sources ZHN et B/NP qui constituent des milieux minéraux sans composante biologique forte. La CP4 s'organise autour des descripteurs Zn, Ni et Cu associés au puits D2 du temps 26. Il est difficile d'interpréter cet axe qui est associé à une augmentation de concentration très circonscrite dans le temps et l'espace. Les résultats subséquents contribueront à expliquer cet axe. Il est pertinent de souligner que, les CP2 et CP3 formées surtout par les sols humides, expliquent ensemble 33 % de la variance totale, une valeur semblable à la CP1 du gradient minéralo-organique.

3.2.3.2 Analyse en composante principale des sources situées dans des sols bien drainés et des sols humides

Les deux matrices utilisées pour réaliser les deux ACP l'une pour les sols bien drainés et l'autre pour les sols humides, sont composées de 21 descripteurs correspondant aux

éléments dissous dont six éléments majeurs (EM) et 15 éléments traces (ET). Les jeux de données sont formés de 49 objets pour les sols bien drainés et 48 pour les sols humides. La **figure 3.19a**) des CP1 et CP2 de l'ACP des sols bien drainés montre que le regroupement des objets se fait par source et par collecteur plutôt que par temps. Les sources B et NP montrent une faible variabilité spatio-temporelle, à l'exception du site 9 qui se rapproche des horizons LFH-BVS, alors qu'une plus forte variabilité spatiale s'observe au sein des horizons LFH permettant de distinguer le haut du bas de versant. Les CP1 et CP2 expliquent respectivement 63 % et 14 % de la variance totale. La CP1 est formée par la majorité des descripteurs corrélés entre eux, dont COD, Fe et plusieurs ET. Ces derniers sont associés aux horizons LFH. Le descripteur Si s'oppose à ce groupe de vecteurs et est associé aux sources minérales B et NP. Cet axe incarne de manière nette un gradient minéralo-organique et permet d'associer Si aux horizons minéraux. La CP2 est formée par un groupe de vecteurs Mn, Sr, Zn, Rb et Cd associés aux horizons LFH de bas de versant (BVS), qui est négativement corrélé aux vecteurs Co et Se associé aux horizons LFH de haut de versant (HVS). Deux gradients sous-jacents interdépendants, semblent émerger du gradient topographique, celui de la végétation et celui de l'humidité. De fait, et tel qu'indiqué dans la description floristique de l'Hermine, le haut de versant est dominé par le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michx.) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) alors que le bas de versant est dominé, entre autres, par le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) (Ali *et al.*, 2010b). L'étude de Manna (2003) montre que la distribution spatiale des feuilles du bouleau jaune dans la litière fraîche (L) est corrélée de manière significative et positive à la concentration de Cd et Zn extractibles à l'eau, et à Mn extractible au BaCl₂. L'absence de contribution des horizons B à la formation de CP2 montre que l'humidité du sol joue un rôle secondaire sur le contenu en éléments de LFH, par son influence indirecte sur la distribution spatiale des espèces d'arbres entre le haut et le bas de versant. De surcroît, on peut invoquer l'influence de la coupe forestière et l'exposition au vent pour expliquer la spatialisation des espèces arborescente. Ainsi, la CP2 incarne semble-t-il un gradient végétal influençant la litière forestière, gradient allant des espèces pionnières en haut de versant vers des espèces non pionnières en bas de versant.

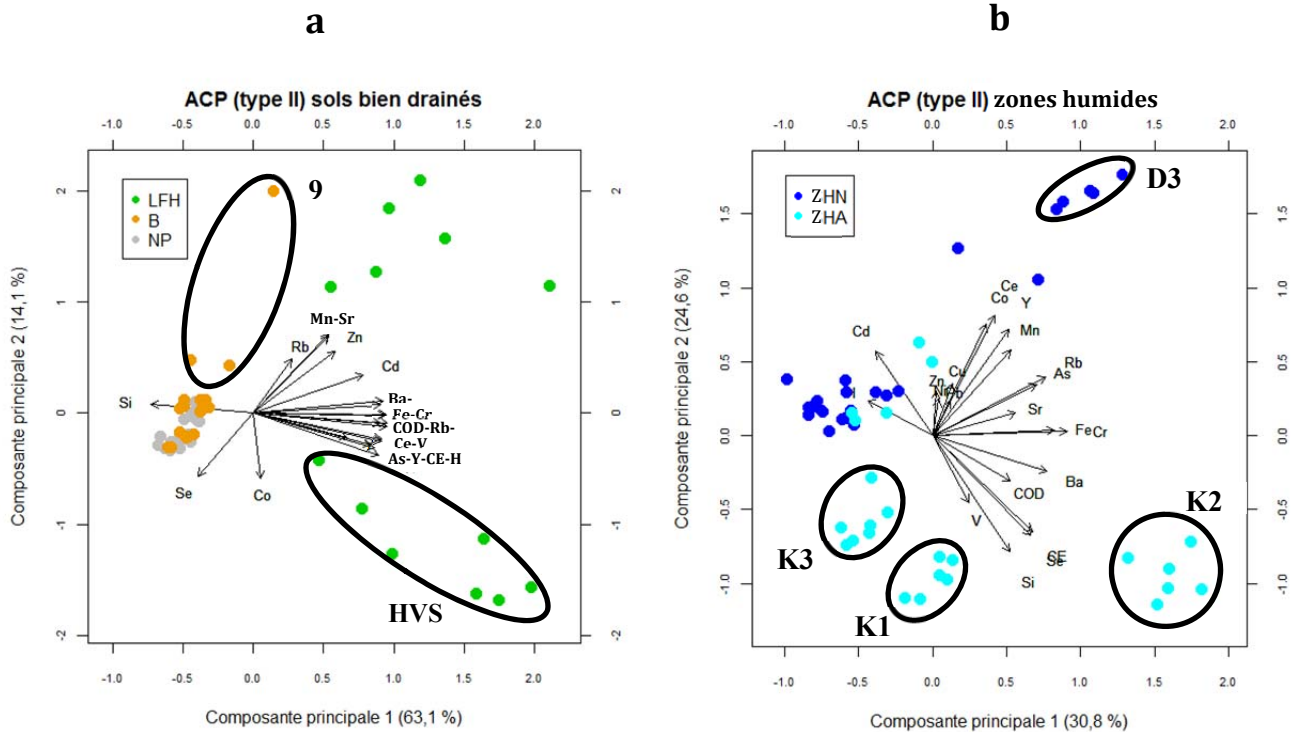


Figure 3.19 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de la géochimie pour a) les sols bien drainés et b) les sols humides. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points de couleurs représentent les sources potentielles en eau pour différents temps d'échantillonnage et constituent les objets de la matrice. Les acronymes des sources dans la légende et les figures ainsi que la distribution spatiale des collecteurs se trouvent à la **figure 2.6**.

La **figure 3.19b)** des CP1 et CP2 de l'ACP des sols humides montre que les objets ne se regroupent pas par temps mais surtout par collecteur et quelque peu selon la source. Il existe une variabilité spatiale au sein de ZHN qui différencie D3 des autres puits alors qu'au sein de ZHA, les puits K1 et K2 se distinguent des autres puits. La forte variabilité spatiale au sein même des sources met en lumière la potentielle surestimation de la superficie des zones humides. Les CP1 et 2 expliquent respectivement 30 % et 24 % de la variance totale. Une partie de la CP1 est formée par les vecteurs Fe et Cr et la majorité des ET, associés aux puits D3 et K2 correspondant aux endroits les plus humides des sols humides. À ce groupe de vecteurs, se corrèlent négativement le vecteur H^+ associé aux puits D1,2,4,K3 et 4 et quelque peu à K1, qui correspondent aux lieux les moins humides. Cet axe intègre des processus communs aux deux zones humides. Il est vraisemblable

d'attribuer à la CP1 un gradient d'humidité qui génère un gradient d'oxydoréduction. Les parties les plus réductrices, K2 et D3, comportent une forte activité d'électrons permettant la solubilisation du Fe et une concentration plus faible en H^+ en raison de la consommation de protons lors des réactions de réduction. Pour les autres puits moins humides, une activité d'électrons plus faible contribue à augmenter la concentration en H^+ . La CP2 est formée des vecteurs Co, Ce, Y et Mn associés avant tout à D3 et, de manière partielle, aux puits D1,2 et 4, qui sont négativement corrélés aux vecteurs Si, Se, CE et V associés aux puits K1,2 et 3. La CP2 intègre donc des processus qui différencient les deux zones humides. Le gradient sous-jacent à cet axe semble être celui observé à la CP3 de la **figure 3.18b**). Ainsi, il consiste en un fort bio recyclage pour ZHA alors que ZHN est plutôt dominé par les processus géochimiques. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les deux sols humides comme des milieux non homogènes qui nécessitent la segmentation de leur partie plus humide versus celle qui est moins humide.

3.2.4 Facteurs de mobilisation des éléments traces dans les sols humides

3.2.4.1 Analyse canonique de redondance avec variables explicatives : COD, Fe, Mn et H^+

Dans la perspective de déceler les éléments dissous qui ont une influence significative sur la concentration en ET dans les sols humides, une ACR est effectuée pour ZHN et ZHA. La matrice explicative est composée de quatre variables, soit COD, Fe, Mn et H^+ , alors que la matrice réponse est composée des 17 autres éléments dissous dont 15 sont des ET. Les objets sont au nombre de 24 et correspondent aux quatre puits pour six moments d'échantillonnage durant l'événement. Le **tableau 3.12** montre les variables explicatives sélectionnées et des axes significatifs ($\alpha = 0,05$). Le premier facteur de contrôle est de nature différente entre les deux zones humides, soit Mn pour ZHN versus COD pour ZHA, et d'ampleur inégale, soit respectivement 47 % versus 28 %. Un fait commun aux deux sols humides est que Fe explique 16 % de la variation des éléments. Au troisième rang, COD explique 9 % de la variance pour ZHN alors que H^+ explique 8 % de la variance pour ZHA. L'intensité de la relation canonique est plus élevée pour ZHN (R^2 ajusté = 0,75) que pour ZHA (R^2 ajusté = 0,58). La variance expliquée par les deux premiers AC pour ZHN (47 % versus 16 %) est plus contrastée que celle de ZHA (28 % versus 16 %).

Tableau 3.12 : Résultats significatifs (seuil alpha de 0,05) des analyses canoniques de redondance (ACR) sur les éléments dissous de ZHN et ZHA.

Zone humide nord (ZHN)			Zone humide amont (ZHA)		
Sélection ACR	R ² ajusté	Valeur p	Sélection ACR	R ² ajusté	Valeur p
Mn	0,47	0,001	COD	0,28	0,001
Fe	0,16	0,013	Fe	0,16	0,001
COD	0,09	0,001	H	0,08	0,001
Relation canonique	0,75	0,001	Relation canonique	0,58	0,001
Axe ACR 1	0,51	0,001	Axe ACR 1	0,32	0,001
Axe ACR 2	0,17	0,028	Axe ACR 2	0,25	0,001

La **figure 3.20a)** des AC1 et AC2 de l'ACR de ZHN montre que l'AC1, expliquant 51 % de la variance, est formé par la variable explicative Mn qui est fortement associée aux variables expliquées Co, Y, Ce, Si, Rb et au puits D3. Aucun vecteur ne s'oppose au groupe représenté par Mn alors que le reste des puits y sont négativement corrélés. Cet état de fait suggère que le maximum de mobilité des éléments est induit par des conditions réductrices plus prononcées dans le puits le plus humide D3 où Mn est en phase dissoute, forme sur laquelle les éléments ne sont pas adsorbés et sont donc libérés dans la solution de sol. De fait, la forme soluble Mn^{2+} est associée aux milieux réducteurs alors que les oxydes et hydroxydes de Mn de charge négative, sont associées aux milieux oxydants. Ces derniers possèdent une structure physique qui leur confère une surface spécifique élevée permettant, ainsi, une forte association avec les ET, en particulier Co (Kabata-Pendias, 2001). À l'inverse, en milieu réducteur, Mn redevient soluble et entraîne la remise en solution de Co (Taillefert *et al.*, 2002; Stockdale *et al.*, 2010) et d'autres ET (Kabata-Pendias, 2001). Cet axe peut donc être interprété comme une opposition entre une dominance des processus de réduction et d'oxydation. Bien que Fe soit corrélé positivement tant à l'AC1 qu'à l'AC2, il contribue plus à la formation de l'AC2 que Mn. Il est corrélé positivement à Cu, Ni et Zn. COD est peu associé à cet axe. Le seul objet associé à ce groupe de vecteurs est le puits D2 au temps 26. Cet axe est donc difficile à interpréter en raison de sa portée spatio-temporelle très limitée.

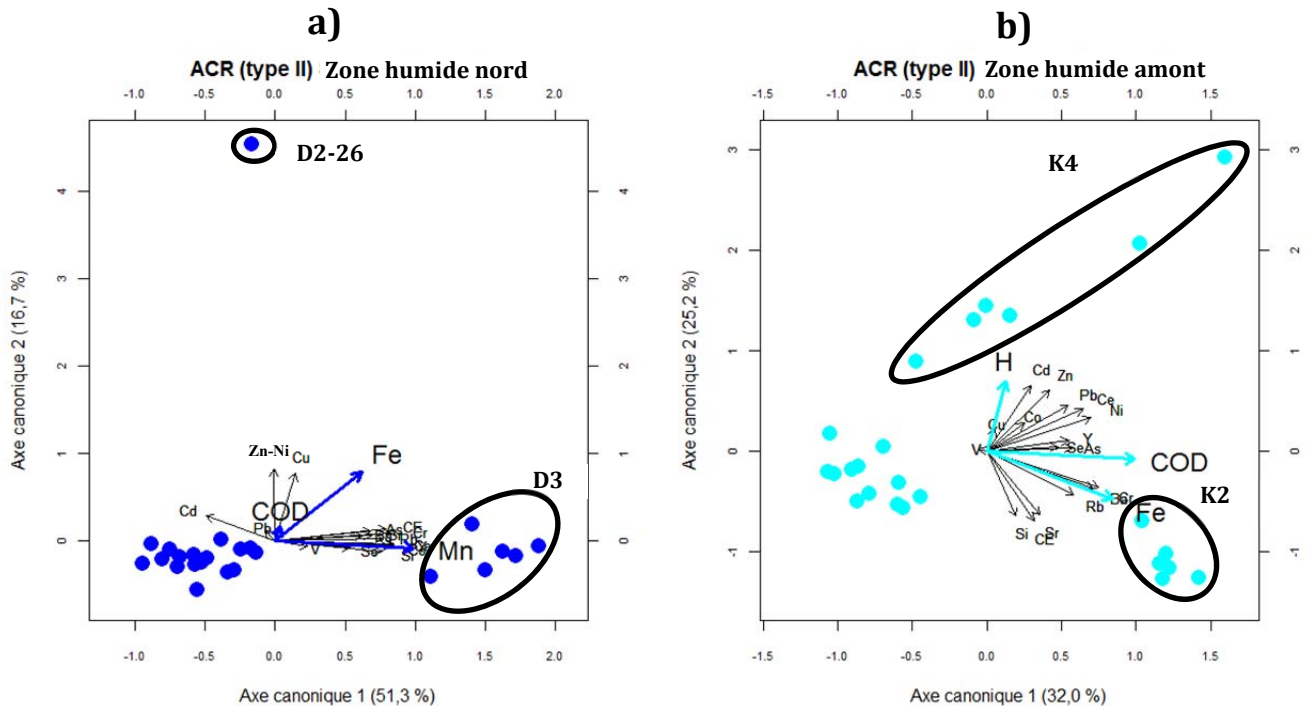


Figure 3.20 : Diagramme de double projection des axes 1 et 2 de l'analyse canonique de redondance (ACR) en cadrage de type II de la géochimie des quatre puits de a) ZHN et b) ZHA. Les flèches noires représentent les éléments dissous soit les variables expliquées de la matrice. Les points de couleurs représentent les quatre puits de chaque sol humide échantillonné à six reprises durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Les flèches bleues représentent les variables explicatives sélectionnées. L'enceinte noire délimite les groupes de puits qui doivent contenir un minimum de 5 puits identiques sur 6.

La **figure 3.20b)** des AC1 et AC2 de l'ACR de ZHA montre que l'AC1 expliquant 32 % de la variance, est formé par les variables explicatives COD et Fe et associé au puits K2 et, à un moindre niveau, au puits K4. La majorité des éléments y sont corrélés positivement. Aucun vecteur n'est négativement corrélé à cet axe alors que les puits K1 et K3 s'y opposent suggérant une forte influence de la MO dans certains endroits du ZHA. Ainsi, il est possible d'interpréter cet axe comme un gradient minéralo-organique. Dans cette source, la présence du Fe semble davantage influencée par la présence de MO que par la réduction. L'AC2 est formée par la variable explicative H^+ corrélée à Cd et Zn et associée au puits K4. À ce groupe, se corrént négativement, les variables réponses Si, CE, et Sr associées au puits K2 et faiblement aux puits K1 et K3. Il est admis que la Si est plus mobile dans les sols alcalins (Kabata-Pendias, 2001). Ainsi, cet axe peut incarner l'influence du pH sur la mobilité des éléments. L'existence d'une concentration en H^+ plus

élevée dans les puits moins humides, et donc plus oxydant, et d'une concentration plus faible pour les puits plus humides, et donc plus réducteur, pourrait tirer son origine de processus d'oxydoréduction.

3.2.4.2 Analyse en composante principale avec variables inexplorées descriptives : oxygène dissous et température

Les variables de l'oxygène dissous (OD) et la température ont été mesurées pour les six moments d'échantillonnage durant l'événement dans le puits D3 du ZHN et le puits K1 du ZHA. Une ACP est réalisée afin d'observer le lien entre ces deux variables et les éléments dans les sols humides. La matrice utilisée est composée de 23 descripteurs incluant 15 ET, sept EM incluant OD, et la température. Pour le puits K1-ZHA, l'élément Cd est exclu puisqu'il ne présente pas de variation. Les objets sont au nombre de six et correspondent à un seul puits pour six temps d'échantillonnage. La **figure 3.21a)** des CP1 et CP2 de l'ACP du puits D3 de ZHN, permet de constater que la CP1 est formée par le groupe de vecteurs Mn, Zn, Y, Ba, Cr, Co et COD qui est positivement corrélé au vecteur température. Le Rb constitue le seul vecteur qui contribue à former la partie opposée de l'axe CP1 et il est positivement corrélé à OD. On peut interpréter cet axe comme l'axe des processus d'oxydoréduction. De fait, de faibles concentrations d'oxygène dissous, des températures élevées et une forte présence de COD constituent des caractéristiques des milieux réducteurs. On constate que ces conditions potentiellement réductrices prévalent surtout aux temps 7, 19 et 23, soit durant l'événement de pluie, alors qu'une oxygénation survient au temps 29, soit quatre jours après l'événement. La CP2 est plus difficile à interpréter. Elle oppose le groupe de vecteurs As et Se au groupe constitué par les vecteurs H, V, Cu et Pb qui est associé aux temps 1 et 26. La chimie du T26 s'apparente plus au temps initial de l'événement. Il est à noter que OD est également corrélé positivement à Se et As. La **figure 3.21b)** de la CP1 et CP2 de l'ACP du puits K1 de ZHA, montre une CP1 formée par les vecteurs COD et la majorité des éléments et associé au temps 19. Aucun vecteur ne s'oppose à ce groupe mais les temps 1, 23 et 26 y sont négativement corrélés. Cet axe semble représenter une opposition minéralo-organique. La CP2 est formée par les vecteurs Mn, Co et température qui sont associés au temps 7 auquel sont négativement corrélés les vecteurs Se et OD associés au temps 29. Cet axe semble représenté des processus d'oxydoréduction puisqu'il fait intervenir l'OD.

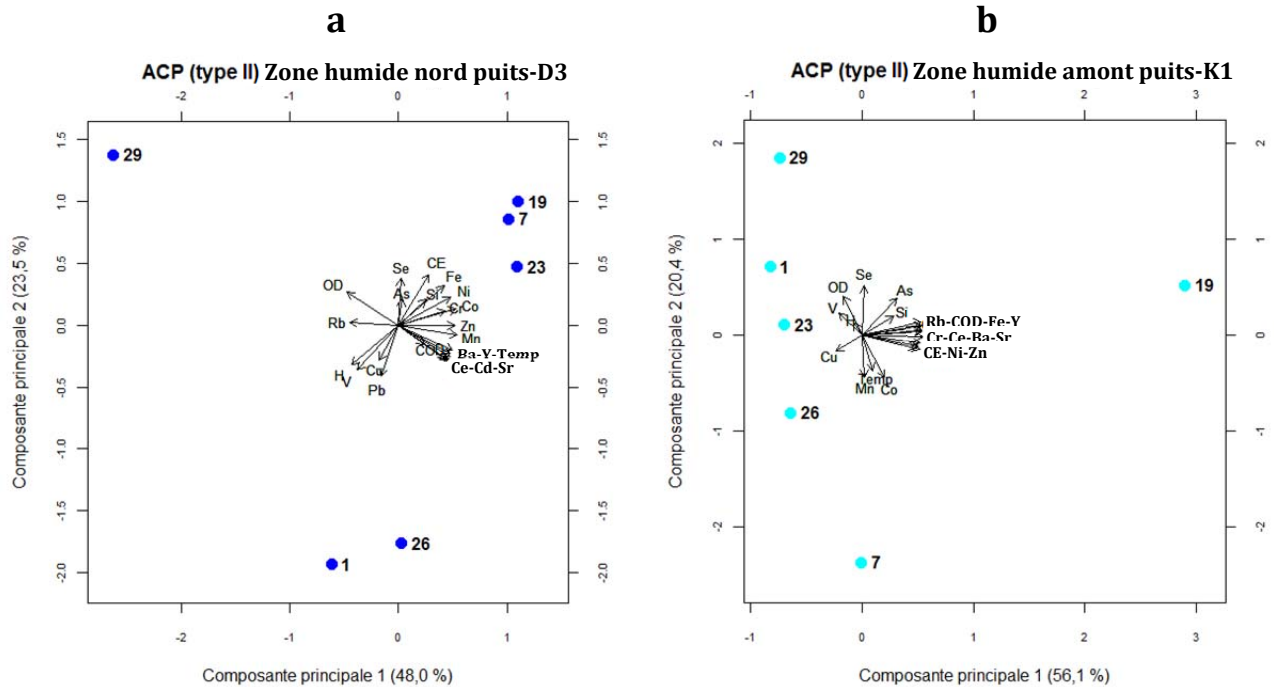


Figure 3.21 : Diagramme de double de projection des axes 1 et 2 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II respectivement pour la géochimie du puits ZHN-D3 et ZHA-K1 incluant les mesures d'oxygène dissous et de température. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les points bleus numérotés en noir représentent les différents temps d'échantillonnage durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Pour ZHA-K1, l'élément Cd n'est pas présent en raison de l'absence de variabilité.

Sur le plan des processus géochimiques, les deux puits possèdent plusieurs caractéristiques communes soit que: 1) OD est positivement corrélé au temps 29, aux basses températures et à Se, 2) OD est négativement corrélé, au temps 7, aux hautes températures et à Mn et Co, 3) H, V et Cu forment un groupe distinct, 4) As, Se et Si forment un groupe distinct et 5) COD, Ba, Ce et Y forment un groupe distinct. En outre, il existe une variabilité temporelle commune divisée en trois sections de temps : 1) le début de l'événement associé à H^+ et V; 2) l'événement associé aux températures élevées, Mn, Co et COD et 3) une fin de l'événement associée à une augmentation de OD, une baisse de température et une diminution de Mn et Co. La principale différence entre la géochimie des deux puits réside en ce que les axes associés au processus d'oxydoréduction occupent un rang différent dans l'explication de la variance des éléments dissous, soit le 1^{er} rang (CP1) pour ZHN et le 2^e

rang (CP2) pour ZHA. De plus, les CP liées à l'oxydoréduction expliquent une proportion de la variance différente, soit 48 % pour ZHN et 20 % pour ZHA.

3.2.5 Synthèse sur la variabilité spatio-temporelle et de la signature géochimique

Sur le plan de la variabilité spatio-temporelle de la géochimie des sources potentielles en eau, l'ensemble des analyses réalisées à l'objectif 2, permet de mettre en lumière : 1) l'existence au sein des sources d'une variabilité spatiale plus élevée que la variabilité temporelle ce qui permet de distinguer les sources durant un événement, 2) la présence d'une plus forte variabilité spatiale au sein des sources situées dans les zones humides en comparaison aux sources présentes dans les sols bien drainés et 3) l'existence d'une parenté géochimique entre certains puits des zones humides et les sources B et NP. Sur le plan des mécanismes géochimiques dans les sols humides, les résultats montrent: 1) l'influence significative des conditions d'oxydoréduction sur la géochimie par la corrélation positive entre des conditions réductrices et la solubilité de Mn, Co, Ce et Y, 2) l'influence significative de Mn, Fe, COD et H⁺ sur la mobilité des ET et 3) une différence géochimique entre les deux zones humides qui repose sur le type de végétation ou l'intensité de l'activité biologique. Sur le plan de la signature géochimique, le **tableau 3.13** résume les principales associations entre les sources et les éléments majeurs et les traces.

Tableau 3.13 : Synthèse des signatures géochimiques pour chaque source potentielle en eau à l'Herminie lors de l'événement d'automne. Les cinq sources potentielles en eau sont constituées des horizons organiques (LFH), des horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l'horizon C (NP), de la zone humide nord (ZHN) et de la zone humide amont (ZHA). Les connexions hydrologiques incluent le bas de versant sud (BVS), le haut de versant sud (HVS), le haut de versant nord (HVN), la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA).

SOURCES	SIGNATURES GÉOCHIMIQUES	
	ÉLÉMENTS MAJEURS	ÉLÉMENTS TRACES
LFH	COD, Fe	Ba, Cd, Ce, Pb, Zn
ZHN	Mn	Co, Rb, Y
ZHA	Si, CE	Sr, Se
B	Si	nd
NP	Si	nd

3.3 Contribution des compartiments à la chimie du cours d'eau de l'Hermine lors de l'événement d'automne 2010 – Objectif 3

3.3.1 Description et évolution de la chimie du cours d'eau

Les concentrations en éléments dissous dans le cours d'eau durant l'événement 2010 sont présentées au **tableau 3.14**. Le jeu de données est composé de 29 moments d'échantillonnage, dont 27 constituent des échantillons récoltés à une échelle horaire alors que les 28^e et 29^e échantillons ont été récoltés deux et trois jours après l'événement. Une grande dispersion des concentrations autour de la moyenne (CV) est observable pour Mn, H⁺, Co et V alors que CE, Sr, Si et Cr présentent le moins de variation. Les éléments qui recèlent plus de 50 % de concentrations sous la limite de détection (sld) ne sont pas considérés dans l'explication des résultats. L'évolution des concentrations en éléments dissous lors de l'événement de pluie est illustrée à la **figure 3.22**. Les chemogrammes présentant des comportements similaires par rapport à l'évolution du débit sont regroupés en un même graphique. La segmentation en quatre groupes de comportement est basée sur des traits jugés pertinents pour la compréhension et il est possible qu'un élément puisse appartenir à deux groupes. Ainsi, les groupes comportent les éléments pour lesquels : a) l'augmentation de leur concentration est concomitante à la hausse du débit, b) une hausse substantielle et brusque de la concentration est observable au temps 26, c) une hausse substantielle et soutenue de la concentration est observable au temps 27 et d) une diminution de la concentration est concomitante au maximum de débit. Il est à noter que plusieurs éléments, comme ceux des groupes a et b, présentent une légère augmentation de concentration précédant le maximum de débit.

Afin de réduire l'information que recèle la variation de tous les éléments dissous durant l'événement, une analyse en composante principale (ACP) est réalisée (**figure 3.23**). La matrice utilisée est composée de 21 descripteurs dont 6 EM et 15 ET, et elle est présentée à la **figure 3.22** et au **tableau 3.14**. L'élément T1 est évacué de l'analyse. Les objets représentent les 29 temps d'échantillonnage du cours d'eau pendant l'événement. Le temps 10 représente le maximum de débit.

Tableau 3.14 : Statistiques descriptives des concentrations en éléments dissous pour les 29 échantillons du cours d'eau de l'Herminie lors de l'événement d'automne 2010.

	Moyenne	Écart type	CV(%)	Minimum	Maximum
Éléments majeurs					
CE (µS/cm)	15,9	1,3	8,3	13,9	18,6
COD (mg/L)	8,1	2,3	28,8	3,4	12,7
Fe (µg/L)	26,0	6,3	24,3	17,6	38,6
H+ (µmol/L)	0,67	0,33	49,4	0,22	1,4
Mn (µg/L)	14,0	8,9	63,8	4,7	35,0
OD (mg/L) ^c	9,3	0,21	2,2	9,1	9,6
Si réactive (mg/L)	3,3	0,32	9,7	2,7	4,2
Éléments traces (ug/L)					
As	<u>0,07</u> ^a	<u>0,04</u>	<u>52,5</u>	<u>0,02</u>	<u>0,25</u>
Ba	9,1	1,13	12,4	5,6	11,0
Cd	0,03	0,01	29,4	0,01	0,05
Ce	0,13	0,04	33,8	0,04	0,23
Co	0,08	0,03	41,6	0,05	0,17
Cr	0,11	0,02	14,5	0,08	0,14
Cu	0,33	0,09	27,0	0,20	0,65
Ni	0,32	0,06	19,4	0,23	0,49
Pb	<u>0,04</u>	<u>0,05</u>	<u>136,0</u>	<u>0,01</u>	<u>0,18</u>
Rb	0,49	0,11	21,7	0,32	0,73
Se	<u>0,02</u>	<u>0,03</u>	<u>140,3</u>	<u>0,01</u>	<u>0,16</u>
Sr	14,3	1,23	8,6	13,2	16,9
Tl	sld ^b	sld	sld	sld	sld
V	0,11	0,04	36,7	0,07	0,23
Y	0,23	0,05	20,0	0,13	0,32
Zn	6,2	1,15	18,4	3,5	8,7

^aLes valeurs soulignées signifient que plus de 50 % des concentrations du compartiment sont sous la limite de détection.

^bsld = sous limite de détection.

^cOD = mesure oxygène dissous prise à cinq moments durant l'événement aux temps 2, 9, 18, 22 et 26.

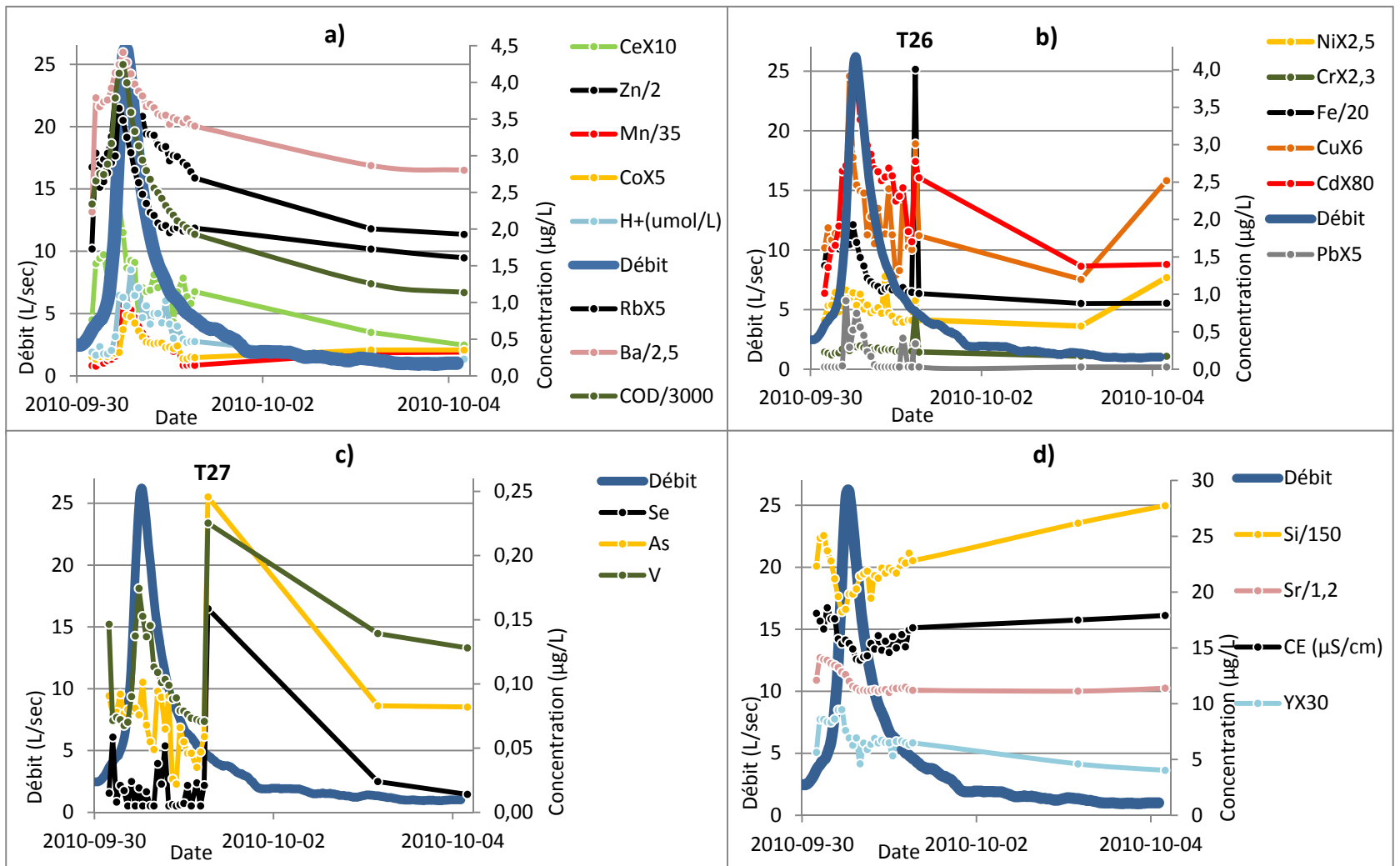


Figure 3.22 : Chemogrammes des éléments dissous dans le cours d'eau durant l'événement d'automne 2010 réunis en quatre groupes dont le caractère central est : a) la (quasi) concomitance entre pic de concentration et pic de débit; b) l'augmentation substantielle et brusque de concentration au temps 26; c) l'augmentation substantielle et soutenue de concentration au temps 27 et d) la diminution de la concentration concomitante à l'augmentation du débit.

Les points de couleurs correspondent aux 29 échantillons analysés et la ligne de la même couleur constitue une interpolation entre les points. Les concentrations en éléments sont multipliées ou divisées par un facteur donné afin d'aérer les graphiques. Dans la légende, certains éléments présentent des unités qui ne sont pas le µg/L.

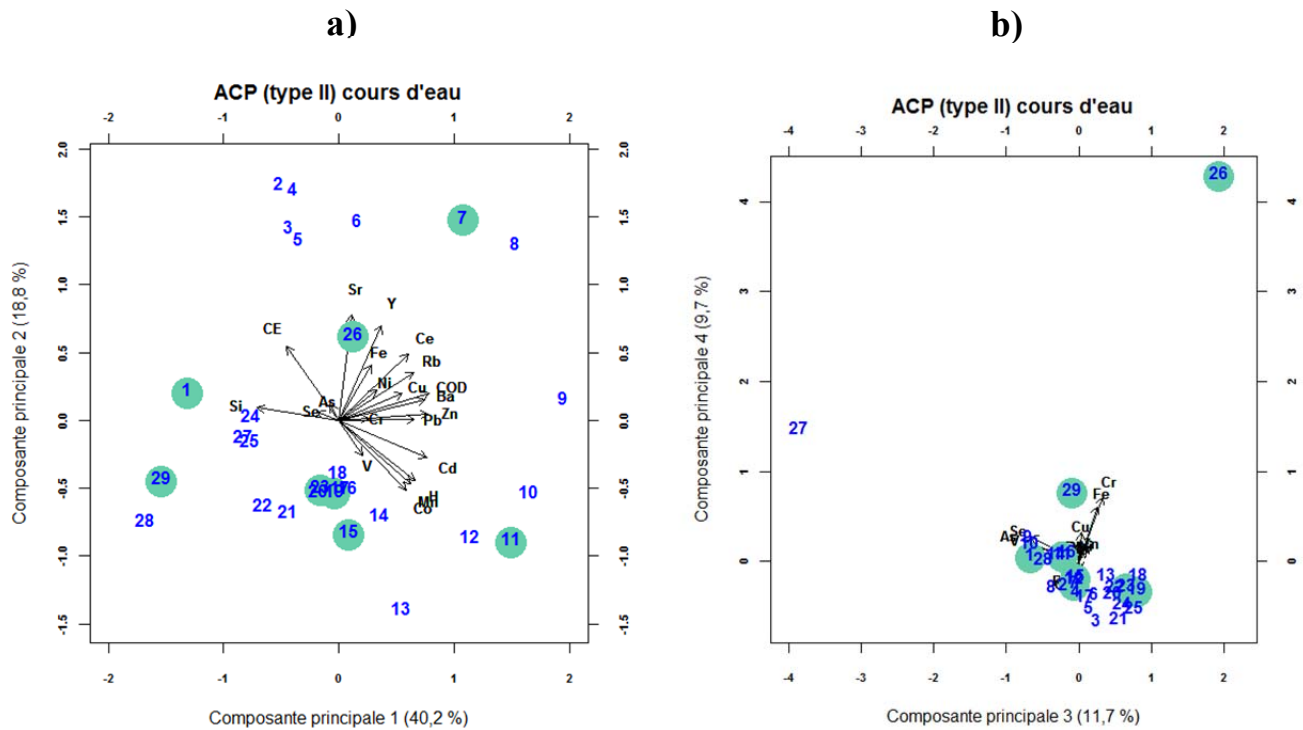


Figure 3.23 : Diagramme de double projection des axes a) 1 et 2 et b) 3 et 4 de l'analyse en composante principale (ACP) en cadrage de type II de l'hydrochimie du ruisseau durant l'événement d'automne 2010. Les flèches noires représentent les éléments dissous constituant les descripteurs de la matrice. Les chiffres et nombres en bleu représentent les moments d'échantillonnage durant l'événement et constituent les objets de la matrice. Les bulles vertes représentent les moments d'échantillonnages de la nappe phréatique.

Les CP 1, 2, 3 et 4 de l'ACP expliquent de manière respective 40, 19, 12 et 10 % de la variance totale des éléments dissous dans le cours d'eau. Ces quatre CP expliquent 75,4 % de la variance totale. La CP1 est formée par la majorité des vecteurs, incluant COD, dont l'augmentation de concentration est concomitante à la hausse du débit. Le maximum de concentration de ce groupe d'éléments organophiles, se situe peu, environ 1 heure, avant le pic de débit. À ce groupe de vecteurs, se corrèle négativement le vecteur Si, qui est associé aux temps 1, 24, 25, 27, 28 et 29 présentant les plus faibles valeurs de débit. La Si présente une élévation brève de la concentration avant la hausse de débit, soit 7 heures avant, et une diminution marquée lors du maximum du débit. À la **section 3.2**, il a été possible d'associer la Si aux horizons minéraux et sols humides. Ces informations suggèrent que la CP1 constitue un axe minéralo-organique. Ainsi, le maximum de variance de concentration en

éléments dissous dans le cours d'eau serait induit par la présence d'un écoulement d'eau dans les horizons organiques et les horizons minéraux riches en matières organiques, alors qu'un minimum de variation et une présence de la Si indiquent la provenance de l'eau des horizons minéraux et/ou des zones humides. Ainsi, le maximum de variance en éléments dissous est décalé d'une heure par rapport au maximum de débit. La CP2 est formée par les vecteurs Sr, Y et CE dont les concentrations maximales devancent le pic de débit. Ce groupe de vecteurs est négativement corrélé à V, Co, Mn et H⁺, dont les concentrations maximales sont concomitantes au maximum du débit ou décalées d'une heure. À la **section 3.2**, il a été observé que l'élément Sr se trouve en concentration élevée dans ZHA alors que Mn constitue la signature de ZHN. À ce stade, la CP2 est interprétable en termes de contribution des zones humides. La CP3 est constituée par les vecteurs As, Se et V, associés au temps 27. La CP4 est déterminée par les vecteurs Fe, Cu, Cr, Zn et Ni, associés au temps 26. Aucun élément ne se corrèle négativement aux groupes de vecteurs qui forment ces deux CP. Il est difficile d'interpréter les CP3 et 4 en raison du comportement éphémère de leurs vecteurs et risqué vu leur faible % d'explication. Toutefois, pour une subséquente interprétation de CP4, il est à noter que le puits D2 de la source ZHN montrait une même augmentation brève au temps 26 (**figure 3.18b**).

3.3.2 Contribution des compartiments à la chimie du cours d'eau

Afin de confirmer la contribution des sources en eau au débit du ruisseau, trois graphiques de mélanges de sources sont réalisés. Enfin, pour spatialiser les sources en eau ciblées durant l'événement, une cartographie pédohydrologique est réalisée. Ces deux analyses servent à tester et valider l'interprétation des CP de l'ACP de la **figure 3.23**.

3.3.2.1 Graphique de mélange des sources potentielles en eau

Les éléments ciblés pour générer les graphiques de mélange sont choisis en fonction de leur forte contribution à la formation d'une CP et leur potentiel de signature géochimique d'une source. La CP1 est représentée par un couple d'éléments qui s'opposent, soit COD qui constitue la signature des horizons organiques et Si qui constitue la signature des horizons minéraux. La CP2 est représentée par une paire d'éléments qui s'opposent, soit Sr qui signe la source ZHA et Mn qui signe la source ZHN. La CP3 est représentée par V et la CP 4 l'est par Cr, formant ainsi le couple d'éléments V/Cr. La **figure 3.24** illustre les graphiques de mélange. Le graphique du couple COD/Si de la **figure 3.24a)** permet : 1) de différencier

ZHA de ZHN par les hautes concentrations en Si de ZHA, 2) de souligner la ressemblance de concentration en Si et COD entre l'horizon B, soit un milieu minéral oxydé, et ZHN, soit un milieu minéral réducteur, 3) de constater l'influence significative du transit latéral de l'eau dans les horizons organiques sur la chimie du cours d'eau lors d'un événement et 4) de confirmer la faible influence de ZHA sur le contenu en Si et DOC du cours d'eau lors d'un événement. Le graphique du couple Mn/Sr de la **figure 3.24b**) permet : 1) de différencier les sources B et NP, soit des milieux minéraux oxydés, des sols humides, qui constituent des milieux réducteurs, 2) de constater l'influence significative d'une contribution des sources ZHN et LFH, sur la chimie du cours d'eau lors d'un événement et 3) d'observer une différence substantielle entre les temps 8 et 9-10 dans la chimie du ruisseau. Dans le graphique du couple V/Cr de la **figure 3.24c**), la chimie du ruisseau se retrouve pour l'essentiel à l'extérieur de l'espace de mélange. Toutefois, cette paire d'éléments permet : 1) de constater que l'ensemble de la chimie du ruisseau de l'événement s'apparente aux sources B, NP et ZHN; 2) d'observer que le T26 est caractérisé par une hausse marquée de la concentration en Cr s'apparentant ainsi aux concentrations des sources LFH et ZHA et 3) d'observer que le T27 est caractérisé par une certaine hausse en V reflétant les concentrations des horizons LFH et ZHA. En somme, les couples COD/Si, Sr/Mn et V/Cr permettent de reconnaître la contribution de quatre groupes de sources en eau lors d'un événement pluvial soit, en ordre chronologique : 1) B et NP; 2) LFH; 3) ZHN et 4) ZHA.

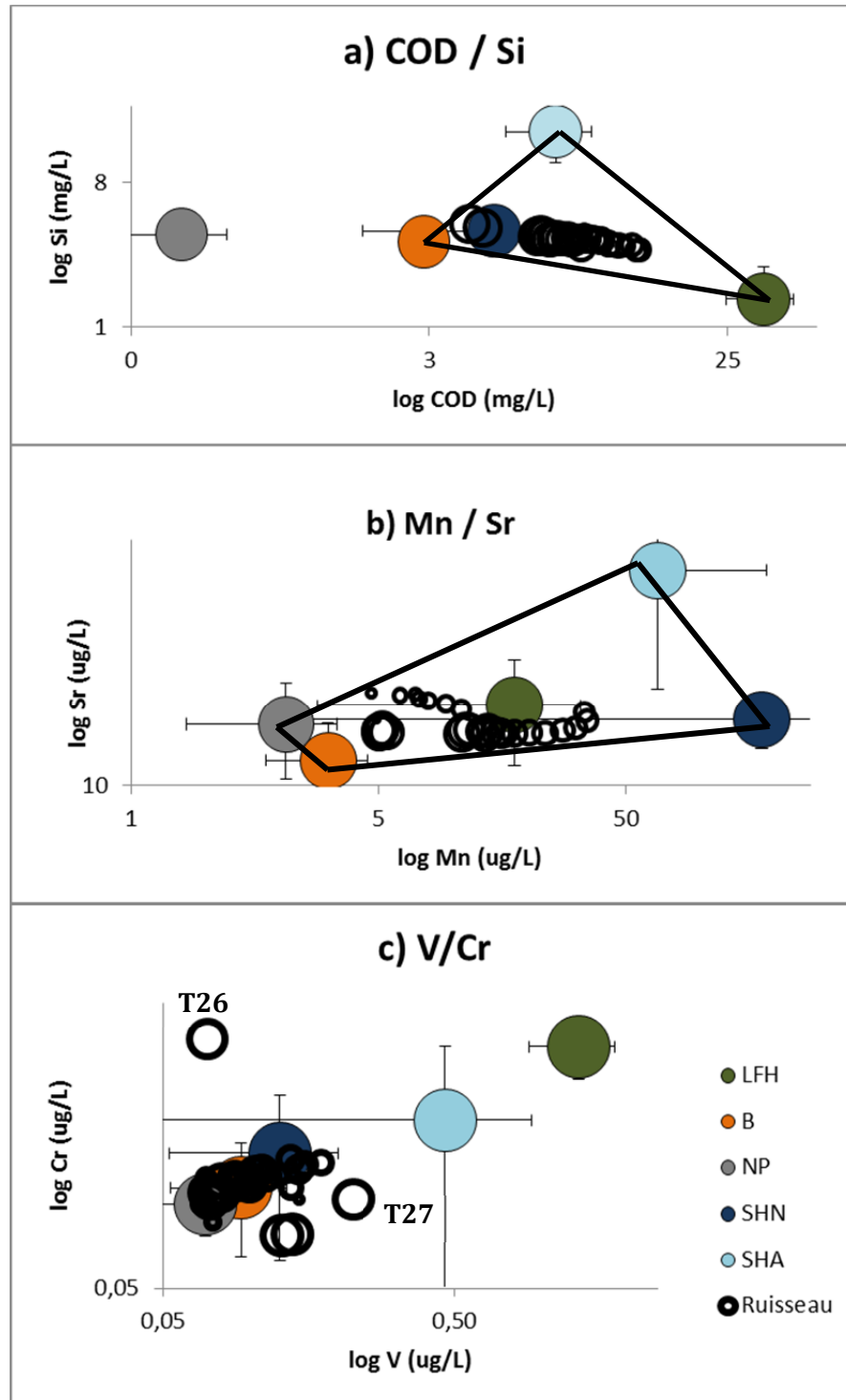


Figure 3.24 : Graphiques de mélange construits à partir des paires d'éléments a) COD/Si; b) Mn/Sr et c) V/Cr. Les lignes pleines constituent les limites de l'espace de mélange fonctionnel. Les cinq sources potentielles en eau sont : les horizons organiques (LFH), les horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l'horizon C (NP), la zone humide nord (ZHN) et la zone humide amont (ZHA) (**figure 2.6**). La taille des cercles de la chimie du ruisseau représente l'évolution chronologique des 29 moments d'échantillonnage du cours d'eau allant du plus petit cercle, soit le temps 1, au plus grand cercle, soit le temps 29.

3.3.2.2 Contribution des horizons sur le plan horizontal à la chimie du cours d'eau

La **figure 3.25** montre les patrons spatiaux pédohydrologiques, c'est-à-dire une cartographie des horizons les plus superficiels des profils de sols qui sont, à un moment donné de l'événement, baignés par la NP. Les horizons LFH s'apparentent à la source LFH, les horizons Bhf à la source B et les horizons Bf et BCg à la source NP. Le patron spatial pour les horizons LFH est restreint aux zones de connexions hydrologiques (ou hydrotopes de convergence), soit ZHN-RN, HVN, BVS, HVS et RA-ZHA, et présente un niveau maximal de connexion aux temps 7 et 11, soit avant le débit maximal. Le patron spatial des horizons Bhf est circonscrit aux zones de connexions hydrologiques au début et à la fin de l'événement et devient plus étendue dès les temps 7 et 11. La distribution spatiale des horizons Bf et BCg couvre l'ensemble du bassin entre les temps 7 et 26. La contribution de ces horizons est toutefois plus élevée aux T1 et T29 en comparaison aux horizons Bhf et LFH.

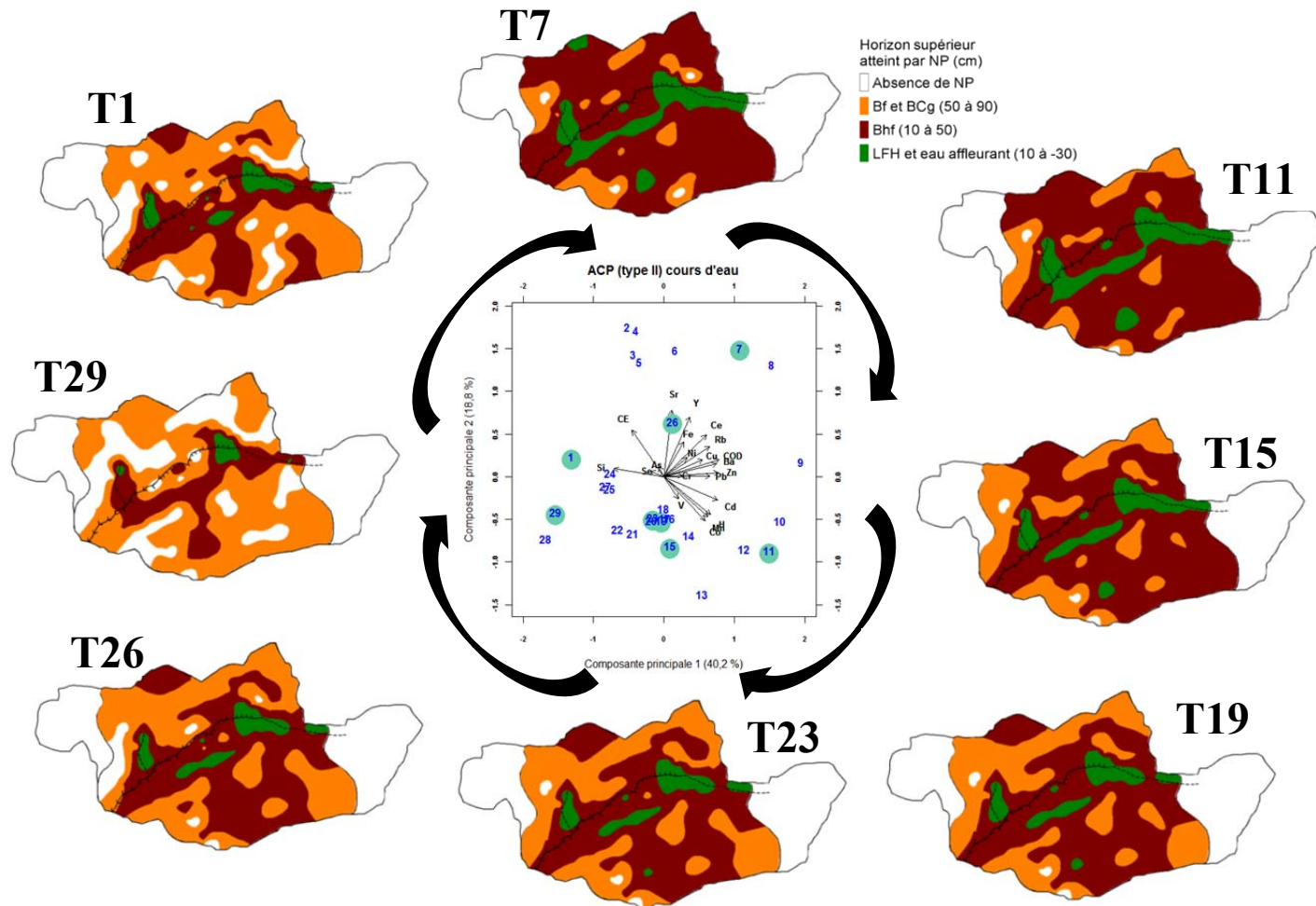


Figure 3.25 : Patron spatiaux pédohydrologiques représentant les horizons les plus superficiels atteints par la nappe phréatique durant l'événement d'automne 2010. L'interpolation est réalisée avec l'algorithme du voisinage naturel simple. L'analyse en composante principale (ACP) au centre correspond à la **figure 3.23a**). Les temps indiqués sur les cartes correspondent au temps de l'échantillonnage de la chimie du ruisseau, soit les objets de l'ACP.

3.3.2.3 Synthèse de la contribution des sources associées aux composantes principales 1 et 2

Les graphiques de mélange et l'analyse pédohydrologique, confirment la nature minéralo-organique de la CP1 tout en précisant les sources contributrices et leur superficie respective. La brève augmentation de la Si associée au temps 1 provient des sources B et NP à partir d'endroits définis soit BVS et HVS, ainsi que de la source ZHN-RN. Le caractère précoce de l'augmentation de la Si peut être lié à une poussée de l'eau nouvelle sur l'eau plus vieille déjà enrichie en Si. L'augmentation substantielle du COD, négativement corrélé à la Si, provient des zones de connexions hydrologiques et de manière plus directe, de BVS et ZHN-RN. Ainsi, la CP1 incarne une opposition minéralo-organique entre les sources B et NP et les horizons LFH, dont la répartition spatiale est restreinte pour l'essentiel à BVS et ZHN-RN. La CP2 est formée par Sr, associé aux temps pédohydrologiques 6 et 7 et aux sources B et NP. Sr est négativement corrélé à Mn, associé aux temps 11 et 15 et à la source ZHN. La distribution spatiale de B et NP est diffuse dans les deux versants pour les temps 1 à 7. On observe une diminution de la profondeur de la NP sur le versant nord, concomitante à un écoulement hypo et épidermique fort à l'endroit de ZHN-RN au temps T11 homologue au T3 de la **figure 3.13**. Cet état de fait suggère que le versant nord se draine de manière rapide par ZHN-RN selon une séquence de remplissage et de déversement de ce milieu réducteur. Ce drainage intensif est synchrone au maximum de débit. Ces informations montrent que la CP2 incarne une opposition entre les horizons oxydés des deux versants et les sols réducteurs en particulier du versant nord. Ces résultats infirment la contribution significative de ZHA puisque ses concentrations élevées en Sr ne se reflètent pas de manière claire dans la chimie du ruisseau (**figure 3.24b**).

3.3.2.4 Synthèse de la contribution des sources associées aux composantes principales 3 et 4

La **figure 3.24c**) permet de constater une contribution de LFH et/ou de ZHA à la formation des CP3 et 4. Il est difficile de spatialiser une telle contribution à l'aide de la **figure 3.25** puisque les patrons spatiaux des temps 23 et 26 ne sont pas différents. L'observation des 94 hydrogrammes de NP permet de constater que certains puits présentent une élévation de NP au T23 de l'hydrochimie. La **figure 3.26a**) montre les 12 puits sur les 20 sélectionnés présentant ce comportement. Certains puits montrent une stabilisation de leur NP à ce temps mais ne sont pas considérés puisqu'il est plus probable que la hausse subite de concentration en As, Se, V, Fe, Cu, Cr, Zn et Ni

proviennent d'une augmentation de la NP dans des horizons plus transmissifs plutôt que d'une stabilisation de cette dernière. La **figure 3.26b)** illustre la distribution spatiale de ces puits sur la carte pédohydrologique du temps 23.

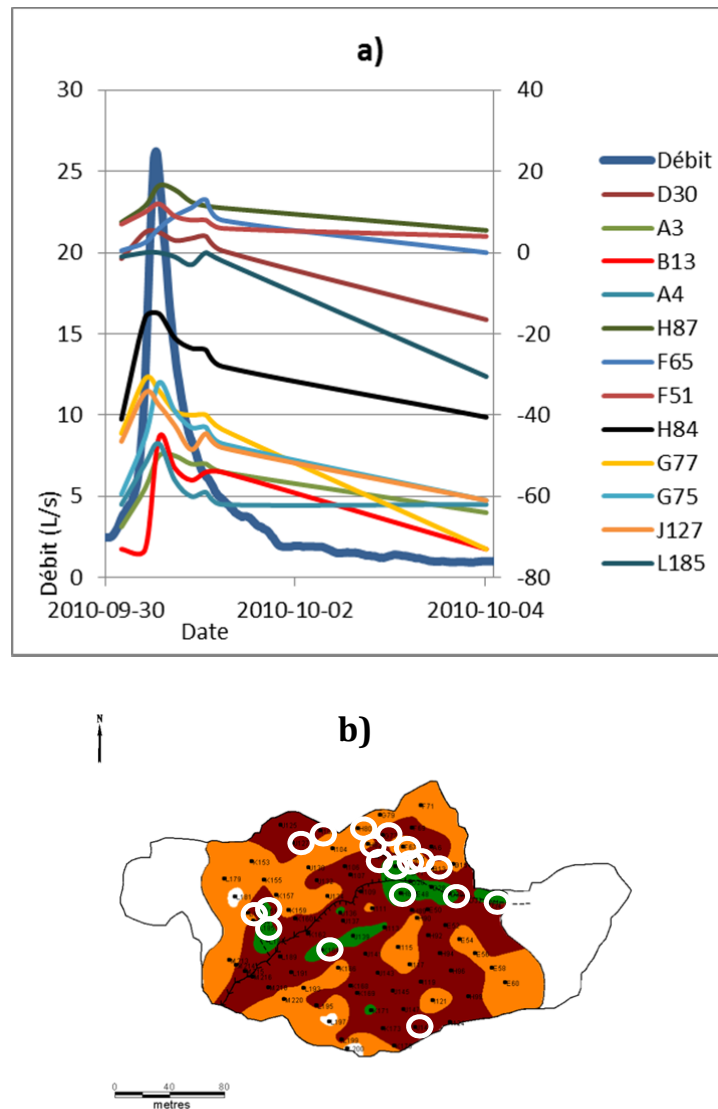


Figure 3.26 : a) Hydrogrammes de 12 des 20 puits pour lesquels le niveau maximal de la NP survient après le maximum de débit ou qui présentent un soulèvement de la NP après le pic de débit et b) distribution spatiale des 20 puits représentés par des cercles blancs sur la carte pédohydrologique du temps 23 de la **figure 3.25**.

Elle permet de constater que l'augmentation des concentrations des éléments As, Se, V, Fe, Cr, Ni, Zn et Cu dans le cours d'eau aux temps 26 et 27, serait générée par une élévation de la NP au haut et à l'amont du versant nord (HVN). Ce relèvement permet une subséquente augmentation de la NP dans ZHN et ZHA. De plus, la montée de la NP à l'endroit de la rigole amont provoque une hausse de la NP dans ZHA. Ces résultats

sont concordants avec la **figure 3.24c**) qui montre une contribution des horizons LFH, qui proviendrait de ZHN puisque la NP baigne les horizons LFH (**figure 3.25-T23**), et une contribution de la source ZHA. Les contributions de LFH-ZHN et HVN-ZHA respectivement aux temps T26 et 27, soulignent un temps de transit de l'eau différent. Ainsi, il existe entre l'activation d'une source lointaine de l'exutoire, soit HVN-ZHA, et la réponse hydrochimique à l'exutoire du cours d'eau, un temps de transit d'environ quatre heures alors que celui de HVN-ZHN-LFH, plus proche de l'exutoire, est de trois heures. La CP3 représente ainsi l'activation de la source ZHA grâce à un apport d'eau de HVN. La CP4 incarne donc un regain de contribution de la source ZHN-RN grâce à un apport d'eau de HVN. Cette interprétation est concordante avec l'augmentation des éléments associés à la CP4 dans le puits D2 du ZHN au temps 26 (**figure 3.18b**). Ainsi, la CP3 incarne une contribution du versant nord alors que la CP4 incarne une contribution du versant nord et de la partie amont du bassin. Le **tableau 3.15** constitue une synthèse des contributions des sources à la lumière des résultats obtenus dans cet objectif.

Tableau 3.15 : Synthèse chronologique de la contribution des sources en eau pour le ruisseau et de leur superficie à partir des graphiques de mélange (**figure 3.24**), de la série cartographique pédohydrologique (**figure 3.25**) et de la spatialisation des hydrogrammes de NP (**figure 3.26**).

Les cinq sources potentielles en eau sont constituées des horizons organiques (LFH), des horizons minéraux (B), de la nappe phréatique de l'horizon C (NP), de la zone humide nord (ZHN) et de la zone humide amont (ZHA). Les connexions hydrologiques incluent le bas de versant sud (BVS), le haut de versant sud (HVS), le haut de versant nord (HVN), la rigole nord (RN) et la rigole amont (RA).

	COD/Si		Mn/Sr		V/Cr	
Début événement	B	ZHN	B	NP	B	NP
<i>Spatialisation</i>	Circonsrit aux connexions hydrologiques (BVS et HVS)	Circonsrit à ZHN et RN	Circonsrit aux connexions hydrologiques	Diffus	Circonsrit aux connexions hydrologiques	Diffus
Pendant événement	LFH		LFH	ZHN	ZHN	HVN-ZHA (T27) / HVN-ZHN-RN-LFH (T26)
<i>Spatialisation</i>	Circonsrit aux connexions hydrologiques (BVS et ZHN)		Circonsrit aux connexions hydrologiques (BVS et ZHN)	Circonsrit à ZHN et RN	Circonsrit à ZHN et RN	Circonsrit à HVN et ZHA / Circonsrit à ZHN et RN
Fin événement	B	ZHN	B	NP	B	NP
<i>Spatialisation</i>	Circonsrit aux connexions hydrologiques (BVS et HVS)	Circonsrit à ZHN et RN	Circonsrit aux connexions hydrologiques	Diffus	Circonsrit aux connexions hydrologiques	Diffus

Chapitre 4 DISCUSSION

Au cours de cette étude, nous avons amalgamé deux méthodes soit, hydrologique et hydrogéochimique, dans la perspective d'améliorer la compréhension de l'écoulement de l'eau et des transferts des éléments dissous dans un bassin versant forestier du Bouclier canadien. Sur le plan de la méthodologie de terrain, les points forts de cette recherche sont : 1) l'utilisation d'une haute densité de puits; 2) la mesure et l'échantillonnage à une fréquence élevée; 3) l'échantillonnage d'une large gamme de conditions hydrologiques et 4) l'utilisation de plusieurs éléments dissous incluant les éléments traces. Sur le plan du traitement des données recueillies sur le terrain, les points forts sont : 1) l'utilisation d'une multiplicité de méthodes analytiques; 2) l'utilisation des statistiques multivariées et 3) la spatialisation d'une large gamme d'analyses. Ainsi, la combinaison des analyses hydrologiques et géochimiques a concouru à dresser un portrait hydrologique et hydrogéochimique robuste du bassin versant de l'Hermine. Nous débuterons la discussion sur des thèmes de nature hydrologique, soit: 1) l'identification des hydrotopes; 2) la détection de la connectivité hydrologique; 3) l'écoulement hypodermique rapide et 4) une synthèse de l'objectif 1. En deuxième lieu, nous aborderons des thèmes liés à l'hydrogéochimie soit : 5) l'impact de Fe, COD et Mn sur la mobilisation des éléments traces dans les sols humides; 6) l'influence des sols humides sur la production du débit et 7) l'impact de l'écoulement hypodermique sur l'exportation du COD et des éléments traces lors d'un événement pluvial. Nous terminerons par (8) une synthèse sur le modèle d'écoulement à l'Hermine lors d'un événement pluvial.

4.1 Les hydrotopes dans le bassin de l'Hermine

4.1.1 Efficacité de la méthodologie pour détecter les hydrotopes

Une des originalités de l'objectif 1 consiste en l'utilisation de plusieurs méthodes analytiques pour parvenir à la détection des hydrotopes dans le bassin de l'Hermine. Cette méthodologie diversifiée a contribué à atténuer la subjectivité inhérente à la détection des hydrotopes dans un contexte où il n'existe pas une méthode unique de détection. Notre méthode qui inclut les données de profondeur de NP dans le sol recueillies à l'échelle hebdomadaire et événementielle a permis de mettre en évidence un comportement hydrologique complexe de la zone saturée à l'Hermine. La plupart des résultats des différentes analyses utilisées convergent à la détection de quatre hydrotopes dans le bassin de l'Hermine. Une méthode a concouru à détecter seulement

deux hydrotopes, soit les minima de profondeur de NP dans le sol. D'autres méthodes se sont avérées plus efficaces dans la détection des hydrotopes. Par exemple, le patron spatial de l'analyse de groupement (**figure 3.3**) est similaire à la distribution spatiale des quatre hydrotopes issus de l'ensemble des analyses (**figure 3.10**). Si l'analyse de groupement constitue un outil relativement objectif pour détecter les hydrotopes, elle ne dispense toutefois pas d'informations sur les mécanismes hydrologiques qui caractérisent les hydrotopes. Les analyses portant sur les relations NP/Q (**figures 3.5 et 3.6**) ont, quant à elles, permis d'explorer les processus hydrologiques caractéristiques des hydrotopes. En somme, la complémentarité des méthodes a contribué à dresser un portrait solide de l'hydrologie de l'Hermine et la convergence des résultats nous permet de mettre en évidence quatre zones hydrologiques similaires.

4.1.2 Interprétation du gradient de convergence

Les résultats des **sections 3.1.1 à 3.1.7** visant à identifier les hydrotopes dans le bassin de l'Hermine concourent à la détection de quatre types de comportement hydrologique similaire. L'identification du gradient de convergence de l'eau (**tableau 3.6**) à partir des résultats de la compilation de la détection des hydrotopes (**tableau 3.5**) a permis de spatialiser les résultats des neuf analyses à l'aide de valeurs intégratrices. Les résultats sont interprétables sur la base d'une opposition thématique entre convergence et divergence de l'eau, ce qui permet d'aborder la notion d'hydrotopes de manière dynamique. Notre définition de la convergence est basée sur les processus hydrologiques hypodermiques de sols peu profonds. Or, est convergente une zone où la nappe phréatique atteint souvent les horizons de surface du sol en comparaison à une zone de divergence où la nappe phréatique est plus profonde et/ou plus souvent absente. Ainsi, une zone d'épaisseur de sol considérable où un grand volume d'eau s'achemine et s'y accumule mais pour laquelle la nappe phréatique reste plus profonde, n'est pas considéré comme une zone de grande convergence selon notre définition. Pourtant, cette zone est convergente en termes de volume d'eau. Notre idée de convergence de l'eau se base sur le profil de sol et l'écoulement hypodermique.

4.1.3 Remise en question du couple hydrotopique zone riveraine/versant

La distribution spatiale des hydrotopes (**figure 3.10**) ne se calque pas au traditionnel couple d'hydrotopes zone riveraine/versant. Selon ce modèle, les versants sont des zones de divergence alors que la zone riveraine constitue un lieu de convergence de l'eau. Nos résultats montrent qu'il existe une diversité d'hydrotopes tant dans la zone

riveraine que sur les versants. Dans la littérature, peu d'études s'attardent à la complexité potentielle de la zone riveraine. Sur le plan de l'hétérogénéité de la zone riveraine, nos résultats concordent avec ceux de Vidon et Hill (2004) qui ont réalisé une typologie de l'hydrologie des zones riveraines du Bouclier canadien en fonction d'éléments hydrogéomorphologiques. Les auteurs mettent en lumière la pluralité potentielle du comportement hydrologique des zones riveraines en fonction de la topographie, la longueur du versant et le gradient de pente. Or, il est possible, dans le cas d'un bassin versant où les versants sont différents, tel que dans le bassin de l'Hermine, que la zone riveraine présente une diversité hydrologique. L'hydrotope de divergence moyenne, qui possède le plus haut niveau de coalescence, se retrouve en majorité sur les versants. Cet état de fait confère une plus grande homogénéité aux versants par rapport à la zone riveraine. Néanmoins, cette homogénéité est interrompue par la présence de zone de convergence moyenne circonscrite. L'existence d'hydrotope de convergence sur les versants s'apparente au concept de connectivité hydrologique parce qu'elle peut constituer une zone préférentielle de transit de l'eau. À l'heure actuelle plusieurs études ont montré la complexité hydrologique des versants en milieux forestiers (Devito *et al.*, 1996; Buttle *et al.*, 2004; Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006a,b; Anderson *et al.*, 2009, 2010). Ces études mettent en évidence que des zones d'écoulement préférentiel et de convergence s'opèrent également sur les versants.

La diversité d'hydrotopes trouvée à l'Hermine appuie les travaux de Aryal *et al.* (2002) qui proposent une approche de la similarité en modélisation hydrologique pour laquelle la réponse du système est spatialement discrétisée en unités. Bien que Seibert *et al.* (2003) aient mis en lumière l'importance de détecter les hydrotopes, nos résultats diffèrent des leurs. En effet, ils mettent en exergue la présence de deux zones hydrologiques distinctes, soit le haut et le bas de versant. Ils observent une force de corrélation (coefficient de Spearman) de la relation NP/Q significativement plus élevée dans la zone riveraine que dans les hauts de versant pour un bassin versant forestier sur till. Toutefois, bien que les deux versants opposés soient décrits comme étant similaires dans cette étude, les puits ne se distribuent pas de manière égale et homogène entre les deux versants. De fait, un des versants présente une abondance de puits plus élevée, soit environ 25 contre 14, et ces derniers s'étendent plus loin dans le versant. Ce potentiel biais méthodologique pourrait avoir contribué à surreprésenter le versant le plus instrumenté dans les analyses. Toutefois, il est également possible qu'au sein d'un seul versant, il existe une influence significative de la distance par rapport au ruisseau, ce qui

est confirmé pour Seibert *et al.* (2003) en raison de la similarité des versants, et ce qui est infirmé dans notre étude en raison de la dissemblance des versants. Ocampo *et al.* (2006) ont trouvé aussi deux hydrotopes dans leur bassin versant australien, soit la zone riveraine et les versants. Le bassin versant de l'Herminie quant à lui comporterait quatre zones de comportement hydrologique similaire qui ne se segmente pas en haut de versant et zone riveraine.

4.1.4 Réfutation de l'hypothèse de l'état stable de la nappe phréatique

La présence de cette diversité de comportement hydrologique n'appuie pas l'hypothèse de l'état stable de la NP pour l'entièreté du bassin (« *catchment-wide steady state assumption* »). Ceci est aussi confirmé par l'existence d'une corrélation significative entre la distance aux limites du bassin versant et respectivement le coefficient de Spearman, l'angle et les plafonnements minimales et maximales des relations NP/Q. Par ailleurs, ces corrélations significatives sont faibles. Ce résultat met en lumière que plus grande est la distance de parcours de l'eau, plus grand est le volume d'eau acheminé vers un point donné, ce qui peut se traduire en des relations NP/Q autolimitées près de la surface du sol. Ainsi, l'existence d'hydrotopes et d'un facteur explicatif de localisation significatif, qui n'est pas la distance au cours d'eau ou l'indice topographique, souligne que les fluctuations de la zone saturée ne s'apparentent pas à un phénomène stable et spatialement homogène tel qu'appréhendé par la majorité des modèles hydrologiques tel que TOPMODEL (Beven et Kirby, 1979).

Deux études concluent au rejet de cette hypothèse en raison de l'existence d'une différence significative entre des groupes hydromorphologiques (Detty et McGuire, 2010b) ou de la présence d'un lien positif significatif existant entre la force de corrélation des relations NP/Q et la distance aux cours d'eau (Seibert *et al.*, 2003). Il est possible que ces deux études réfutent l'hypothèse de l'état stable de la NP entre autres, grâce à leur réseau de puits qui s'étend du bas vers le haut de versant. Nos résultats diffèrent de ceux de Moore & Thompson (1996) qui appuient l'hypothèse de l'état stable de la NP. Toutefois, ces auteurs indiquent un probable biais dans leur méthodologie puisque la répartition spatiale des puits ne couvrait pas le haut de versant. Une autre étude montre que, pour chaque groupe de piézomètres sélectionnés avant la réalisation de l'expérience, il n'y avait pas de groupement réel et qu'ils réagissaient de manière différente au sein d'un même groupe (Anderson *et al.*, 2009). Ce résultat peut être induit par une sélection *a priori* des sites qui ne reflète pas la réelle hétérogénéité du bassin versant ou par une densité de dispositifs spatiaux qui ne permet pas de déceler

l'hétérogénéité réelle. Il semble que la distribution spatiale du réseau d'instruments joue un rôle important dans la détection des hydrotopes. Dans le bassin de l'Herminie, le réseau dense de puits qui couvre l'ensemble a permis de remettre en cause l'hypothèse de l'état stable de NP.

4.1.4.1 Influence significative de la distance aux frontières du bassin

Tel que nous l'avons vu, il existe un lien significatif entre les caractéristiques des relations NP/Q et la distance aux limites du bassin versant (**tableau 3.3**). Pour peu qu'un écoulement d'eau s'opère du haut vers le bas de versant et que ce dernier permettent un apport substantiel d'eau, il est logique que la relation NP/Q soit plus forte à l'aval de cette connexion. Ces résultats semblent appuyer l'hypothèse selon laquelle les mécanismes hydrologiques en amont sur le versant sont significativement plus importants qu'à l'aval. De manière similaire, Vidon et Hill (2004) trouvent une corrélation significative entre la longueur du versant et le débit souterrain dans la zone riveraine pour des bassins versant du Bouclier canadien. Peu d'études mettent en relation un comportement hydrologique en fonction de la longueur du versant, alors que cette caractéristique semble constituer une bonne approximation de l'ampleur de l'écoulement dans un contexte de lien hydrologique entre le haut et le bas de versant. D'un point de vue pratique, la distance par rapport aux frontières, constituent une variable facile à acquérir.

4.1.4.2 Influence de l'interaction entre la topographie souterraine et l'épaisseur de sol

Dans le bassin de l'Herminie, le rôle de la topographie de surface ne semble pas jouer un rôle important sur l'écoulement de l'eau tel qu'en témoigne l'absence de corrélation significative entre les caractéristiques des relations NP/Q et l'indice topographique (**tableau 3.3**). Par contre, le mécanisme du *fill and spill* comme amorce d'un écoulement préférentiel connecté souligne le rôle important de la topographie souterraine de l'horizon compact ou du socle sur l'écoulement de l'eau. Pour plusieurs bassins versants du Bouclier canadien, l'interaction entre la topographie souterraine et l'épaisseur des sols s'avère déterminante pour l'écoulement de l'eau. Les travaux de Peters *et al.* (1995) dans le bassin versant *Plastic Lake*, dans le centre-sud ontarien, ont montré que l'eau événementielle s'écoule de manière verticale dans le sol pour atteindre le socle et produire un écoulement substantiel d'eau à l'interface du socle rocheux. Au même site, Buttle *et al.* (2004) ont découvert que la variable de contrôle prépondérante sur le développement de l'écoulement dans les sols est l'épaisseur du sol. De fait, les

pentent avec une faible épaisseur de sol ($< 0,2$ m) produisent presque toujours un écoulement de l'eau, lorsque qu'un seuil d'emmagasinage en eau des dépressions souterraines est atteint, donnant lieu à une relation linéaire entre les précipitations et l'écoulement dans le versant. Les sols plus épais ($\approx 0,4$ m) génèrent des relations moins linéaires. L'écoulement sur ces pentes est fonction de l'interaction entre l'ampleur de l'événement pluvial, la profondeur de NP dans les dépressions et le degré de connectivité hydrologique. Devito *et al.* (1996) ont étudié les bassins versant de Harp Lake et Plastic Lake, et ont montré que la connexion hydrologique entre un versant de sol peu épais et un sol humide est présente seulement lorsqu'il pleut, alors que les versants plus épais (1 à 3 m) présente une connectivité hydrologique pérenne permettant d'alimenter le sol humide (relation linéaire). Frisbee *et al.* (2007) ont mis en lumière le rôle de l'emmagasinage de l'eau dans les micro-bassins générés par une topographie souterraine irrégulière dans le maintien de la connectivité hydrologique avec le ruisseau.

4.1.5 Influence variable du paysage sur l'hydrologie

À l'Hermine, l'influence du paysage sur la dépendance spatiale hydrologique diffère en fonction des conditions hydrologiques telle que le montrent les analyses CPMV (**section 3.1.6**). La représentation cartographique des analyses CMPV montre un gradient de structure spatiale, allant de plus large pour les conditions sèches à plus fine pour les conditions plus humides (**figure 3.9**). En condition sèche, la NP est détectable seulement dans les sources ZHN et ZHA (**figure 3.2a**). En condition humide, la NP est détectable dans l'ensemble du bassin (**figure 3.2b, 3.12 et 3.13**) accordant à la structure spatiale plus de détails ce qui permet de détecter plusieurs sites de corrélation spatiale sur les versants (**figure 3.9c, d**). Detty et McGuire (2010b) ont observé ces mêmes patrons spatiaux contrastés à partir de profondeurs de NP pour des conditions hydrologiques différentes. Ainsi, il est intéressant qu'un paysage d'apparence homogène, tel que le bassin versant de l'Hermine de premier ordre, recèle une hydrologie aussi diversifiée et variable selon les conditions d'humidité. Peu d'études ont quantifié l'influence du paysage sur le comportement de la NP. Nous croyons qu'il est important de s'attarder à une telle question parce que l'observation du paysage ouvre une porte à l'explication de l'hydrologie souterraine et qu'il est important d'associer adéquatement les éléments constitutifs du paysage à leur hydrologie.

4.2 La connectivité hydrologique dans le bassin de l’Hermine

4.2.1 Efficacité de la méthodologie pour détecter la connectivité hydrologique

Il apparaît évident que la mesure de la profondeur de la NP constitue une méthode *ad hoc* pour déceler la connectivité hydrologique. La différence entre les patrons spatiaux des quatre analyses CPMV renforce l’importance de ne pas négliger le choix de l’échelle temporelle et spatiale (**section 3.1.6**). Ces résultats des analyses CPMV appuient la dépendance entre le déploiement de la connectivité hydrologique et les conditions hydrologiques élevées. Ainsi, les patrons spatiaux de hauteur de NP des deux événements de précipitation montrent l’émergence de la connectivité hydrologique (**figures 3.12 et 3.13**) alors que la carte des minima de hauteur de NP (**figure 3.2a**) n’affiche pas de raccordement entre les hauts et bas de versant. Il est toutefois possible que des raccordements d’eau plus profonds s’opèrent sans être distinguables par notre réseau peu profond de puits. Le cas échéant, les zones humides ZHN et ZHA pourrait constituer des sources en eau et contribuer à l’écoulement. L’épaisseur des sols à l’Hermine varie entre un à deux mètres au-dessus du socle et entre 50 et 70 cm au-dessus de l’horizon compact. Nos résultats concordent avec d’autres études réalisées sur le Bouclier canadien de l’Ontario (Devito *et al.*, 1996; Vidon *et al.*, 2004) qui démontrent qu’en haut de versant, une épaisseur de sédiments perméables supérieure à deux mètres au-dessus d’un horizon compact, constitue une condition nécessaire au maintien d’une connectivité hydrologique entre le haut et bas de versant. Dans la perspective d’améliorer la compréhension de la connectivité hydrologique dans les bassins versants de sols peu épais, il est tout à propos d’orienter les efforts vers l’échantillonnage à l’échelle événementielle, c.-à-d. lors de conditions hydrologiques humides, en raison de sa structure spatiale inhérente fine.

Il est possible que la végétation joue un rôle important dans le développement des patrons de connectivité hydrologique. Bien qu’ils soient de différents ampleurs, les deux événements à l’étude présentent les mêmes patrons de connectivité. Toutefois, l’événement humide 2010 présente 53 % de puits humides de plus pour des conditions d’humidité au temps 1 que pour les CAH de l’événement sec 2009, 13 mm de précipitation totale de plus, 13 ° C de plus, et une présence de feuille dans les arbres contre une absence de feuille (**tableau 2.1**). Il aurait été envisageable de ne pas rencontrer de patron de connectivité hydrologique à l’événement 2009 étant donné les CAH sèches et les plus faibles précipitations. Toutefois, l’inactivité de la végétation

durant l'événement 2009 a pu favoriser le développement de la connectivité hydrologique par une absence d'évapotranspiration. Cette hypothèse est soutenue par les travaux de Detty et McGuire (2010b) qui évoquent une forte signature saisonnière de la connectivité hydrologique pour un bassin versant forestier sur till appalachien. Ces auteurs montrent qu'une végétation active génère surtout des patrons spatiaux de saturation morcelés pour peu qu'il ne pleuve pas, alors que des patrons spatiaux connectés caractérisent la période de sénescence.

Une densité élevée du réseau de puits est nécessaire afin de saisir le détail de la connectivité hydrologique. Le réseau de puits de cette étude est formé de plusieurs transects adjacents. La détection d'écoulement diagonal sur les versants, tel que HVN qui semble s'écouler vers l'amont du bassin versant à l'endroit de ZHA (**figures 3.12 et 3.13**), souligne l'importance de considérer *a priori* les écoulements comme multidirectionnels. Cette considération soutient que pour les bassins versants, le transect ne constitue pas un patron spatial adéquat pour saisir la connectivité hydrologique. Il est donc important que le patron d'instruments couvre une large gamme d'hydrotopes représentatif de la potentielle complexité hydrologique et de la potentielle existence de la connectivité hydrologique. La haute densité du réseau de puits, soit de 31 puits par hectare, et son égale répartition sur 60 % du bassin versant est inégalée dans la littérature (Seibert *et al.*, 2003; Jencso *et al.*, 2009; Anderson *et al.*, 2009a b; Detty et McGuire, 2010b) à l'exception de l'étude de Tromp-van Meerveld and McDonnell (2006b).

4.2.2 Correspondance entre la connectivité hydrologique et les hydrotopes de forte et moyenne convergence

Dans les sols de l'Hermine il y a correspondance entre une zone où la NP atteint des horizons plus en surface, un écoulement hypodermique « rapide » et la connectivité hydrologique pour peu qu'il y ait une pente. La présence de dépendance spatiale entre les hauts et bas de versant à l'endroit des connexions hydrologiques observées pour des conditions hydrologiques humides confirme l'existence de la connectivité hydrologique (**figure 3.9d**). Cinq zones de connexion sont détectées : RN, RA, BVS, HVS et HVN. Les patrons spatiaux de la connectivité hydrologique (**figures 3.12 et 3.13**) se calquent aux patrons spatiaux des hydrotopes de moyenne et forte convergence (**figure 3.10**). À la lumière de tous les critères utilisés pour détecter les hydrotopes (**section 3.1.1 à 3.1.7**), la connectivité hydrologique constitue un phénomène émergent caractérisé par : 1) des pourcentages de saturation de profil de sol dont les écarts-types sont élevés; 2)

des maxima d'élévation de NP dans le sol; 3) des relations NP/Q non linéaires présentant un plafonnement à angle fort se situant entre 30 cm sous la surface à 20 cm au-dessus de la surface du sol; 4) des coefficients de Spearman élevés pour les relations NP/Q dans la partie aval des zones de connexion et 5) une dépendance spatiale forte. Ces correspondances sont intéressantes puisqu'il est difficile de détecter et de mesurer la connectivité hydrologique. La présence de grandes fluctuations de la NP à l'endroit des connections hydrologiques est conforme aux résultats de Devito *et al.* (1996) et Vidon *et al.* (2004) pour des sites du Bouclier canadien dont l'épaisseur de sédiments au-dessus de l'horizon compact est inférieure à deux mètres. Ils ont montré de fortes fluctuations de NP dans la zone riveraine pour des sites où le lien hydrologique entre le haut et le bas de versant est intermittent. Dans quelques bassins versants du New Hampshire, Detty & McGuire (2010a) ont observé les mêmes phénomènes de plafonnement des relations NP/Q autant pour les bas que les hauts de versant. Ces auteurs évoquent la possibilité d'écoulement hypodermique préférentiel à ces endroits.

4.2.3 Comment détecter les chemins préférentiels de la connectivité hydrologique ?

Dans la mesure où il existe un raccordement hydrologique entre le haut et le bas de versant, il est logique que la NP d'un puits situé à même cet écoulement préférentiel connecté présente une corrélation élevée avec le débit. De fait, une zone de connectivité hydrologique constitue un apport d'eau substantiel contribuant à générer une portion du débit du cours d'eau. Bien que les coefficients de Spearman et les angles des relations NP/Q soient corrélés de manière significative à la distance aux limites du bassin versant (**tableau 3.3**), les coefficients de corrélation sont relativement faibles. Cet état de fait souligne l'existence d'autres facteurs explicatifs des formes et forces de relation NP/Q. L'existence de deux types d'écoulement au sein des versants semble expliquer cet état de fait. D'une part il existe un type d'écoulement préférentiel connecté pour lequel les coefficients de Spearman des relations NP/Q sont élevés, et d'autre part, il existe un écoulement diffus et/ou non connecté pour lesquels ces mêmes coefficients sont de moyens à faibles. La **figure 3.6a** montre que les coefficients de Spearman des relations NP/Q les plus élevés se situent : 1) à l'endroit de BVS où HVS se jette; 2) dans la zone riveraine de part et d'autre du cours d'eau où BVS et ZHN/RN se jettent; 3) à l'aval de RA; 4) à l'amont de HVN et 5) à l'aval de HVN qui se jette au nord de ZHA. Les zones dont les coefficients de Spearman sont élevés correspondent toutes à la partie aval des connexions hydrologiques identifiées à l'exception de l'amont de HVN. Dès lors, une

zone de connectivité hydrologique contribuant substantiellement à l'écoulement du débit correspond entre autres à une zone à l'aval comprenant une forte relation NP/Q. Le coefficient de Spearman de la relation NP/Q s'avère l'indice le plus discriminatoire et le plus circonscrit pour cibler les lieux où la connectivité hydrologique converge dans le bassin versant. Des résultats similaires sont observés par Devito *et al.* (1996) qui ciblent la zone périphérique à la charnière du milieu humide et du versant comme étant la zone indicatrice de connexion ou de déconnexion hydrologique entre ces deux milieux. L'élévation ou la diminution de la NP dans cette zone transitoire permet de constater l'activation ou la désactivation de la connectivité hydrologique. Les résultats d'Anderson *et al.* (2009) montrent que la connectivité peut être décelable en bas de versant lorsque s'opère un écoulement latéral dans le versant. Nos résultats concordent avec ces derniers en ce sens où la connectivité peut se détecter à l'aval du chemin préférentiel mais différent puisque les zones de détection ne se trouvent pas exclusivement dans la zone riveraine mais parfois sur les versants où une zone de forte connexion hydrologique contribue à l'écoulement.

4.2.4 Influence des zones de connexions hydrologique sur le débit à l'exutoire

Pour toutes les zones de connexion hydrologique, le passage d'une tranche de sol (d'environ 25 à 40 cm) du bas de profil vers le haut de profil, serait associé à un doublement de la vitesse d'écoulement (**tableau 3.7**). Toutefois, le gradient des valeurs de débit pour ces mêmes tranches de sols diffère. Le **tableau 3.8** montre des valeurs de débit similaires pour les deux tranches entre 30 et 95 cm dans le sol alors que la tranche entre 0 et 30 cm présente des valeurs deux fois supérieures. Ce contraste est induit par 1) une conductivité hydraulique à saturation moindre pour les horizons plus profonds et 2) des teneurs en eau moins élevées en profondeur qu'en surface. Les valeurs de pourcentage de fragments grossiers (Savoie, 1988) inclus dans les formules d'estimation de K_s (**figure 2.8**) montrent un gradient décroissant vers la surface passant de 49 % dans le BCg à 16 % dans Ae. Ainsi, la présence de fragments grossiers diminue la capacité du sol à contenir l'eau puisqu'ils occupent un volume que l'eau ne peut pas occuper. En outre, la présence d'un gradient croissant de porosité vers la surface (**figure 2.7**) entraîne un moins grand volume de pores disponibles pour recevoir l'eau dans la matrice de sol de bas de profil que pour la matrice de sol de haut de profil. Ces résultats suggèrent l'impact substantiel de la répartition verticale des caractéristiques du sol, soit K_s , la porosité et les fragments grossiers, sur le débit à l'exutoire. Ainsi, une hausse de

la NP à partir de 50 ou 30 cm sous la surface du sol permet non seulement à la NP de s'écouler plus rapidement mais assure aussi le transit d'un plus grand volume d'eau.

Dans le bassin de l'Herminie, il est possible d'affirmer que les zones de connectivité hydrologique contribuent à un apport important de volume d'eau dans le cours d'eau. De fait, le débit maximal est concomitant avec le maximum de connectivité hydrologique des deux événements (**figures 3.12 et 3.13**). Bien que les patrons spatiaux de hauteur de NP soient similaires pour 2009 et 2010, la position de la NP dans le sol est plus élevée pour l'événement 2010 que 2009 (**figures 3.12 et 3.13**). Le débit de l'événement 2010 est environ 13 fois plus élevé que celui de l'événement 2009, ce qui amène à poser l'hypothèse qu'une élévation de NP dans les horizons plus près de la surface à l'endroit des connexions hydrologiques est nécessaire pour permettre une augmentation substantielle du débit. Ainsi, l'émergence de la connectivité hydrologique semble contribuer à l'augmentation du débit par le truchement de l'existence d'un écoulement hypodermique rapide et volumineux de l'eau dans les horizons de surface des zones de connexion hydrologique. Dans un bassin versant sur till glaciaire en été, Brown *et al.* (1999) montrent que l'écoulement hypodermique de surface dans les horizons organiques associé à des événements pluviaux contribue substantiellement à l'augmentation du débit.

4.2.5 Interaction entre les hydrotopes et la connectivité hydrologique

Il existe une asymétrie de la connectivité hydrologique entre les deux versants qui peut s'expliquer par l'interaction entre les différents hydrotopes. La connectivité hydrologique sur le versant nord est circonscrite alors que sur le versant sud elle est caractérisée par une plus large zone continue (**figures 3.12 et 3.13**). Sur le versant nord, l'interaction entre deux hydrotopes contrastés, soit la divergence forte à l'amont de ZHN, et une convergence forte à l'endroit de ZHN/RN, mène à l'émergence d'une zone d'écoulement très active mais spatialement restreinte. La connexion HVN semble se drainer rapidement dans ZHA mais de manière moins intense que ZHN-RN étant donné que la NP est plus en profondeur dans le sol. Le versant sud recèle moins de contraste entre les hydrotopes montrant un continuum d'écoulement de l'eau. L'interaction entre ces hydrotopes permet le développement d'une connectivité hydrologique plus diffuse qui se maintient dans le temps. En somme, cette asymétrie entre les versants permet au versant nord de se drainer plus promptement que le versant sud tel qu'en témoigne les **figures 3.12 et 3.13**. Ali *et al.* (2010b) ont proposé que les versants nord et sud se comportent différemment d'un point de vue hydrologique. Cette asymétrie

hydrologique pourrait découler d'une asymétrie topographique de surface ou topographique souterraine. À cet effet, Gelati (2007) a montré que le comportement de l'humidité du sol diffère entre les deux versants du bassin de l'Herminie et qu'une répartition de l'humidité inverse au gradient topographique a été décelée sur le versant nord. Cet « inversion », c'est-à-dire un plus haut taux d'humidité dans le haut que le bas du versant nord, serait une conséquence de la présence de la dépression ZHN dans le versant. Ainsi, nos résultats confirment l'asymétrie hydrologique entre les versants nord et sud et montrent l'influence potentielle de l'interaction entre les hydrotopes sur les types de connexion hydrologique.

4.2.6 Rôle du *fill and spill* sur l'enclenchement de la connectivité hydrologique

La **figure 3.17** permet de mettre en lumière l'existence du phénomène non linéaire *fill and spill* comme mécanisme d'enclenchement d'une connexion hydrologique pour les zones ZHN/RN, HVS et RA. Le *fill and spill* est formé de l'interaction unidirectionnelle entre une zone d'accumulation et sa zone de déversement. À l'Herminie, l'accumulation de l'eau peut être induite par des inégalités du socle et/ou par la présence d'éléments de discontinuité dans les sols, tels que les roches ou des horizons plus compacts. Le déversement associé au *fill and spill* est circonscrit et permet une concentration de l'écoulement de l'eau dans le sol. Ainsi, à ces endroits précis, une élévation plus importante de la NP peut s'opérer par rapport au sol environnant. Le cas échéant, la NP atteint des horizons plus transmissifs, ce qui permet l'émergence d'un écoulement hypodermique rapide et favorise la connexion d'un haut vers un bas de versant. De plus en plus d'études montrent l'existence du mécanisme du *fill and spill* (Devito *et al.*, 1996; Spence et Woo, 2003; Buttle *et al.*, 2004; Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006b). Dans le bassin de l'Herminie, certaines connexions hydrologiques ne semblent pas enclenchées par le *fill and spill*, tels que BVS, HVN et ZHA. Il est possible que ces connexions constituent des zones de convergence où aucun élément souterrain ne fait obstacle à l'écoulement.

4.3 Écoulement hypodermique rapide dans le bassin de l'Herminie

4.3.1 Existence de la transmissivité rétroactive positive de la nappe phréatique dans le bassin de l'Herminie

Nous avons montré que l'élévation de NP dans les sols du bassin de l'Herminie s'accompagne du mécanisme de transmissivité rétroactive positive. Il existe dans le sol un gradient croissant des valeurs estimées de Ks du bas vers le haut de profil (**figure 3.15**). Cette progression verticale influence la forme des relations NP/Q (**figures 3.4 et 3.5**). D'abord le plafonnement des relations montre que l'écoulement latéral de l'eau dans les horizons plus transmissifs du sol s'opère au détriment de l'élévation de NP dans le sol. La diminution significative de l'angle des relations NP/Q vers la surface du sol témoigne de l'existence d'une plus grande capacité de transmission en surface qu'en profondeur (**tableau 3.2**). De plus, les relations de forme autolimitée qui plafonnent près de la surface sont plus fortement corrélées au débit que les relations qui plafonnent en profondeur dans le sol ce qui confirme la forte transmissivité des horizons de surface (**tableau 3.2**). En somme, l'existence des valeurs plus élevées de Ks dans les horizons près de la surface du sol a aussi été noté dans plusieurs études qui ont montré qu'une plus faible compacité à la surface des tills glaciaires est à l'origine de l'existence du mécanisme de transmissivité rétroactive positive (Kendall *et al.*, 1999; Nyberg *et al.*, 2001; Seibert *et al.*, 2003; Laudon *et al.*, 2004; Cory *et al.*, 2007). La transmissivité rétroactive positive serait nécessaire pour générer un écoulement hypodermique rapide dans les sols du bassin de l'Herminie. Il existe dans ce bassin versant une diversité de profondeurs maximales et minimales de plafonnement et donc de transmissivité rétroactive positive. Nous discuterons du rôle des horizons sur l'écoulement hypodermique rapide.

4.3.2 Influence de la matière organique sur la conductivité hydraulique

Nos résultats tendent à montrer que l'horizonation podzolique des sols de l'Herminie influence la profondeur de l'autolimitation de la relation NP/Q. À la **figure 3.7**, les changements importants de fréquence de la profondeur de plafonnement sont surtout situés à la charnière de deux horizons. La majorité des relations NP/Q, soit environ 55 %, débute un plafonnement entre les horizons Bf et Bhf et montre un maximum de plafonnement dans l'horizon Bhf. Dans les horizons Bhf et LFH, les valeurs du coefficient de Spearman des relations NP/Q sont relativement élevées alors que les angles sont faibles (**figures 3.8a et b**). Ces résultats suggèrent que l'écoulement

hypodermique rapide s'opère principalement dans les horizons Bhf et LFH dans le bassin de l'Herminie. Ces deux horizons sont caractérisés par les plus hautes valeurs de Ks (**figure 3.15**) et un plus haut pourcentage de matières organiques (MO) (**figure 2.8**) que les horizons sous-jacents. Mehuys et De Kimpe (1976) expliquent la hausse de Ks dans les horizons B podzoliques par la présence de complexes organo-métalliques de plus faible densité. Pour des podzols, Nyberg (1995) a montré une corrélation positive entre MO et la porosité. L'auteur amène l'hypothèse que la présence des acides organiques entraîne une altération des minéraux primaires résultant en une augmentation de la porosité qui est comblée par des substances organiques. Toutefois, d'autres études montrent des résultats contraires. Ainsi, des mesures de Ks réalisées sur des sables d'origine éolienne ou fluvioglaciale montrent que les podzols présentent une diminution graduelle de Ks du bas du profil vers la surface (Seuntjens *et al.*, 1999; Mecke et Ilvesniemi, 1999). La diminution de Ks dans les horizons illuviaux podzoliques serait imputable à la présence d'une structure secondaire générée par l'enrobage des grains de sable par les oxydes de Al et Fe qui les unissent entre eux et par l'enrichissement de MO récalcitrante à la décomposition. Ces nouvelles structures sont caractérisées par des espaces poreux non continus, ce qui diminue Ks. Néanmoins, les sols du bassin de l'Herminie se sont formés dans des tills glaciaires dont les caractéristiques physiques diffèrent de celles des sables. De fait, la granulométrie des tills est plus hétérogène et la structure est plus dense. Or, dans un contexte de tills, tel que dans le bassin de l'Herminie, il est vraisemblable que la MO contribue à augmenter la porosité et conséquemment à augmenter Ks. Ainsi, la MO semble jouer un rôle important dans les horizons minéraux. Par ailleurs, l'écoulement le plus en surface et le plus rapide se trouve dans les horizons organiques LFH. De fait, la relation NP/Q dont la profondeur de plafonnement se situe dans ces horizons organiques se caractérise par des angles les plus faibles et des coefficients de corrélation plus élevés (**figure 3.8b**). La **figure 2.8** présente d'autres gradients de variables pouvant contribuer à augmenter Ks dans les horizons de surface, tels que le pourcentage de fragments grossiers.

4.3.3 Influence des pourcentages des fragments grossiers sur la conductivité hydraulique

À la **figure 2.8**, on observe une augmentation graduelle du pourcentage de fragments grossiers à partir de 55 cm dans le sol à partir de la surface, ce qui suggère que la transmissivité de l'eau est plus grande dans les horizons de surface où il y a moins de fragments grossiers. Puisque les fragments jouent un rôle important dans la

transmissivité de l'eau dans les médiums poreux, Brakensiek et Rawls (1994) ont proposé la formule que nous avons utilisée pour estimer les valeurs de K_s (**section 2.7.4.2**). Ainsi, un fragment grossier est une roche pour laquelle K_s est considéré comme nulle par rapport à la matrice de sol. Or, la présence de fragments grossiers peut contribuer à diminuer K_s même si la matrice est très transmissive. Selon la formule, un pourcentage de fragments grossier de 50 % dans un sol entraîne une diminution de moitié de K_s . Manus *et al.* (2009) ont également considéré le pourcentage de fragments grossiers dans leur modèle hydrologique. Dans le bassin de l'Hermine, le faible pourcentage de fragments grossiers dans les horizons de surface en comparaison des horizons plus profonds, pourrait contribuer à générer le mécanisme de transmissivité rétroactive positive de la NP par 1) l'augmentation de la K_s dans les horizons près de la surface et 2) l'augmentation de l'écoulement latéral au-dessus des horizons de plus forte densité induite par la présence de fragments grossiers. En somme, nos résultats suggèrent qu'en l'absence de l'horizon compact fragique, vu son caractère discontinu dans les sols, la présence de fragments grossiers dans les horizons plus profonds jouerait un rôle sur l'écoulement latéral de l'eau similaire à l'horizon compact fragique. Nous explorerons ici l'influence potentielle des horizons de plus forte densité sur l'écoulement de l'eau.

4.3.4 Rôle des horizons de forte densité sur l'écoulement de l'eau

À l'Hermine, trois horizons se distinguent par leur forte densité, soit Ae, C et la couche compacte fragique discontinue. À la **figure 3.7**, peu de plafonnement débute dans l'horizon Ae même s'il se situe en surface comparativement aux horizons LFH. Il est possible que l'écoulement latéral de l'eau soit gêné à l'arrivée de NP dans l'horizon Ae. De fait, la NP dans un horizon de faible K_s a tendance à s'accumuler et à s'élever plutôt qu'à s'écouler latéralement s'il y a une pente. Dans un bassin versant du Bouclier canadien pour des événements pluviaux en début d'automne, Peters *et al.* (1995) ont montré que l'écoulement de l'eau dans l'horizon Ae est beaucoup plus faible que celui dans les horizons organiques sus-jacents et minéraux sous-jacents. Ils ont observé un faible écoulement de courte durée dans l'horizon Ae précédant l'écoulement dans les horizons plus profonds. L'eau de cet horizon provenait d'un écoulement hortonien sur les horizons LFH qui s'estompait à mesure que l'eau s'infiltrait dans les horizons organiques. L'existence d'un écoulement rapide dans les horizons organiques induit par un fort contraste de K_s entre les horizons LFH et les horizons minéraux en conditions sèches a été amené comme hypothèse par Biron *et al.* (1999) dans le bassin de

l’Hermine pour expliquer une contribution des horizons riches en DOC, NO₃ et Ca, alors que le niveau de NP était faible en bas de pente. Ainsi, nos résultats confirmeraient partiellement cette hypothèse pour des conditions d’humidité élevée. Ainsi, l’élévation de NP dans les horizons LFH entraînerait un écoulement latéral rapide dans les horizons organiques pour deux raisons : 1) la plus grande porosité des horizons LFH par rapport au matériel sous-jacent et 2) l’accélération de l’écoulement latéral en raison de la présence de l’horizon sous-jacent Ae dont la densité est plus élevée. Toutefois, la faible épaisseur d’Ae, soit en moyenne 10 cm, invite à se questionner sur l’impact hydrologique de cet horizon.

Dans le bassin de l’Hermine, nous avons observé un début de l’augmentation de la fréquence de la profondeur maximale de l’autolimitation des relations NP/Q à partir de 70 cm dans le sol et une fréquence élevée de profondeur minimale de plafonnement entre 50 cm et 20 cm dans le sol (**figure 3.7**). Cet état de fait soutient l’impact potentiel d’un horizon compact discontinu entre 50 et 75 cm sur l’écoulement latéral de l’eau. Des horizons compacts ou fragipans ont été observés dans les tills du Bouclier canadien (Mutwewingabo *et al.*, 1975; Mehuys et Kimpe, 1976; Vidon et Hill, 2004), sur les tills montréalais (James et Roulet, 2006) et sur des tills appalachiens (De Kimpe, 1970; De Kimpe et McKeague, 1974; Detty et McGuire, 2010b). La présence de fragipans au Québec correspond à leur extension latitudinale maximale du nord-est de l’Amérique (De Kimpe, 1970). Pour les sols du Bouclier canadien, on fait référence à l’horizon fragique puisqu’il reprend plusieurs caractéristiques du fragipan sans toutes les inclure. Son origine pédogénétique et physique (poids des glaciers) lui donnent ces caractéristiques : 1) une forte densité (2,0 g/cm³); 2) une friabilité élevée; 3) une mollesse accrue au printemps et une dureté accrue en automne; 4) un colmatage du réseau poreux par du matériel illuvié, orienté et trié et 5) une absence de racines en raison d’une porosité vésiculaire restreignante (Mutwewingabo *et al.*, 1975). Pour un profil de podzol dans un till des Laurentides, Mehuys et De Kimpe (1976) ont montré que la haute densité de l’horizon fragique était suffisante pour générer une accumulation et un écoulement latéral seulement lors de fortes pluies ou de la fonte de la neige. Dans une étude dans un till appalachien, Detty et McGuire (2010b) ont montré que la NP transitoire serait initiée à l’interface des horizons B et C environ à 70 cm sous la surface du sol. De surcroît, cette initiation est présente même s’il existe une infiltration de l’eau sous l’horizon compact en temps de sécheresse. En l’absence de l’horizon compact dans le bassin de l’Hermine, il est possible que la densité de l’horizon C, où l’eau est

présente, soit suffisante pour permettre le développement d'un écoulement latéral rapide dans les horizons sus-jacents.

4.4 Synthèse de l'objectif 1

Nous avons détecté quatre zones hydrologiques similaires dans le bassin versant de l'Hermine. Ces hydrotopes représentent un gradient allant d'une forte convergence de l'eau à une forte divergence de l'eau. La distribution spatiale de ces hydrotopes ne se calque pas au traditionnel couple hydrotopique zone riveraine/versant. De fait, on retrouve des zones de haute convergence sur les versants plutôt qu'au fond de vallée. Nos résultats infirment l'hypothèse d'un état stable de nappe phréatique en raison de l'hétérogénéité du comportement de NP dans le bassin versant. Les conditions hydrologiques humides dans le bassin favorisent l'émergence de structures spatiales plus fines de la NP.

Grâce à une haute densité de puits, les patrons spatiaux de la connectivité hydrologique ont pu être détectés. Il existe une correspondance spatiale entre les hydrotopes de forte et moyenne convergence et les zones de connectivité hydrologique. À l'Hermine, le coefficient de Spearman des relations NP/Q s'avère un bon outil pour détecter les chemins préférentiels de la connectivité hydrologique. De fait, à l'aval des connexions hydrologiques, le coefficient de Spearman est élevé. Notre méthode de détection de la connectivité hydrologique, soit par l'utilisation d'un réseau dense de puits, s'est avérée efficace et souligne l'importance de considérer l'écoulement de manière multidirectionnelle.

La correspondance entre le maximum de connectivité hydrologique et le maximum de débit pour les événements 2009 et 2010 semblent attribuable à deux mécanismes qui s'opèrent dans les zones de connexion hydrologique : 1) l'élévation de NP dans les horizons de plus haute transmissivité et de plus haut potentiel de volume de saturation en eau qui génère une augmentation de la vitesse et du débit d'écoulement souterrain et 2) l'élévation de NP au-delà d'obstacles souterrains qui génère un déversement préférentiel nommé *fill and spill*. L'augmentation du débit dans les horizons près de la surface semble attribuable à deux mécanismes : 1) augmentation de Ks et 2) augmentation du volume potentiel de saturation par la plus grande porosité et le plus faible pourcentage de fragments grossiers.

À l'Hermine l'écoulement hypodermique latéral rapide s'opère dans les horizons près de la surface du sol, soit dans les horizons Bhf et LFH. Cet écoulement est induit par le

mécanisme de transmissivité rétroactive positive. Ce mécanisme s'opère puisque les horizons près de la surface se caractérisent par des valeurs estimées de K_s plus élevées que celles des horizons sous-jacents. Les variables qui peuvent contribuer à augmenter K_s en surface sont 1) un plus haut pourcentage de MO en surface qui génère une plus haute porosité; 2) un plus faible pourcentage de fragments grossiers en surface et 3) la présence d'un horizon compact sous-jacents aux horizons de surface qui favorise l'écoulement latéral de l'eau.

Dans les sections qui suivent, nous discuterons des résultats des objectifs 2 et 3 qui portent sur la géochimie et l'hydrochimie. Nous aborderons tout d'abord les processus géochimiques qui prévalent dans les zones de forte convergence, soit les zones humides ZHN et ZHA, et nous nous intéresserons par la suite à l'influence de l'écoulement hypodermique rapide dans les horizons plus riches en MO et en COD sur l'hydrochimie à l'exutoire.

4.5 Impact de Mn, Fe et COD sur la mobilisation des éléments traces dans les sols humides

4.5.1 Présence d'accepteurs d'électrons alternatifs dans les sols humides

Il est admis que Mn et Fe constituent des accepteurs d'électrons alternatifs à l'oxygène dans les milieux où des conditions réductrices prévalent. Une fois utilisés par les bactéries anaérobiques, Mn et Fe sont réduits en des formes plus solubles, soit Mn^{2+} et Fe^{2+} , ce qui explique leurs concentrations plus élevées dans les milieux aquatiques que les milieux terrestres bien drainés (Richardson et Vepraskas, 2001). Dans le bassin de l'Hermine, deux sources de Mn et Fe sont identifiées, soit les horizons organiques LFH et les sols des dépressions humides (**tableaux 3.10 et 3.11**). Ces derniers constituent des milieux anaérobiques tel qu'en témoignent les faibles valeurs moyennes d'oxygène dissous pour ZHA (1,8 mg/L) et ZHN (1,0 mg/L) alors que les valeurs d'oxygène à l'exutoire du bassin varient entre 9,1 et 9,6 mg/L (**tableau 3.14**). Les plus grandes concentrations en Mn dissous se trouvent dans les sols humides alors que celles en Fe se situent dans les horizons LFH. Pour les deux sols humides, les résultats montrent une corrélation négative entre Mn et l'oxygène dissous et positive entre Mn et la température, ce qui suggère une forte solubilité de Mn en milieux réducteurs (**figure 3.21**). Aussi, il est connu que la complexation de Mn par la MO ne constitue pas un facteur important de mobilisation (Heal *et al.*, 2002). Quant au Fe, il est surtout présent sous sa forme chélatée par les complexes organiques dans les horizons organiques

(Kabata-Pendias, 2001). Ces considérations expliquent la plus forte association de Mn aux milieux réducteurs par rapport au Fe. Nos résultats concordent avec ceux d'Abesser *et al.* (2006) qui reconnaissent deux sources de Mn et Fe pour des bassins versants du Royaume-Uni, soit les horizons organiques et la NP profonde où des processus de réduction prévalent. À d'autres égards, nos résultats diffèrent de cette étude qui montre que l'apport en Mn et Fe dans le cours d'eau provient surtout de la zone riveraine là où la NP profonde se charge en Mn et Fe dissous. De fait, à l'Hermine, les concentrations en Mn et Fe, sont faibles et similaires pour la zone riveraine et le haut de versant (**tableau 3.11**). Cet état de fait s'explique, dans un premier temps, par la présence continue de la NP dans les sols de zones humides et par l'absence de NP, même en profondeur, pour les hauts et bas de versants sous des conditions sèches (**figure 3.2a**). Les conditions de réduction sont donc vraisemblablement plus fréquentes et élevées pour les sols humides que pour la NP en zone riveraine. Hardie *et al.* (2007), montrent que les sols ré-humidifiés en laboratoire qui participent au relâchement de Mn, se caractérisent par un amalgame de matières minérale et organique. Les auteurs affirment que le matériel minéral constitue une source de Mn, mais qu'une quantité élevée de MO est nécessaire pour générer des conditions réductrices et mobiliser Mn. À l'Hermine, les zones humides ZHN et ZHA contiennent des concentrations en COD (**tableaux 3.10 et 3.11**) plus grandes que celles de la NP profonde du bas et du haut de versant. Ceci expliquerait une plus forte solubilité de Mn dans des milieux humides riches en COD par rapport à la NP pauvre en MO. En somme, la forte présence des accepteurs d'électrons alternatifs, Mn et Fe, dans les zones humides, s'expliquent d'une part, par la présence d'un taux élevé d'humidité qui favorise l'existence de conditions réductrices, et d'autre part, par la présence d'une plus grande concentration de COD qui peut contribuer à bâtir des conditions anaérobiques.

4.5.2 Rôle de Mn et Fe sur la solubilité des éléments traces

Il est admis que le destin de certains éléments traces est déterminé par le cycle biogéochimique de Mn et Fe. Les formes oxydées de Mn et Fe, soit Mn^{4+} et Fe^{3+} , sont solides et non solubles dans l'eau, alors que les formes réduites, soit Fe^{2+} et Mn^{2+} sont solubles. Cette alternance entre les deux formes est tributaire des conditions d'oxydoréduction et constitue la base de l'influence sur les éléments traces. Ainsi, les formes oxydées solides peuvent constituer un puits de ET puisqu'elles adsorbent les ET, alors que les formes réduites solubles peuvent constituer une source de ET parce qu'elles relâchent les ET. Notre étude montre un impact significatif de Mn et Fe sur la

variabilité des concentrations en ET dissous des sols de zones humides. Pour ZHN, Mn et Fe expliquent 47 % et 16 % de la variabilité des ET, alors que pour ZHA, Fe explique 16 % de la variabilité alors que Mn n'a aucun effet. Les ET corrélés positivement à Mn dans les sols humides sont pour l'essentiel Co, Rb, Y et Ce (**section 3.2**). Il est admis que le comportement de Co est déterminé par le cycle biogéochimique de Mn (Kabata-Pendias, 2001; Taillefert *et al.*, 2002). La phase solide oxydée de Mn peut facilement adsorber Co^{2+} qui passe à sa forme Co^{3+} durant un processus partiellement connu à ce jour. Une étude de laboratoire sur des sols de milieux humides montre le lien exclusif qu'entretient Co avec Fe^{2+} plutôt qu'avec COD (Grybos *et al.*, 2007). Il est à noter que ces auteurs n'ont pas considéré Mn dans leur recherche. Le cycle biogéochimique des terres rares, Y et Ce, est peu connu. Dans une étude en laboratoire, Cao *et al.* (2001), remarquent une augmentation significative de la solubilité de Ce et Y, sous des conditions réductrices et de bas pH. Puisque ces deux éléments sont positivement corrélés à la solubilité de Mn et Fe, les auteurs suggèrent que la dissolution des oxydes de Fe et Mn, sous des conditions réductrices, contribue au relâchement de Ce et Y. Palumbo *et al.* (2001) détectent un enrichissement substantiel, entre autres en Ce et Co, sur des nodules de Fe et Mn (forme oxydée solide) dans des sols inondés. Ils affirment que la réduction de Ce^{4+} en une forme plus soluble, soit Ce^{3+} , est induite par la solubilité accrue de Mn en conditions anaérobiques. Neal (2005) trouve des concentrations plus élevées en Ce pour des gleysols riches en Fe^{2+} que pour des podzols bien drainés. L'auteur suggère que les conditions acides et réductrices qui prévalent dans les gleysols, contribuent à solubiliser les oxydes de Fe et, ainsi, à relâcher le Ce adsorbé sur ces oxydes. Une récente synthèse de Hu *et al.* (2006) sur les terres rares, expose que Ce constitue l'élément montrant le plus de liaisons avec, entre autres, les oxydes de Mn et Fe et la MO, parmi les 14 terres rares à l'étude pour 34 sols de la Chine. À partir d'un tableau de cette synthèse, on observe que Ce présente un pourcentage de liaison aux oxydes de Mn et Fe qui est six fois plus élevé que celui des liaisons avec MO.

Cette même étude montre l'affinité entre Rb et les aluminosilicates. À l'Hermine, il existe une corrélation positive entre Rb et l'oxygène dissous dans ZHN (**figure 3.21**). Rb serait donc peu soluble en conditions réductrices même s'il présente des concentrations élevées dans les sols humides. Il est possible que le temps de résidence élevé de l'eau dans les sols des zones humides contribue à l'altération des aluminosilicates et donc à la mobilisation de Rb. Cette hypothèse converge avec les travaux de Ladouche *et al.* (2001), qui montrent que Rb proviendraient des horizons

profonds du saprolite. Dans les sols humides, les éléments fortement associés au Fe (et COD) sont surtout Ni, Cr, Zn et Cu (**section 3.2**). Le cycle biogéochimique de ces éléments est mieux connu que celui des terres rares et il est admis que ces éléments sont sidérophiles (Kabata-Pendias, 2001). Pour des sols de milieux humides incubés en conditions anoxiques, Davranche *et al.* (2011) trouvent que le relâchement de Cu, Cr, Co, Ni et Pb est synchrone à l'augmentation de Fe^{2+} (et COD).

4.5.3 Rôle du COD sur la solubilité des éléments traces

La concentration en COD dans ZHA est plus élevée que dans le ZHN (**tableau 3.10**). Dans ZHA, le COD explique 28 % de la variabilité des éléments suivi par le Fe (16 %) et H^+ (8 %) (**tableau 3.12**). Pour ZHN, le COD exerce une faible influence (9 %) sur la variabilité des ET, alors que H^+ n'influence pas cette variabilité significativement. Ainsi, pour les deux zones humides, ZHA et ZHN, des mécanismes différents semblent dicter le lien entre le comportement des ET et COD. La plus forte présence d'une litière aérienne herbacée, d'une litière racinaire et d'exsudats racinaires pour ZHA que pour ZHN, pourrait être à l'origine des plus fortes concentrations en COD de ZHA. Par exemple, les exsudats racinaires sont formés de composés colloïdaux et solubles, constituant une importante source de ligands organiques capables de former des complexes organo-métalliques (Richardson et Vepraskas, 2001). La libération de COD en conditions réductrices pourrait également provenir de la fragmentation des particules de MO par les bactéries anaérobiques (Gruau *et al.*, 2004) ou des métabolites de ces bactéries (Kalbitz *et al.*, 2000).

Toutefois, l'observation des valeurs de pH dans les deux sols humides et au sein même de ces derniers, permet de mettre en lumière un autre mécanisme pour expliquer la plus forte concentration en COD et sa plus grande influence sur les ET dans ZHA que dans ZHN. Ce mécanisme alternatif est basé sur les concentrations en H^+ . La moyenne des valeurs de pH pour ZHA est de 6,5 avec un minimum de 4,9 pour le puits K4 et un maximum de 7,6 au puits K2. Le pH moyen de ZHN est de 6,0 avec un minimum de 5,3 pour le puits D4 et un maximum de 6,9 au puits D3. Ces données brutes s'observent de manière indirecte aux **figures 3.19 et 3.20**. Ces valeurs montrent dans un premier temps, que les puits les plus humides présentent des valeurs de pH plus élevées et que ZHA a une concentration en H^+ trois fois moindres que celle de ZHN (**tableau 3.10**). Cet état de fait colle aux résultats de McLaughlin et Webster (2010) exposant que dans un milieu humide du Bouclier canadien, l'élévation de la NP contribue à augmenter l'alcalinité (HCO_3^-) alors qu'une baisse de NP produit de l'acidité suite aux processus

d'oxydation qui produisent les H^+ . Pour les sols des milieux bien drainés de l'Herminie, les horizons LFH présentent les plus basses moyennes de pH (pH = 4,2) alors que la NP recèle les plus hautes moyennes de pH (pH = 5,9) (**tableau 3.11**). Or, le fait que la présence de MO contribue à diminuer le pH des sols bien drainés à l'Herminie soulève la question de savoir pourquoi les sols humides qui contiennent les plus forts niveaux de COD possèdent aussi des valeurs de pH très élevées ? Des études récentes montrent que la diminution de la concentration en H^+ induites par des conditions réductrices provoque une augmentation du COD dans l'eau (Grybos *et al.*, 2007, 2009). Ce mécanisme de « désorption » du COD s'opère comme suit : 1) consommation des protons lors de réactions de réduction (**section 1.4.2**) et donc augmentation du pH; 2) déprotonation des groupes hydroxyles à la surface minérale; 3) diminution de la charge positive de la surface minérale et donc perte de la capacité à adsorber les anions comme la MO dissoute; 4) hausse de l'électronégativité des molécules organiques et 5) remise en solution de la MO suite à la désorption de COD de la surface minérale. Selon ce mécanisme, le COD relâché par la déprotonation des surfaces minérales pourrait exercer un rôle sur la solubilité des ET à l'instar des oxydes de Fe et Mn.

Pour ZHA, les ET associés au COD sont As, Ba, Ce, Cr, Ni, Pb, Se et Y. Dans une étude de laboratoire sur les sols de milieux humides Grybos *et al.* (2007) montrent que l'augmentation des conditions de réduction est concomitante à l'augmentation du COD et de Fe^{2+} qui agissent différemment sur les ET. Dans ces conditions, les auteurs exposent que Ce est fortement lié à COD, que Pb et Ni sont influencés par l'augmentation de Fe^{2+} et de COD, alors que le lien est mal défini pour Cr. Dia *et al.* (2000), soulignent aussi que le comportement de Ce dans les eaux organiques des milieux humides n'est pas entièrement contrôlé par Fe mais plutôt par le COD. Cette même étude révèle l'existence une forte affinité entre Ba et COD dans une NP riche en MO. À la **figure 3.20**, on observe une forte affinité entre COD et Fe qui constituent tous deux des facteurs explicatifs. Des études récentes en milieux humides, montrent que Fe est présent sous forme de nanoparticules de type Fe^{3+} liées préférentiellement à la MO, plutôt que d'être sous forme d'oxydes cristallins, et que ces derniers ne joueraient pas un rôle aussi important que généralement admis sur l'adsorption des ET (Davranche *et al.*, 2011; Pédrot *et al.*, 2010). Ces études signalent le lien fort qui unit COD et Fe dans les milieux humides, ce que nous retrouvons également dans ZHN et ZHA. En somme, la mise en lumière du rôle sous-estimé du pH sur le lien entre le COD et les ET dans les

milieux humides, explique l'influence significative de COD dans ZHA suite au développement de conditions de réduction et de pH élevé.

4.5.4 Causes de la dissemblance géochimique entre les deux zones humides

Les deux sols humides présentent des différences géochimiques tant à l'égard des facteurs d'influence sur le comportement des ET que sur les concentrations absolues en éléments. Des dissemblances sur le plan du régime hydrologique, des conditions d'oxydoréduction et de la biologie, semblent expliquer ces différences géochimiques. Les fluctuations du pourcentage de saturation du profil de sol sont deux fois plus élevées pour ZHN que pour ZHA, ce qui suggère un temps de résidence de l'eau moins élevé pour ZHN et partant, la présence d'une plus grande ré-oxygénation du profil de sol (**tableau 3.1**). De telles conditions pourraient contribuer à augmenter les conditions réductrices de ZHA, ce qui expliquerait le pH plus élevé de ZHA (**tableau 3.10**). Grâce au processus de déprotonation et de désorption du COD en milieu réduit, les concentrations en COD seraient plus élevées pour ZHA. En outre, les concentrations en Mn plus élevées dans ZHN que dans ZHA pourraient être induites par des conditions de réduction moindre dans ZHN puisque Mn est réduit lors de conditions de réduction faibles ou intermédiaires. Les conditions de saturation stables ont permis l'établissement d'une végétation et certainement de microorganismes caractéristiques des milieux humides pour ZHA alors que ZHN se présente comme un sol saturé dépourvu d'une flore hygrophile. À son tour la végétation joue un rôle sur la géochimie de ce milieu, entre autre, en permettant l'accumulation de Si dans ZHA. L'influence différente de l'hydrologie, des conditions réductrices et de la biologie sur ces deux milieux humides est confirmée par de fortes concentrations en Si pour ZHA comparativement à ZHN.

4.5.5 Influences hydrologique et biologique sur les concentrations en Si dans ZHA

À l'Hermine, le seul élément dont les concentrations sont plus élevées dans les horizons minéraux que dans les horizons organiques est la Si. En hydrologie, l'utilisation de la Si pour détecter l'écoulement dans les horizons minéraux est largement répandue (Hooper et Shoemaker, 1986; Hendershot *et al.*, 1992; Scanlon *et al.*, 2001). De fait, les concentrations élevées en Si dans les horizons minéraux, induites par l'altération de la matrice minérale silicatée, et son comportement relativement conservateur, font de cet élément un candidat idéal pour signer les horizons minéraux. Cette approche en hydrologie considère les sources en Si d'un point de vue géochimique et en fonction

d'un profil de sol vertical. Nos résultats montrent que parmi les cinq sources analysées, la zone ZHA, recèle, et de loin, les plus hautes concentrations en Si dissoute. La Si y est vraisemblablement présente en phase solide sous forme de Si amorphe d'origine biogéochimique. Dans le cas de l'utilisation de Si comme traceur hydrologique, la non-consideration de la source ZHA pourrait mener à un résultat erroné sur la compréhension de l'écoulement de l'eau à l'Hermine. L'importance du cycle biologique de la Si a été mise en lumière par Bartoli (1983) pour les écosystèmes terrestres forestiers et plus récemment par Struyf *et al.* (2010) pour les milieux humides boréaux. Conley (2002) pose l'hypothèse que le taux d'exportation de la Si des écosystèmes terrestres vers les rivières est surtout régi par le cycle biologique de Si.

À l'Hermine, la contribution de ZHA durant un événement pluvial, à l'exception de la fin de l'événement 2010, ne semble pas déterminante à la lumière des résultats des **sections 3.2 et 3.3**. Les concentrations les plus élevées en Si dans le ruisseau pour l'événement 2010 sont de 3,76 mg/L au temps 1 et de 4,16 mg/L au temps 29 alors qu'au début de l'événement 2009, elles atteignent 4,7 mg/L. Ces concentrations se rapprochent davantage des concentrations des sources B, NP ou ZHN dont le minimum est de 2,7 mg/L et le maximum 4,83 mg/L que des concentrations de ZHA où le minimum est de 6,7 mg/L et le maximum à 27,7 mg/L. À la lumière de ces résultats, il est possible que ZHA constitue un puits géochimique de Si dont les exportations via l'écoulement de l'eau sont faibles. Cet état de fait a des conséquences importantes sur la chimie du cours d'eau puisque ZHA constitue le point de convergence de l'eau pour toute la section amont du bassin versant. Cette zone humide joue vraisemblablement un rôle tampon en ralentissant le transit de l'eau et des éléments dissous entre les versants à l'amont et le chenal du cours d'eau. Ainsi, il est possible de conceptualiser le cycle biogéochimique de la Si dans la partie en amont du bassin versant de l'Hermine selon six étapes : 1) dissolution de la Si cristalline suite à l'altération de la matrice silicatée des sols minéraux des versants de la section amont du bassin, 2) écoulement depuis les versants vers ZHA, par l'écoulement préférentiel rapide de la rigole amont (RA) et l'écoulement hypodermique dans les horizons minéraux lors d'un événement pluvial, 3) absorption de la Si en solution dans le sol par les végétaux monocotylédones et les microorganismes, 4) précipitation de Si cristalline en Si amorphe sous forme de phytolythes dans les tissus des plantes, de frustules pour les diatomées et de thèques pour les thécamoebiens, 5) sénescence *in situ* des végétaux riches en phytolythes et mort des microorganismes et 6) retour au sol de Si amorphe phytorecyclée dont une

partie s'accumule dans le sol, une autre est reprise *in situ* par les végétaux ou microorganismes et l'autre s'écoule dans le ruisseau. Ce circuit quasi-fermé permet à ZHA d'accumuler Si en phase solide, d'où les concentrations élevées de Si en solution. En outre, la silice amorphe est environ dix fois plus soluble que le quartz (Sigg *et al.*, 2006). Ces résultats convergent avec ceux de Struyf *et al.* (2010) qui soulignent la nécessité d'incorporer le rôle de tampon biologique des écosystèmes humides dans le cycle biogéochimique de Si. Ainsi, la source ne contribue pas à un apport substantiel d'eau, à moins qu'un écoulement superficiel pauvre en Si ne s'opère. Cet écoulement superficiel serait faiblement enrichi en Si durant un événement de pluie en raison d'un contact court ou absent avec la matrice riche en Si de ZHA. Or, sa non-contribution en Si au cours d'eau permet d'utiliser Si comme traceur pour détecter la contribution des horizons minéraux spécifiquement pour la section aval du bassin versant.

4.5.6 La variabilité spatiale de la géochimie des sols humides

Sur la base de leur géochimie, les puits des zones humides semblent s'organiser, en deux groupes selon un gradient d'humidité : les zones plus humides représentées par les puits K1, K2 et D3, et les zones moins humides représentées par les puits K3, K4, D1, D2 et D4 (**figure 3.19b**). Ces derniers possèdent une parenté géochimique avec les sources B et NP. Ainsi, la prise en compte de la variabilité spatiale dans les sols humides a permis de détecter l'existence d'un gradient d'humidité dans ces milieux et la présence de conditions réductrices qui sont cantonnées aux parties les plus humides. Les puits des sols humides ont une profondeur de 30 cm à l'exception de D1 et K4 où la profondeur atteint 80 cm. Il ne semble pas y avoir d'impact de la profondeur des puits sur le regroupement puisque les puits D1 et K4 s'apparentent aux puits peu profonds K3, D2 et D4 sur le plan de la géochimie.

4.6 Influence des sols humides lors d'un événement pluvial

4.6.1 Influence des sols humides sur la production du débit

Bien que les zones humides, ZHN et ZHA, constituent des milieux de forte convergence de l'eau, leur contribution respective à la production du débit diffère. Des indices hydrologiques montrent une contribution substantielle de ZHN-RN au début et lors du pic de crue des deux événements (**figures 3.12 et 3.13**). Dans cette zone, l'amalgame d'un niveau d'eau élevé, d'un fort gradient hydraulique et de la proximité au cours d'eau, permet la connexion quasi-permanente ZHN-RN-chenal par le biais de l'écoulement hypodermique et une connexion intermittente sous la forme d'un

écoulement épidermique de crue (**section 3.1**). L'existence du *fill and spill* comme mécanisme d'enclenchement de la connexion hydrologique ZHN-RN souligne la présence d'une dépression souterraine. La vitesse de l'écoulement de l'eau à partir de la dépression pour un profil de sol saturé, est estimée à 40 cm/h et le débit à 0,81 L/s, ce qui est environ six fois plus élevé que la vitesse et le débit de la connexion BVS qui se connecte au même endroit (**tableaux 3.7 et 3.8**). De plus, ce calcul ne tient pas compte de l'écoulement épidermique dont la vitesse est encore plus élevée. Cette dépression de sol humide joue donc un rôle important dans le transfert de l'eau du versant vers le cours d'eau. Frisbee *et al.* (2007) observent également l'existence d'un déversement à partir d'une dépression dans un bassin du Bouclier canadien. Les auteurs montrent que l'écoulement continu de cette dépression contribue à alimenter le cours d'eau même en période de sécheresse. Une étude, réalisée dans le nord-est états-uniens, soutient que la contribution des dépressions géomorphologiques est importante au maintien d'une connexion entre le haut de versant et le cours d'eau pour générer un écoulement de base (Kendall *et al.*, 1999). Dans la même région, McHale *et al.* (2002) montrent et que ces dépressions constituent d'importantes zones de mélange de l'eau du sol et de la NP du till. Dans un bassin versant de la Norvège lors d'un événement pluvial, Easthouse *et al.* (1992) exposent un modèle hydrologique dans lequel l'écoulement de base provient de la NP plus profonde d'une zone humide. Toutefois, certaines études proposent des modèles hydrologiques excluant la contribution des sols humides des dépressions comme sources potentielles en eau (Brown *et al.*, 1999; Burns *et al.*, 2001).

Pour sa part, ZHA constitue un lieu d'accumulation d'eau. De fait, la saturation de ZHA se maintient plusieurs jours après l'événement (**figures 3.12 et 3.13**) et perdure même en condition sèches (**figure 3.2a**). D'un point de vue hydrologique, sa contribution à la génération du débit lors d'un événement pluvial est difficile à cerner puisque l'exutoire de ZHA n'est pas visuellement localisable (**figures 3.12 et 3.13**). Dans le cas d'un écoulement hypodermique diffus ou circonscrit, la contribution de ZHA serait faible en raison du faible gradient hydraulique (**tableau 3.7**). Le puits F65 situé dans ZHA à l'aval de l'écoulement hypodermique du versant nord, montre un niveau de NP s'élevant au temps 23 et se rabaisant subitement quatre heures plus tard (**figure 3.26**). La présence d'une telle fluctuation suggère l'existence d'un remplissage et d'un déversement potentiellement épidermique. Ainsi, l'écoulement épidermique pourrait s'opérer mais à des vitesses faibles. Ces considérations hydrologiques suggèrent que ZHA constitue davantage un lieu de rétention d'eau et souligne la capacité de cette zone

humide à ralentir le transfert de l'eau des versants en amont vers l'exutoire lors d'événements pluviaux.

4.6.2 Influence des zones humides sur la composition chimique du cours d'eau

Les résultats hydrogéochimiques montrent que ZHN est responsable du transfert de Mn et Co lors du débit maximal (**figures 3.24a et 3.25**). L'écoulement hypodermique et épidermique de ZHN-RN contribuerait donc au débit maximal (**figure 3.13**). Le transfert de Co associé à Mn concorde avec les résultats d'Olivie-Lauquet *et al.* (2001) montrant que dans le cours d'eau, une augmentation de la concentration de Al, Cd, La, Th et U, associée à celles de Mn et Fe, est induite par la contribution d'un milieu humide réducteur. De fait, les auteurs mesurent une diminution de pH et une augmentation de MO dans ce milieu humide. À l'Hermine, les résultats géochimiques et hydrochimiques confirment la contribution en eau de la dépression ZHN à la génération du débit lors un événement pluvial. Il n'est pas exclu que d'autres dépressions souterraines dans les versants contribuent à l'augmentation de Mn et Co dans le cours d'eau. Toutefois, le faible temps de transfert de Mn et Co jusqu'à l'exutoire et la présence d'un écoulement épidermique rapide dans la rigole nord (RN) ont pu constituer des conditions idéales pour maintenir Mn et Co à l'état réduit et soluble. Le cas échéant, il est possible que les bassins versants de grandes superficies où les temps de transfert de l'eau sont plus longs, ne permettent pas le maintien de Mn et Co à l'état réduit. Ainsi, Mn et Co ne pourraient alors pas être utilisés comme traceurs pour détecter la contribution de sources réduites. Toutefois, il est admis que l'oxydation de Mn^{2+} , bien que thermodynamiquement favorable dans l'étendue de pH des eaux naturelles, est très lente, nécessitant des catalyseurs tels que des microorganismes (Sposito, 1994; Taillefert *et al.*, 2002). L'expérience en laboratoire de Morgan (2005) montre que l'oxydation de Mn^{2+} par l'oxygène en solution à 25° C nécessite de 350 jours à 1 journée pour des pH respectifs de 8 et 9,3. Bien que O_2 soit considéré comme un puissant oxydant, il réagit souvent lentement avec le substrat en raison de limitations cinétiques (McBride, 1994). Toutefois, l'oxydation biologique de Mn^{2+} s'avère plus rapide que l'oxydation géochimique (Bargar *et al.*, 2000). À la lumière de ces informations, il est possible que l'utilisation de Mn et Co s'avère utile, en particulier dans de petits bassins versants, pour détecter la contribution en eau des dépressions humides des versants à l'échelle événementielle.

Au plus fort de l'événement 2010, la contribution hydrogéochimique de ZHA est faible telle qu'en témoignent les graphiques de mélange (**figure 3.24a et b**) qui illustrent un écart substantiel entre la chimie du cours d'eau et les concentrations élevées en Si et Sr de ce sol humide. Toutefois, on soupçonne l'existence d'une contribution potentielle de ZHA vers la fin de l'événement, au temps 27, par un apport en As, Se et V dans le cours d'eau. Une étude réalisée dans un cours d'eau du bassin du Wisconsin comprenant des milieux humides, montre que les éléments dissous sensibles aux processus d'oxydoréduction sont Fe, Mn et SO_4^{2-} et que ces derniers semblent constituer des facteurs de contrôle sur les métaux ayant des formes anioniques tel que As, Cr, Mo, U et V (Kerr *et al.*, 2008). L'augmentation subite de la concentration en As, Se et V dans le ruisseau n'est toutefois pas concomitante à une augmentation substantielle de Si ou Sr qui signent ZHA. Il est possible d'expliquer cette situation par la présence d'un écoulement épidermique de ZHA vers le ruisseau suite à un apport d'eau soudain en provenance du versant nord (**figure 3.26**). L'eau de surface de ZHA ne serait donc pas enrichie en Si et sa chimie s'apparenterait plutôt à un mélange de l'écoulement épidermique organique de la rigole amont, de l'écoulement hypodermique minéral provenant de l'amont du bassin et de l'eau de la pluie incidente. En outre, les faibles concentrations en COD de ZHA, comparativement à celles de LFH des sols bien drainés, contribueraient à ne pas générer une hausse de COD dans le cours d'eau au temps 27, malgré l'écoulement épidermique de ZHA. Dans le cas où l'écoulement soudain proviendrait d'un mécanisme de *fill and spill* sur le versant nord, une autre source riche en ces éléments pourrait être à l'origine de cet apport. Cette hypothèse d'un transfert rapide de l'eau à la surface du milieu humide ZHA trouve un écho dans les travaux de Devito *et al.* (1996) qui affirment que le mouvement de l'eau dans les milieux humides du Bouclier canadien est restreint à la surface puisque l'eau des versants arrive dans les premières couches de la tourbe. Il reste difficile de cibler exactement la source de ces anions, soit arsenate, vanadate et selenate, d'autant plus qu'il n'existe pas de collecteurs pour mesurer la géochimie de l'amont du versant nord et de la surface du ZHA. Dans le bassin de l'Hermine, Thériault (2008) montre une hausse substantielle de As et V après le maximum du débit. De fait, cette étude montre que As et V ne présentent pas une corrélation positive avec COD, et l'auteur soulève l'hypothèse que ces éléments soient indicateurs de la contribution hydrologique ponctuelle d'une région du bassin où des conditions réductrices prévalent. En outre, L'Heureux *et al.* (2010) montrent cette même augmentation pour As, Se et V pour

l'événement automnal de l'année 2009. Ainsi, ces autres résultats suggèrent que cette augmentation n'est pas exclusive à l'événement pluvial 2010.

L'apport des éléments Cr, Cu, Fe, Ni et Zn dans le cours au temps 26, pourrait provenir de ZHN tel que le montre l'élévation de la NP dans ZHN au temps 23 (**figure 3.26**) et l'augmentation concomitante des éléments Cr, Cu, Fe, Ni et Zn dans le puits D2 du ZHN (**figure 3.20a**). Il est difficile d'interpréter une hausse aussi subite et localisée de ces éléments dans le ZHN alors que les autres puits ne montrent pas cette augmentation. L'écoulement le plus plausible pour expliquer cet état de fait consiste en un écoulement de surface dans ZHN-RN à l'instar de celui mis en lumière pour ZHA. Il est possible qu'un écoulement de surface se soit opéré suite à un apport en eau soudain dans ZHN-RN provoquant un écoulement épidermique dans RN constitué d'un amalgame d'eau de pluie, d'eau des horizons minéraux en amont et d'eau de ZHN. Ainsi, le puits D1, situé à l'exutoire de ZHN et qui présente la plus grande profondeur, n'aurait pas permis l'échantillonnage de l'écoulement superficiel et donc n'aurait pas enregistré l'augmentation des éléments sidérophiles. Cette interprétation est spéculative puisque la hausse de ces éléments ne dure qu'une heure.

À l'Hermine, la CP2 de l'ACP de l'hydrochimie du ruisseau, formée entre autres par Mn, incarne les processus d'oxydoréduction. Ces processus expliqueraient que 20 % de la variation des éléments dissous. Ces résultats convergent avec ceux de Kerr *et al.* (2008) qui trouvent que les processus d'oxydoréduction constituent un facteur de contrôle de deuxième importance sur les concentrations en ET après le COD. Abesser *et al.* (2006) constatent également à l'aide de l'analyse factorielle, que Mn et Fe contribuent à la CP2, ce qui relègue l'influence des processus d'oxydoréduction dans le bassin versant sur la chimie du cours d'eau au deuxième rang après l'écoulement dans les horizons organiques.

4.7 Impact de l'écoulement hypodermique sur l'exportation du COD et des éléments traces lors d'un événement pluvial

4.7.1 Distribution spatiale des éléments dans les diverses sources en eau

Les concentrations en COD dans les différentes sources à l'Hermine sont similaires à celles trouvées par Hinton *et al.* (1998) pour deux bassins versants du Bouclier canadien. Ces auteurs montrent que l'écoulement de l'eau dans la litière présente les plus fortes concentrations en COD alors que les milieux humides et l'horizon B présentent respectivement des concentrations moyennes et faibles. À l'Hermine, pour un

profil de podzol bien drainé, la solution de sol des horizons LFH constitue la source contenant les plus grandes concentrations en COD et en ET (**tableau 3.11**). Les extractions à l'eau des ET en laboratoire réalisées par Masse (2011) à l'Hermine, montrent aussi que la majorité des ET se situent dans les horizons organiques. Il est admis que les horizons organiques des sols forestiers constituent des puits en ET puisque la MO possède une forte capacité d'échange cationique et un fort potentiel à former des complexes organo-métalliques (Bergvist *et al.*, 1989; Räisänen *et al.*, 1997; Suchara et Sucharova, 2002). Les concentrations élevées en ET et l'absence de variabilité temporelle dans les solutions de sol des horizons LFH durant l'événement de pluie 2010, montrent que ces horizons peuvent contribuer significativement au relâchement des ET en conditions humides.

Les solutions de sol des horizons B et la NP recèlent de faibles concentrations en COD et en ET ce qui témoigne d'une faible quantité d'ET dans ces horizons ou de la forte adsorption de ces derniers sur les sites d'échange. Or, au cours d'un écoulement vertical de l'eau dans un profil de sol, la matrice minérale peut agir comme un puits pour les ET ou constituer un simple lieu de transit vers les horizons plus profonds, sans possibilité d'adsorption. En outre, l'accumulation de Fe et Al sous la forme d'oxydes dans l'horizon B podzologique génère une charge de surface positive qui repousse les ET cationiques.

4.7.2 Relation entre le débit, le COD et les éléments traces dans le cours d'eau

Lors de l'événement de pluie 2010, le maximum de variation des ET est concomitant avec celui de COD. L'interprétation de l'ACP de l'hydrochimie du cours d'eau suggère que 40 % de la variation des éléments est induite par le passage de l'eau dans les horizons riches en MO générant une augmentation de COD (**figure 3.23**). L'observation des angles entre les éléments de l'ACP de la **figure 3.23**, permet de constater que les éléments qui présentent des corrélations positives fortes avec COD sont Ba, Ce, Co, H⁺, Mn, Rb et Zn. Des corrélations de moyenne puissance sont observées pour Cd, Cr, Cu, Fe, Ni et Pb. Il est admis que la hausse du débit coïncide avec une augmentation de la concentration en COD et H⁺ (Bishop, 1990). À l'Hermine, le maximum de variation de COD et des éléments corrélés précède d'environ une heure le maximum de débit qui est synchrone aux concentrations maximales en Cd, Mn, Co et H⁺. Nos résultats convergent avec ceux de Sherrell et Ross (1999) et Shafer *et al.* (1997), qui montrent que dans un cours d'eau d'une pinède du New Jersey, les éléments Al, Cd, Cu, Pb et Zn sont

positivement corrélés au débit. Huang *et al.* (2010) exposent une corrélation positive entre Cd, COD, Cr, Cu, H⁺, Ni, Zn et le débit induite par un écoulement superficiel lors d'événements de précipitations intenses dans un bassin versant forestier en Allemagne. L'étude de Biron *et al.* (1999) à l'Herminie, montre que le maximum de COD arrive 1,5 heure avant le débit maximal pour un événement dont les conditions antécédentes d'humidité (CAH) sont faibles. Cette valeur passe à 7,25 heures pour des CAH élevées. Bien que les CAH soient élevées pour l'événement 2010, le comportement de COD s'apparente à celui observé sous des CAH faibles par Biron *et al.* (1999). Tel que le montre le graphique de mélange à la **figure 3.24a**, le maximum de COD est induit par le passage de l'eau dans les horizons LFH. Ainsi, le maximum de concentration des ET proviendrait également de cet écoulement organique.

4.7.3 Distribution spatiale des horizons LFH saturés par la nappe phréatique

L'évolution des concentrations en COD et en plusieurs ET dans le ruisseau montre un pic initial suivi d'une augmentation substantielle concomitante au débit maximal (**figure 3.22**). En début d'événement, le patron spatial des horizons LFH saturés par la nappe phréatique et connectés au cours d'eau, est restreint à ZHN-RN. Le déversement de l'eau de ZHN, dans les horizons LFH de la rigole nord, semble être à l'origine de l'augmentation initiale de COD et des ET dans le cours d'eau. Un tel phénomène est observé par Creed et Band (1998) pour un site du Bouclier canadien, qui montrent l'existence d'un lessivage de NO₃⁻ à partir des horizons de surface lorsque la NP est suffisamment élevée dans les dépressions qui se déversent. Notre étude appuie donc l'importance de l'activation des dépressions dans la mise en branle de la connectivité hydrologique et du transfert de COD et des ET vers le cours d'eau. De fait, c'est la portion superficielle des dépressions, là où la conductivité hydraulique est forte et le contenu en ET élevé, qui se déverse lors de la mise en connexion des zones saturées sur le versant.

Le raccordement des horizons LFH du bas de versant sud (BVS) au cours d'eau est synchrone au maximum de COD dans le cours d'eau (**figure 3.25**). Il est peu probable que la saturation des horizons LFH à l'endroit des haut de versant sud et nord (HVS et HVN) contribue à l'exportation de COD en raison de l'absence d'écoulement dans les horizons organiques entre ces zones isolées et le cours d'eau (**figure 3.25**). Par ailleurs, un écoulement d'eau riche en COD dans l'horizon B, qui constitue un puits de COD (Lazerte et Scott, 1996), se conclue plutôt par l'adsorption de COD par la matrice

minérale riche en oxydes de Fe avant que le COD n'atteigne le cours d'eau (Fiebig *et al.*, 1990). Le raccordement des horizons LFH entre ZHA et BVS (**figure 3.25**), est aussi peu plausible en raison de la topographie. Cet état de fait peut être induit par un biais de l'interpolation qui ne tient pas compte de la topographie de surface ou souterraine à cet endroit précis. À la lumière de la discussion sur la contribution en eau de ZHN à la **section 4.6**, il est raisonnable d'affirmer que l'impact de la connexion des horizons LFH de ZHA sur l'hydrochimie du cours d'eau est faible lors du débit maximal.

En somme, la distribution spatiale des zones qui contribuent à augmenter le COD dans le cours d'eau semble se restreindre à deux zones de connexion hydrologique, d'une part, ZHN-RN, et d'autre part, le bas de versant sud (BVS). Ces deux raccordements « organiques » occupent une faible portion de la zone riveraine et des versants mais génèrent un maximum de concentration en COD dans le cours d'eau. De fait, la **figure 4.1** illustre que la majorité des puits de la zone riveraine au temps 3, détecte une zone saturée atteignant les horizons B podzoliques contrairement à la connexion BVS qui présente des horizons organiques saturés. Ces résultats diffèrent de ceux de McGlynn et McDonnell (2003) et Fiebig *et al.* (1990) qui montrent une contribution substantielle de la zone riveraine à l'apport de COD dans le cours d'eau. Une étude réalisée dans le Bouclier canadien souligne la forte participation de la zone riveraine sur l'exportation de COD pour un bassin versant de faible pente et d'importante épaisseur de sol (Hinton *et al.*, 1998). Cette même étude montre un faible apport de COD de la zone riveraine pour un bassin versant de forte pente et de faible épaisseur de till. Pour ces auteurs, une faible pente permet un écoulement lent et une élévation de la NP dans les horizons de surface enrichis en COD. Une épaisseur de sol plus faible où la conductivité hydraulique est élevée génère un drainage rapide sans contact avec les horizons riches en COD. À l'Hermine, l'indice topographique ne joue pas un rôle significatif (**figure 3.2**) alors que l'épaisseur de sol pourrait constituer un facteur explicatif important mais contraire à celui de Hinton *et al.* (1998). Ainsi, deux facteurs indépendants ou complémentaires semblent décisifs dans le transit du COD à l'Hermine. Dans un premier temps, il est possible que l'épaisseur de sol de la zone riveraine soit plus grande que celle des versants et que l'accumulation de l'eau ne soit pas assez considérable pour élever la NP dans les horizons de surface pour le type d'événements étudiés ici. La deuxième hypothèse à privilégier est que le drainage préférentiel de l'eau dans les zones de convergence se fasse aux dépens de l'accumulation de l'eau dans la zone riveraine.

L'eau atteint donc les horizons LFH de la zone riveraine seulement à l'endroit des convergences ZHN-RN et BVS (**figure 3.25**). L'exportation de COD provenant des horizons LFH de la zone riveraine serait donc gênée par la présence des zones de convergence.

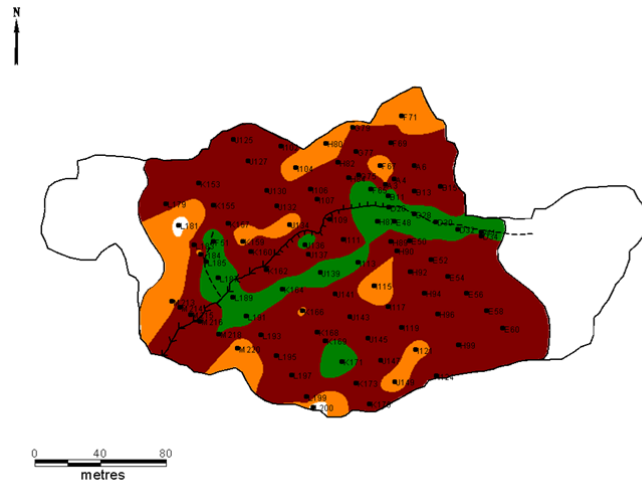


Figure 4.1 : Patron pédohydrologique du temps 3 issu de la **figure 3.25**. Les cercles noirs représentent les puits.

Il est également possible que les horizons B podzoliques contribuent à l'augmentation de COD dans le cours d'eau en raison de leur large contribution spatiale (**figure 3.8**). Néanmoins, l'existence d'un écoulement plus lent dans l'ensemble de la zone riveraine que dans les zones de convergence suggère que la contribution en COD dans le cours d'eau lors de la pointe de la crue d'un événement pluvial est induite par l'écoulement hypodermique rapide dans les horizons LFH des zones de convergence connecté au cours d'eau. Un tel écoulement constitue un facteur de transfert rapide des ET vers les milieux aquatiques. Par ailleurs, il n'est pas exclu que les autres sources puissent aussi contribuer à l'exportation du COD, à une moindre concentration, avant la crue ou lors de la décrue. Tout changement climatique et/ou hydrologique qui peut influencer la position de la NP dans le sol, constitue donc une variable importante dans la prédiction du transit des ET, d'origine naturelle ou anthropique, accumulés dans les horizons LFH.

4.8 Synthèse du modèle d'écoulement à l'Hermine lors d'un événement

À l'Hermine, il est possible d'identifier une signature géochimique stable à l'échelle événementielle pour les différentes sources potentielles en eau. Le modèle d'écoulement de l'eau lors d'un événement pluvial intense dont les CAH sont élevées, est composé de trois sources, soit les horizons LFH, les horizons B et la NP, et finalement une dépression de sol humide dans le versant (ZHN). La mise en lumière de la contribution d'un sol humide de dépression à la production du débit et à la variation des concentrations en ET à l'exutoire du cours d'eau, constitue un apport important de cette recherche. De fait, peu d'études intègrent les sols humides des versants dans leur modèle hydrologique d'écoulement des sources (Easthouse *et al.*, 1992; Kendall *et al.*, 1999; McHale *et al.*, 2002; Frisbee *et al.*, 2007). Nous proposons ici une synthèse de la contribution des trois sources en eau à l'Hermine lors d'un événement pluvial.

4.8.1 La contribution des sols humides d'une dépression sur le versant

Les sols humides à l'Hermine constituent des zones où des conditions réductrices prévalent tels qu'en témoigne les faibles concentrations en oxygène dissous, les concentrations élevées en accepteurs d'électrons alternatifs, soit Fe et Mn, et la présence concomitante de concentrations élevées en COD et de faibles concentrations en H^+ . Dans les sols humides, les facteurs explicatifs des éléments traces sont Mn, Fe, COD et H^+ . L'élément Mn est associé à Ce, Co, Rb et Y tandis que COD et Fe sont surtout associés à Cr, Cu, Ni et Zn. Le COD est associé à As, Ba, Ce, Cr, Ni, Pb, Se et Y pour la zone humide ZHA. Toutefois, les deux zones humides à l'Hermine sont différentes sur le plan de la géochimie et de l'hydrologie. Alors que ZHN se caractérise par une influence significative de Mn sur la variation des concentrations en ET et par un comportement hydrologique permettant une réoxygénation du profil de sol, la zone humide ZHA s'en différencie par l'influence significative de COD sur les concentrations en ET, par les faibles amplitudes de fluctuations de NP et par les concentrations élevées en Si amorphe issue du recyclage biologique.

La contribution des deux sols humides à la production du débit est également différente. La zone humide ZHN constitue le lieu de départ d'un raccordement hydrologique qui s'enclenche par le mécanisme du *fill and spill* et se connecte au cours d'eau par un écoulement hypodermique rapide à l'endroit de la rigole nord. La zone humide ZHA, plus vaste et donc de plus grand volume que ZHN, constitue une zone tampon où l'accumulation de l'eau gêne l'écoulement de l'eau des versants à l'amont du bassin

versant vers le cours d'eau. Sur le plan hydrochimique, ZHN contribue à un apport en Co et Mn lors du débit maximal alors que ZHA semble peut-être contribuer à l'apport de As, Se et V vers la fin de l'événement. Le maximum de superficie du raccordement hydrologique de ZHN-RN au cours d'eau, est restreint spatialement, mais son activation maximale est synchrone au pic de débit, ce qui suggère un transit d'eau important dans cette dépression de versant. En somme, l'influence de la zone humide de dépression sur le versant (ZHN) est importante sur la production du débit de crue et sur la variation des concentrations en ET. Le rôle de l'activation de ZHN sur la chimie du cours d'eau se situe au deuxième rang après celui des horizons organiques.

4.8.2 La contribution des horizons organiques

Les horizons LFH constituent le puits le plus importants en COD et en ET dans le bassin de l'Hermine. Ils représentent la source la plus importante de relâchement des ET dans le cours d'eau lors d'un événement de pluie. La distribution spatiale maximale des horizons organiques saturés lors de l'événement de pluie 2010 représente une faible portion de la superficie du bassin versant et est restreinte à deux zones de connexions hydrologiques qui se raccordent à la zone riveraine. Ces résultats diffèrent des autres études qui montrent une contribution des horizons organiques sur toute la longueur de la rive du cours d'eau. La connexion maximale des horizons organiques est concomitante au pic de concentration du COD qui est corrélé positivement avec Ba, Ce, Co, H⁺, Mn, Rb et Zn. Ce maximum de concentration en COD et d'ET arrive une heure avant le débit maximal. Ainsi, l'écoulement hypodermique rapide dans les horizons LFH, initié par un mécanisme de transmissivité rétroactive positive, permet une contribution importante des horizons organiques sur la production du débit de crue et sur le pic de concentration en ET à l'Hermine.

4.8.3 La contribution des horizons B et de la nappe phréatique

Les sources B et NP recèlent les plus faibles concentrations en COD et en ET. La distribution spatiale des horizons B et de NP saturés, tout au long de l'événement, occupe la plus grande superficie du bassin versant. Leur contribution semble importante lors de la montée de la crue et lors de la décrue de l'événement lorsque le niveau de connectivité hydrologique n'est pas maximal. Ces horizons minéraux de sols bien drainés sont responsables de l'augmentation des concentrations en Si, CE et Sr, au début de l'événement.

4.9 Utilisation des éléments traces et recommandations

4.9.1 Recommandation pour l'échantillonnage de terrain

Bien que nos données soient récoltées selon les règles de l'art, d'autres mesures pourraient être mises en place lors de la collecte de terrain. De fait, dans un contexte de dosage d'éléments ultra-traces, il serait nécessaire d'utiliser le protocole « main sales, mains propres » (St. Louis *et al.*, 1994). Ce protocole consiste en ce que deux personnes gantées se lavent vigoureusement les mains avec l'eau à échantillonner. Seulement une personne « mains propres » peut toucher à l'intérieur du sac et manipuler la bouteille alors que l'autre personne « mains sales » peut toucher l'extérieur du sac et s'occupe de libeller et de manutentionner le sac. Dans notre contexte, la personne « mains propres » installerait la bouteille sur la pompe alors que l'autre « mains sales » manipule également la pompe péristaltique. Ce protocole sert à réduire les risques de contamination sur le terrain. Dans le cas de l'extraction des solutions de sol des lysimètres et de l'extraction de l'eau de la nappe phréatique des puits profonds des zones humides et des zones terrestres bien drainées, il faudrait se conditionner les mains avec l'eau issue du conditionnement de la pompe péristaltique. Bien que nous préconisons l'utilisation de ce protocole « main sales, mains propres » dans un contexte de mesure d'éléments ultra-traces, nous soulignons que cette méthode pourrait être réalisée sans la partie de lavage des mains avec l'eau de la source dans le cas d'analyse de mesures d'éléments majeurs. Aussi, certaines réalités sur le terrain peuvent rendre difficile son application intégrale telles que l'importance de ne pas être deux personnes à proximité du puits afin de limiter le piétinement et la perturbation de la surface du sol. Dans tous les cas, les personnes qui échantillonnent devraient être gantées pour le dosage d'éléments ultra-traces.

Dans un contexte d'échantillonnage d'éléments ultra-traces, traces et majeurs, il serait aussi pertinent d'ajouter des blancs de terrain, une pratique systématique réalisée lors de notre travail en laboratoire dans cette étude. L'échantillonnage d'un blanc de terrain pourrait être réalisé à l'aide d'une bouteille remplie d'eau ultra-pure déionisée de laquelle on extrairait un échantillon d'eau avec la pompe péristaltique après avoir conditionné cette dernière et la bouteille. Ce blanc de terrain pourrait être échantillonné une fois pour chaque source en eau potentielle. Cette précaution constituerait un bon moyen de valider la non contamination lors de l'échantillonnage d'autant plus que ce dernier s'est réalisé majoritairement sous la pluie.

4.9.2 Approche exploratoire du traitement des valeurs

À la **section 3.2.1** portant sur le traitement des valeurs hydro et géochimiques, il a été question de considérer une valeur même si elle était sous la limite de détection (sld) dans le cas où il y avait moins de 50 % de valeur sld. La raison sous-jacente pour légitimer une telle considération consistait en ce que notre approche était exploratoire. Bien que cette méthode puisse être considérée comme imprudente, nous observons que les variations des valeurs de As et Se, dans le cours d'eau, dont 50 % sont sld, sont similaires à celles de V, dont les valeurs sont au-dessus de la limite de détection. De fait, As, Se et V forment un groupe d'éléments dont le comportement se ressemble, ce qui a été mis en lumière également par Thériault (2008) et L'Heureux *et al.* (2010) pour deux autres événements différents. Ainsi, nous constatons que notre méthode de remplacement de valeurs sld a permis de : 1) détecter le même groupe As, Se et V que d'autres études et 2) réaliser qu'il serait pertinent d'utiliser une méthode analytique dont la limite de détection est plus basse afin de s'assurer une mesure adéquate des faibles valeurs.

Dans la même **section 3.2.1**, nous indiquons le maintien des valeurs qui pourraient être jugées « anormales » dans les analyses. Nos résultats montrent qu'il a été utile et pertinent de maintenir ces valeurs pour deux raisons principales : 1) la hausse drastique et substantielle de As, Se et V dans le cours d'eau vers la fin de l'événement, d'apparence « anormale », s'avère réelle en raison de résultats antérieurs similaires et 2) la hausse substantielle de Cr, Cu, Fe, Ni et Zn dans le cours d'eau au temps 26 est concomitante à une ré-augmentation hydrologique et une augmentation des mêmes éléments dans un puits de ZHN, ce qui suggère que ces hausses ne constituent pas une erreur analytique ou de contamination. Le **tableau 4.1** permet de comparer des concentrations en éléments dissous d'autres bassins versants, en majorité similaires au bassin versant de l'Hermine, à celles obtenues pour cette étude lors de l'événement pluvial 2010. Nous observons que les concentrations sont similaires ou inférieures aux concentrations trouvées dans la littérature. En somme, notre approche *a priori* non conservatrice du traitement des données s'est avérée porteuse d'information nouvelle dans ce contexte d'exploration du potentiel des éléments traces comme traceurs géochimiques.

Tableau 4.1 : Comparaison entre certaines concentrations en éléments dissous de différents compartiments d'autres bassins versants et celles du bassin versant de l'Hermine lors de l'événement pluvial 2010. Les concentrations sont exprimées en µg/L.

Bassin versant, région (référence)	Compartiment, description du bassin versant (sol)	Concentration des éléments dissous	Étude présente Hermine (2010)
Plastic Lake-1, Bouclier canadien, Ontario (Watmough <i>et al.</i> , 2007)	Cours d'eau intermittent d'un bassin versant forestier (podzol)	Min-Max Mn = 60-145	Min-Max Mn = 5-35
Dickie, Harp, Paint, Bouclier canadien, Ontario (Peter et Evans, 1986)	13 cours d'eau de bassins versants forestiers (brunisol et podzols)	Moyenne Cd = 0,21 Cu = 0,22 Pb = 0,45	Moyenne Cd = 0,03 Cu = 0,33 Pb = 0,04
Experimental Lakes Area, Bouclier canadien, Ontario (Allan <i>et al.</i> , 1993)	Solution de sol de l'horizon C de 5 bassins versants forestiers (régosols et brunisols)	Moyenne Si ^b = 4,9 Fe = 600	Moyenne Si ^b = 3 Fe = 3
Petit Hermitage, Bretagne, France (Gruau <i>et al.</i> , 2004)	Nappe phréatique d'un milieu humide d'un bassin versant agricole (nd ^a)	Min-Max Mn = 405-3593 Ce (1,7-6,3)	Min-Max Mn = 1-496 Ce = 0,009-1
Strengbach, Vosges, France (Ladouche <i>et al.</i> , 2001)	Cours d'eau intermittent d'un bassin versant forestier (podzol)	Min-max Ba = 50,2-82,1 Rb = 1,5-2,2 Sr = 8,6-13,3	Min-Max Ba = 5,6-11 Rb = 0,32-0,73 Sr = 13,2-16,9
Trout Lake (cours d'eau Allequash), Wisconsin, États-Unis (Kerr <i>et al.</i> , 2008)	1 cours d'eau d'un bassin versant forestier et milieux humides (nd)	Médiane Ce = 0,03 Co = 0,02 Cr = 0,3 Ni = 4 Y = 0,01 Zn = 0,2	Min-max Ce = 0,04-0,2 Co = 0,05-0,17 Cr = 0,08-0,1 Ni = 0,23-0,49 Y = 0,13-0,31 Zn = 3,5-8,7

^and = non disponible.

^b = concentration en mg/L.

4.9.3 Potentiel de traçage hydrologique des éléments traces à l'Hermine

Notre conclusion, est similaire à celle de Dia *et al.* (2000) qui concluent que les terres rares et les éléments traces constituent de bons outils hydrologiques en dépit de leur caractère non conservateur puisqu'ils ont la capacité d'identifier clairement les différents compartiments hydrologiques. L'utilisation des éléments traces comme traceurs géochimiques naturels s'avère risquée en raison de leur haute réactivité à l'égard des conditions d'oxydoréduction, de pH et de la matière organique tel qu'il a été montré dans cette recherche. Toutefois, l'amalgame de mesures hydrologique et

géochimique de cette étude, montre que pour les écoulements latéraux de l'eau dans un même compartiment, les ET peuvent présenter un caractère « conservateur ». À l'instar du COD, certains ET qui proviennent des horizons organiques ont vu leur concentration augmenter dans le cours d'eau probablement induite par la non adsorption tout au long du cheminement. Ce mécanisme est d'autant plus vrai lorsque la connexion au cours d'eau est directe. De plus dans le cas d'écoulements épidermiques, observés pour RN, RA et potentiellement pour ZHA, il est plausible que les éléments se rendent au ruisseau sans interaction avec la matrice de sol. De fait au **tableau 3.10** on remarque que les concentrations du débordement ZHN sont similaires à celle de l'eau de la matrice de ZHN. Néanmoins, ces échantillons ont été pris à l'exutoire de ZHN alors que la chimie pourrait changer lors de l'arrivée de l'écoulement épidermique au ruisseau en raison de l'existence de conditions plus oxydantes. En outre, des interactions dans le cours d'eau peuvent s'opérer. En somme, notre étude montre que certains éléments traces constituent de bons traceurs pour détecter l'activation des connexions hydrologiques dont l'écoulement s'opère dans les horizons organiques (Ba et Zn), des dépressions de sols humides de versants soumises au processus du *fill and spill* (Mn et Co), de l'élévation diffuse de la NP dans les horizons minéraux oxydé (Si et Sr) et de zones humides par écoulement de surface (As, Se et V).

Chapitre 5 CONCLUSION

L'objectif global de cette recherche était d'améliorer la compréhension des mécanismes contrôlant l'écoulement de l'eau et la production des débits de crue dans un petit bassin versant forestier. Nos résultats issus d'une large gamme d'analyses, tant univariées que multivariées, confirment l'existence de certains types d'écoulement bien détaillés dans la littérature et encore peu connus. En outre, ils remettent en question certains postulats de base en hydrologie.

À l'objectif 1, il a été possible de détecter et spatialiser des hydrotopes sur la base d'un gradient allant de forte convergence à forte divergence de l'eau. Les zones de moyenne et forte convergence ne sont pas situées exclusivement dans la zone riveraine mais se situent surtout sur les versants. Ces résultats suggèrent qu'il n'est pas approprié d'utiliser le traditionnel couple d'hydrotopes, soit la zone riveraine et les versants, pour prédire le comportement hydrologique dans ce bassin versant du Bouclier canadien. Cet apport de notre recherche remet en question l'influence du transit de l'eau dans la zone riveraine sur l'hydrochimie du cours d'eau. La présence d'hydrotopes de forte convergence dans les versants met en exergue l'hétérogénéité du comportement hydrologique sur les versants, ce qui concorde avec l'idée de raccordement hydrologique entre un haut de versant et le bas de versant. La détection d'une diversité d'hydrotopes à l'Hermine et l'influence significative des distances aux limites du bassin versant sur le comportement de la nappe phréatique permettent de rejeter l'hypothèse de l'état stable de la nappe phréatique. À la lumière de ces résultats, qui montrent l'existence d'une diversité de comportements de la zone saturée, nous préconisons l'utilisation d'une méthode basée sur la détection des unités hydrologiques réelles plutôt que sur une segmentation entre la zone riveraine et les versants.

Nos résultats ont aussi permis de mettre en lumière que la transmissivité rétroactive positive de la nappe phréatique est à l'origine de l'existence d'un écoulement hypodermique latéral rapide dans les horizons Bhf et LFH. Ce type d'écoulement est de plus en plus considéré dans les études récentes et particulièrement dans les horizons de surface des tills glaciaires qui possèdent une plus grande conductivité hydraulique à saturation. L'existence d'horizons plus transmissifs en surface a des conséquences importantes sur le débit et l'hydrochimie à l'exutoire du cours d'eau et permet d'interpréter les patrons spatiaux de hauteur de la nappe phréatique en terme de connectivité hydrologique. L'originalité du dispositif expérimental, soit la haute densité

de puits, a permis de confirmer l'existence d'un état de connectivité de la zone saturée à l'Herminie. Cet apport est substantiel en hydrologie puisque la connectivité constitue un état hydrologique encore difficile à mesurer. Lors de deux événements de pluie dont les conditions d'humidité antécédentes diffèrent, la distribution spatiale des hauteurs de nappe phréatique dans le sol est similaire. On détecte des chemins préférentiels d'écoulement hypodermique rapide pour cinq zones sur les versants. Ces patrons spatiaux se collent à ceux des hydrotopes de moyenne et forte convergence. Cette correspondance entre les hydrotopes et les zones de connexions concourent à détecter les caractéristiques de la connectivité hydrologique. Nous croyons qu'une de ces caractéristiques, soit les relations NP/Q dont les coefficients de Spearman sont élevés dans la partie aval des zones de connexion, pourrait constituer un outil approprié de détection de la connectivité hydrologique. De fait, l'utilisation de cet outil nécessite la mise en place de puits en bas de versant là où les raccordements hydrologiques se jettent. Cette considération est importante puisque nous savons que cette haute densité de puits n'est reproductible que pour de petits bassins versants et qu'elle n'est pas adaptée, d'un point de vue pragmatique, pour les grands bassins versants. Pour sa part, le débit reste une valeur relativement facile à acquérir sur le terrain

Il existe une concomitance entre la connectivité hydrologique maximale et le pic de débit. Ainsi, ce synchronisme semble attribuable à 1) l'élévation de NP dans les horizons de plus haute conductivité hydraulique et de plus haut pourcentage de saturation en eau qui génère respectivement une augmentation de la vitesse et du débit d'écoulement souterrain et 2) l'élévation de NP au-delà d'un seuil qui permet un déversement préférentiel nommé *fill and spill*. L'existence du mécanisme du *fill and spill* met en lumière l'influence de la topographie souterraine sur l'écoulement de l'eau. Les facteurs d'influence de l'écoulement de l'eau et de la production de débit ne relèvent pas de la topographie de surface ni de la distance au cours d'eau ce qui diffère des présupposés des modèles hydrologiques actuels. De fait, le comportement de NP dans le bassin versant est principalement influencé par la distance aux limites du bassin, par l'horizonation du sol et la topographie souterraine. Ces résultats convergent avec ceux des études réalisées dans le Bouclier canadien.

L'objectif 2 a permis de mettre en exergue que les zones humides de l'Herminie se caractérisent par l'existence de conditions réductrices. Dans un contexte d'analyse des ET, le dosage de COD, Fe, H⁺ et Mn dans les sols humides devrait être réalisé systématiquement puisque ces éléments constituent des facteurs explicatifs de la

variation de la concentration des ET. La présence potentielle de biorecyclage de Si amorphe dans un des sols humides constitue une particularité qui mériterait d'être investiguée plus en profondeur afin de confirmer nos hypothèses sur le cycle de Si dans ZHA. L'objectif 2 a permis de mettre en évidence l'existence, au sein des sources, d'une variabilité spatiale plus élevée que la variabilité temporelle ce qui permet de distinguer les sources durant un événement pluvial. En somme, les résultats de cet objectif soulignent l'importance de ne pas négliger le rôle de la végétation et des conditions hydriques d'un sol bien drainé ou humide dans la détermination de sa signature géochimique.

La contribution spatio-temporelle respective des sources en eau du bassin lors d'un événement pluvial dont les CAH sont élevées va comme suit (objectif 3): 1) l'écoulement de base provient d'un écoulement diffus dans les horizons B et NP et d'un écoulement circonscrit de ZHN, 2) le débit maximal est généré par le déversement circonscrit de ZHN et l'écoulement hypodermique rapide dans les horizons LFH des zones ZHN-RN et BVS et 3) l'eau de la décrue provient de l'écoulement dans les horizons minéraux des zones de connexion hydrologique et d'un apport subit et court sur le versant nord. Nous croyons que la spatialisation des horizons saturés par la nappe phréatique constitue une approche pédohydrologique utile pour saisir l'influence, sur le plan horizontal, des horizons des sols, sur la chimie du cours d'eau. Ainsi, ce modèle hydrologique tripartite composé d'horizons B et NP bien drainé, d'horizons organiques et de zones humides, recèle un élément de nouveauté en hydrologie. De fait, il détecte la contribution des zones humides à la production du débit et à la variation des concentrations en éléments dissous. Ces résultats soulignent que le sol humide de la dépression sur le versant nord contribue substantiellement à la production du débit et à la variation des éléments dissous dans le cours d'eau. ZHN est actif du début à la fin de l'événement et son écoulement hypodermique et épidermique contribue à l'augmentation concomitante de Mn et Co lors de la pointe de crue. Nos résultats confirment que les débordements des dépressions sur les versants peuvent générer des écoulements préférentiels menant à une contribution en éléments associés aux milieux réducteurs. En outre, nos résultats confirment la contribution mieux connue des horizons LFH qui constituent la principale source en COD et ET des sols bien drainés. La superficie des horizons LFH qui contribue à l'augmentation de COD dans le cours d'eau est faible et se restreint à deux zones de connexion hydrologique sur les versants correspondant aux hydrotopes de convergence moyenne et forte. Ce résultat confirme la

remise en question de l'influence géochimique de la zone riveraine sur l'hydrochimie du cours d'eau. Les modèles hydrologiques actuels mettent plutôt de l'avant que la zone riveraine contribue à l'apport de COD dans le cours d'eau. Nos résultats montrent plutôt que les zones de connexions hydrologiques sur les versants qui en sont les principaux responsables. Toutefois, il serait utile de mesurer la NP dans la zone riveraine pour des conditions plus humides, par exemple pour une crue printanière, afin de constater si la NP s'élève dans les horizons LFH de l'ensemble de la zone riveraine.

Dans l'ensemble, nous croyons qu'une contribution importante de cette recherche est d'avoir montré l'existence d'un raccordement hydrologique sur le versant par le truchement d'un débordement d'une dépression de sol humide. Cet écoulement a été détecté par des mesures hydrométriques et par le dosage des ET. Un autre point névralgique de notre recherche est que la mesure des concentrations en ET a contribué à détecter l'écoulement dans les horizons organiques et les sols humides. Néanmoins, la principale contribution des ET a été de permettre la distinction de l'écoulement dans les sols oxydés (Sr) versus les sols où les conditions de réduction prévalent (Mn et Co). Ainsi, les résultats de cette recherche dans le bassin versant de l'Hermine s'apparentent à ceux du Bouclier canadien qui mettent en lumière l'influence des inégalités du socle rocheux et du gradient croissant de Ks vers la surface du sol sur l'écoulement de l'eau dans les sols. Nous croyons que ces deux mécanismes constituent des phénomènes non linéaires qui expliqueraient pourquoi le développement de la connectivité hydrologique génère des relations non linéaires entre les précipitations et le débit. Ainsi, il serait intéressant de poursuivre les recherches sur l'exportation des ET du bassin versant de l'Hermine notamment à l'égard des augmentations marquées et subites des concentrations en As, Se et V lors de la décrue, afin de détecter le mécanisme *a priori* non linéaire à l'origine de cette ré-élévation de la nappe phréatique sur le versant nord.

BIBLIOGRAPHIE

- Abesser, C., Robinson, R., & Soulsby, C. (2006). Iron and manganese cycling in the storm runoff of a Scottish upland catchment. *Journal of Hydrology*, *326*, 59-78.
- Ali, G. A., & Roy, A. G. (2009). Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems. *Geography Compass*, *3*(1), 350-374.
- Ali, G. A., Roy, A. G., Turmel, M.-C., & Courchesne, F. (2010a). Multivariate analysis as a tool to infer hydrologic response types and controlling variables in a humid temperate catchment. *Hydrological Processes*, *24*, 2912-2923. doi: 10.1002/hyp.7705
- Ali, G. A., Roy, A. G., Turmel, M.-C., & Courchesne, F. (2010b). Source-to-stream connectivity assessment through end-member mixing analysis. *Journal of Hydrology*, *392*, 119-135. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.049
- Allan, C. J., Roulet, N. T., & Hill, A. R. (1993). The biogeochemistry of pristine, headwater Precambrian shield watersheds: an analysis of material transport within a heterogeneous landscape. *Biogeochemistry*, *22*, 37-79.
- Anderson, A. E., Weiler, M., Alila, Y., & Hudson, R. O. (2009). Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resources Research*, *45*. doi: 10.1029/2008WR007121
- Anderson, A. E., Weiler, M., Alila, Y., & Hudson, R. O. (2010). Piezometric response in zones of a watershed with lateral preferential flow as a first-order control on subsurface flow. *Hydrological Processes*. doi: 10.1002/hyp.7662
- Aryal, S., O'Loughlin, E., & Mein, R. G. (2002). A similarity approach to predict landscape saturation in catchments. *Water Resources Research*, *38*(10). doi: 10.1029/2001WR000864,2002
- Bargar, J., Tebo, B., & Villinski, J. (2000). In situ characterization of Mn (II) oxidation by spores of the marine *Bacillus* sp strain SG-1. *Geochimica Cosmochimica Acta*, *64*, 2775-2778.
- Bartoli. (1983). The biogeochemical cycle of silicon in two temperate forest ecosystems. *Environmental Biogeochemistry*, *35*, 469-476.
- Bazemore, D., Keith, E., Eshleman, N., & Hollenbeck, K. J. (1994). The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. *Journal of Hydrology*, *162*, 47-75.
- Bélanger, N., Côté, B., Courchesne, F., Fyles, J. W., Warfvinge, P., & Hendershot, W. H. (2002). Simulation of soil chemistry and nutrient availability in a forested ecosystem of southern Quebec-I. Reconstruction of the time-series files of nutrient cycling using the MAKEDEP model. *Environmental Modelling & Software*, *17*, 427-445.
- Bergkvist, B., Folkesson, L., & Berggren, D. (1989). Fluxes of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in temperate forest ecosystems: A literature review. *Water, Air, and Soil Pollution*, *47*, 217-286.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences*, *24*(1,3).
- Biron, P., Roy, A. G., Courchesne, F., Hendershot, W. H., Côté, B., & Fyles, J. (1999). The effects of antecedent moisture conditions on the relationship of hydrology to hydrochemistry in a small forested watershed. *Hydrological Processes*, *13*, 1541-1555.
- Bishop, K., Seibert, J., Köhler, S., & Laudon, H. (2004). Resolving the double paradox of rapidly mobilized old water with highly variable responses in runoff chemistry. *Hydrological Processes*, *18*, 185-189.
- Bishop, K. H., Grip, H., & O'Neill, A. (1990). The origins of acid runoff in a hillslope during storm events. *Journal of Hydrology*, *116*, 35-61.

- Brakensiek, D. L., & Rawls, W. J. (1994). Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, *23*, 99-110.
- Brown, V. A., McDonnell, J. J., Burns, D. A., & Kendall, C. (1999). The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. *Journal of Hydrology*, *217*, 171-190.
- Burns, D. A., McDonnell, J. J., Hooper, R. P., Peters, N. E., Freer, J. E., Kendall, C., et al. (2001). Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*, *15*, 1903-1924.
- Buttle, J. M., Dillon, P. J., & Eerkes, G. R. (2004). Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield. *Journal of Hydrology*(287), 161-177. doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.09.022
- Cao, X., Chen, Y., Wang, X., & Deng, X. (2001). Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere*, *44*, 655-661.
- Chappell, N., Stobbs, A., Ternan, L., & Williams, A. (1996). Localised impact of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) on soil permeability. *Plant and Soil*, *182*, 157-169.
- Conley, D. J. (2002). Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, *16*(4). doi: 10.1029/2002GB001894
- Cory, N., Laudon, H., Köhler, S., Seibert, J., & Bishop, K. (2007). Evolution of soil solution aluminum during transport along a forested boreal hillslope. *Journal of Geophysical Research*, *112*. doi: 10.1029/2006JG000387
- Courchesne, F., Côté, B., Fyles, J. W., Hendershot, W. H., Biron, P. M., Roy, A. G., et al. (2005). Recent changes in soil chemistry in a forested ecosystem of southern Québec, Canada. *Soil science society of America*, *69*, 1298-1313.
- Courchesne, F., Roy, A. G., Biron, P. M., Côté, B., Fyles, J., & Hendershot, W. H. (2001). Fluctuations of climatic conditions, elemental cycling and forest growth at the watershed scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, *67*, 161-177.
- Creed, I. F., & Band, L. E. (1998). Export of nitrogen from catchments within a temperate forest: Evidence for a unifying mechanism regulated by variable source area dynamics. *Water resources research*, *34*(11), 3105-3120.
- Creed, I. F., & Beall, F. D. (2009). Distributed topographic indicators for predicting nitrogen export from headwater catchments. *Water resources research*, *45*. doi: 10.1029/2008WR007285
- Davranche, M., Grybos, M., Gruau, G., Pédrot, M., Dia, A., & Marsac, R. (2011). Rare earth element patterns: A tool for identifying trace metal sources during wetland soil reduction. *Chemical Geology*, *284*, 127-137.
- De Kimpe, C. (1970). Chemical, physical and mineralogical properties of podzol soil with fragipan derived from glacial till in the province of Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, *13*, 317-328.
- De Kimpe, C. R., & McKeague, J. A. (1974). Micromorphological, physical, and chemical properties of a podzolic soil with a fragipan. *Canadian Journal of Soil Science*, *1974*(54), 29-38.
- Detty, J. M., & McGuire, K. J. (2010a). Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment. *Water resources research* *46*, 15. doi: 10.1029/2009WR008102,2010
- Detty, J. M., & McGuire, K. J. (2010b). Topographic controls on shallow groundwater dynamics: implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment. *Hydrological processes*, *24*, 2222-2236. doi: 10.1002/hyp.7656
- Devito, K. J., Hill, A. R., & Roulet, N. (1996). Groundwater-surface water interactions in headwater forested wetlands of the Canadian Shield. *Journal of hydrology*, *181*, 127-147.

- Dia, A., Gruan, G., Olivie-Lauquet, G., Riou, C., Molénat, J., & Curmi, P. (2000). The distribution of rare earth elements in groundwaters: Assessing the role of source-rock composition, redox changes and colloidal particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24), 4131-4151.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsch, R., P.D. (1996). Soil hydrophobicity variations with depth and particule size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in th Agueda Basin, Portugal. *Catena*, 27, 25-47.
- Drouin, D. (1999). *Génération d'un modèle numérique d'élévation adéquat pour la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant*. Maîtrise ès sciences Université de Montréal, Montréal.
- Du Laing, G., Meers, E., Dewispelaere, M., Rinklebe, J., Vandecasteele, B., Verloo, M. G., et al. (2009). Effect of water table level on metal mobility at different depths in wetland soils of the Scheldt Estuary (Belgium). *Water Air Soil Pollution*, 202, 353-367. doi: 10.1007/s11270-009-9982-2
- Dunne, T. (1978). Field studies of hillslop flow processes *Hillslope hydrology* (pp. 389): John Wiley & Sons, Ltd.
- Dunne, T., & Black, R. D. (1970). Partial area contributions to storm runoff in a smal New England Watershed. *Water ressources research*, 6(5), 1296-1311.
- Easthouse, K. B., Mulder, J., Christophersen, N., & Seip, H. M. (1992). Dissolved organic carbon fractions in soil and stream water during variable hydrological conditions at Birkenes, Southern Norway. *Water resources research*, 28(6), 1585-1596.
- Essington, M. E. (2004). *Soil and water chemistry: An integrative approach*. Boca Raton: CRC Press.
- Evans, C. D., Davies, T. D., Wigington Jr., P. J., Tranter, M., & Kretser, W. A. (1996). Use of factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains, New York. *Journal of hydrology*, 185, 297-316.
- Fiebig, D. M., Lock, M., A., & Neal, C. (1990). Soil water in the riparian zone as a source of carbon for headwater stream. *Journal of hydrology*, 116(1-4), 217-237.
- Freeman, C., Lock, M. A., Hughes, S., & Reynolds, B. (1997). Nitrous oxide emissions and the use of wetlands for water quality amelioration. *Environmental science and technology*, 31, 2438-2440.
- Frisbee, M. D., Allan, C. J., Thomasson, M. J., & Mackereth, R. (2007). Hillslope hydrology and wetland response of two small zero-order boreal catchments on the Precambrian Shield. *Hydrological processes*, 21, 2979-2997. doi: 10.1002/hyp.6521
- Fröhlich, H. L., Breuer, L., Frede, H.-G., Huisman, J. A., & Vaché, K. B. (2008). Water source characterization through spatiotemporal patterns of major, minor and trace element stream concentrations in a complex, mesoscale German catchment. *Hydrological processes*, 22, 2028-2043.
- Gelati, S. (2007). *Variations de l'humidité du sol et production de ruissellement à l'échelle d'un versant*. Mémoire de cheminement Honor. Département de Géographie. Université de Montréal. Montréal.
- Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J., & Morel, J.-L. (2005). *Sols et environnements*. Paris: Dunod.
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2003). *Le sol vivant*. Vesoul: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gruau, G., Dia, A., Olivie-Lauquet, G., Davranche, M., & Pinay, G. (2004). Controls on the distribution of rare earth elements in shallow groundwaters. *Water research*, 38, 3576-3586.
- Grybos, M., Davranche, M., Gruau, G., & Petitjean, P. (2007). Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxyhydroxides reduction ? *Journal of colloid and interface science*, 314, 490-501.

- Grybos, M., Davranche, M., Gruau, G., Petitjean, P., & Pédrot, M. (2009). Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. *Geoderma*, *154*(1-2), 13-19. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.09.001
- Hagg, I., & Westrich, B. (2002). Processes governing river water quality identified by principal component analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*, 3113-3130.
- Hardie, A. M., Heal, K. V., & Lilly, A. (2007). The influence of pedology and changes in soil moisture status on manganese release from upland catchments: Soil core laboratory experiments. *Water, Air, and Soil Pollution*, *182*(1-4), 369-382. doi: 10.1007/s11270-007-9348-6
- Hendershot, W., Savoie, H. S., & Courchesne, F. (1992). Simulation of stream-water chemistry with soil solution and groundwater flow contributions. *Journal of Hydrology*, *136*(237-252).
- Hill, J. W., Petrucci, R. H., Dion, M., & Lamoureux, M. (1999). *Chimie des solutions*. St-Laurent: Prentice-Hall, Inc.
- Hinton, M. J., Schiff, S. L., & English, M. C. (1998). Sources and flowpaths of dissolved organic carbon during storms in two forested watersheds of the Precambrian Shield. *Biogeochemistry*, *41*, 175-197.
- Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A., & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. *Annals of Botany*, *96*, 1027-1046.
- Hooper, R. P. (2001). Applying the scientific method to small catchment studies: a review of the Panola Mountain experience. *Hydrological processes*, *15*, 2039-2050.
- Hooper, R. P. (2003). Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water resources research*, *39*(3).
- Hooper, R. P., & Peters, N. E. (1989). Use of multivariate analysis for determining sources of solutes found in wet atmospheric deposition in the United States. *Environmental science and technology*, *23*(10), 1263-1268.
- Hooper, R. P., & Shoemaker, C. A. (1986). A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water resources research*, *22*(10), 1444-1454.
- Hu, Z., Haneklaus, S., Sparovek, G., & Schnug, E. (2006). Rare earth elements in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *37*, 1381-1420.
- Huang, J.-H., Ilgen, G., & Matzner, E. (2010). Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany. *Biogeochemistry*. doi: 10.1007/s10533-010-9447-0
- James, A. L., & Roulet, N. T. (2006). Investigating the applicability of end-member mixing analysis (EMMA) across scale: A study of eight small, nested catchments in a temperate forested watershed. *Water resources research*, *42*. doi: 10.1029/2005WR004419
- James, A. L., & Roulet, N. T. (2007). Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed. *Hydrological processes*, *21*, 3391-3408.
- Jencso, K. G., McGlynn, B. L., Gooseff, M. N., Wondzell, S. M., Bencala, K. E., & Marshall, L. A. (2009). Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach- and plot-scale understanding to the catchment scale. *Water resources research*, *45*. doi: 10.1029/2008WR007225
- Kabata-Pendias, A. (2001). *Trace elements in soils and plants* (3 ed.). Boca Raton: CRC Press LLC.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J. H., Michalzik, B., & Matzner, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil science*, *165*(4), 277-304.
- Kendall, K. A., Shanley, J. B., & McDonnell, J. J. (1999). A hydrometric and geochemical approach to test the transmissivity feedback hypothesis during snowmelt. *Journal of hydrology*, *219*, 188-205.

- Kerr, S. C., Shafer, M. M., Overdier, J., & Armstrong, D. E. (2008). Hydrologic and biogeochemical controls on trace element export from northern Wisconsin wetlands. *Biogeochemistry*, *89*, 273-294. doi: 10.1007/s10533-008-9219-2
- Kim, J. H., Sidle, R. C., & Moore, R. D. (2005). Shallow lateral flow from a forested hillslope: Influence of antecedent wetness. *Catena*, *60*, 293-306.
- L'Heureux, C., Toquet, É., Roy, A. G., Courchesne, F., & Turmel, M. C. (2010, 2010-06-03). *Hydrologic connectivity and geochemical signature during a rainfall event in a forested watershed*. Paper presented at the Classification, modélisation et études comparatives des mécanismes de contrôle environnementaux sur la réaction hydrologique des bassins versants Ottawa.
- Ladouche, B., Probst, A., Viville, D., Idir, S., Baqué, D., Loubet, M., et al. (2001). Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology*, *242*, 255-274.
- Laudon, H., Seibert, J., Köhler, S., & Bishop, K. (2004). Hydrological flow paths during snowmelt: Congruence between hydrometric measurements and oxygen 18 in meltwater, soil water, and runoff. *Water resources research*, *40*. doi: 10.1029/2003WR002455
- Lazerte, B. D., & Scott, L. (1996). Soil water leachate from two forested catchments on the Precambrian Shield, Ontario. *Canadian Journal of Forest resources*, *26*, 1353-1365.
- LCPCSL. (1993). *Analyse des silicates réactifs dans l'eau de surface (Technique par auto-analyseur)*. Laboratoire Conservation et Protection Centre Saint-Laurent, Environnement Canada.
- Legendre, P. (Producer). (2005, 18 avril). Analyse canonique, partition de la variation et analyse CPMV. [Atelier conjoint GREFi-CRBF d'initiation au langage R]
- Legendre, P. (2009). *Travaux pratiques en langage R*. Document de référence dans le cadre du cours BIO 6077. Département de sciences biologiques. Université de Montréal. Montréal.
- Legendre, P., & Borcard, D. (2003). Quelles sont les échelles spatiales importantes dans un écosystème ? In M. L. G. S. J.-J. Driesbeke (Ed.), *Analyse statistique de données spatiales*. Paris: TECHNIP.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2003). *Numerical Ecology* (Vol. 20). Amsterdam: Elsevier.
- Lind, B., & Lundin, L. (1990). Saturated hydraulic conductivity of Scandinavian tills. *Nordic Hydrology*, *21*, 107-118.
- Liu, F., Bales, R. C., Conklin, M. H., & Conrad, M. E. (2008). Streamflow generation from snowmelt in semi-arid, seasonally snow-covered, forested catchments, Valles Caldera, New Mexico. *Water resources research*, *44*. doi: 10.1029/2007WR006728
- Lytle, M. C., Lytle, F. W., Yang, N., Qian, J.-H., Hansen, D., Zayed, A., et al. (1998). Reduction of Cr(VI) to Cr(III) by wetland plants: potential for in situ heavy metal detoxification. *Environmental science and technology*, *32*, 3087-3093.
- Manna, S. (2003). *La variabilité spatiale du contenu en métaux traces biodisponibles dans les horizons organiques d'un sol forestier non contaminé*. Maîtrise Mémoire, Université de Montréal, Montréal.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.-P., Creutin, J.-D., Viallet, P., et al. (2009). A modeling approach to assess the hydrological response of small mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*, 79-97.
- Masse, J. (2011). *Contenu total en éléments traces de sols forestiers du Bouclier Canadien*. Maîtrise Mémoire, Université de Montréal, Montréal.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. New York: Oxford university press.
- McDonnell, J. J. (1990). A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water resources research*, *26*(11), 2821-2832.

- McDonnell, J. J. (2003). Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological processes*, *17*, 1869-1875. doi: 10.1002/hyp.5132
- McGlynn, B. L., & McDonnell, J. J. (2003). Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water resources research*, *39*(4). doi: 10.1029/2002WR001525
- McHale, M. R., McDonnell, J. J., Mitchell, M. J., & Cirimo, C. P. (2002). A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed. *Water resources research*, *38*(4). doi: 10.1029/2000WR00102.2002
- McLaughlin, J. W., & Webster, K. L. (2010). Alkalinity and acidity cycling and fluxes in an intermediate fen peatland in northern Ontario. *Biogeochemistry*, *99*(99), 143-145. doi: 10.1007/s10533-009-9398-5
- Mecke, M., & Ilvesniemi, H. (1999). Near-saturated hydraulic conductivity and water retention in coarse podzol profiles. *Scandinavian journal of forest research*, *14*, 391-401.
- Mehuys, G. R., & De Kimpe, C. R. (1976). Saturated hydraulic conductivity in pedogenetic characterization of podzols with fragipans in Québec. *Geoderma*, *15*, 371-380.
- Moore, R. D., & Thompson, J. C. (1996). Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept? *Water resources research*, *32*(3), 663-669.
- Morgan, J. J. (2005). Kinetics of reaction between O₂ and Mn(II) species in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *69*(1), 35-48.
- MRNF. (2006). Carte du Québec méridionale. Retrieved 5 décembre 2011, from Ministère des Ressources naturelles et Faune, Gouvernement du Québec <http://www.mrn.gouv.qc.ca/territoire/portrait/portrait-quebec.jsp>
- Mutwewingabo, B., De Kimpe, C. R., Bourbeau, G. A., Baril, R. W., & Lajoie, P. (1975). Étude comparative de sols des Laurentides, Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, *55*, 363-379.
- Neal, C. (2005). Lanthanum, cerium, praseodymium and yttrium in waters in an upland acidic and acid sensitive environment, mid-Wales. *Hydrology and Earth System Sciences*, *9*(6), 645-656.
- Neal, C., Smith, C. J., Jeffery, H. A., Jarvie, H. P., & Robson, A. J. (1996). Trace element concentrations in the major rivers entering the Humber estuary, NE England. *Journal of Hydrology*, *182*, 37-64.
- Nyberg, L. (1995). Water flow path interactions with soil hydraulic properties in till soil at Gardsjön, Sweden. *Journal of hydrology*, *170*(1-4), 255-275.
- Nyberg, L., Stähli, M., Mellander, P.-E., & Bishop, K. H. (2001). Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations. *Hydrological processes*, *15*, 909-926. doi: 10.1002/hyp.256
- O'Brien, C., & Hendershot, W. H. (1993). Separating streamflow into groundwater, solum and upwelling flow and its implications for hydrochemical modelling. *Journal of hydrology*, *146*(1), 1-12.
- Ocampo, C. J., Sivapalan, M., & Oldham, C. (2006). Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: Implications for runoff generation and nitrate transport. *Journal of Hydrology*, *331*, 643-658.
- Olivie-Lauquet, Gruan, G., Dia, A., Riou, C., Jaffrezic, A., & Henin, O. (2001). Release of trace elements in wetlands: role of seasonal variability. *Water resources*, *35*(4), 943-952.
- Palumbo, B., Bellanca, A., Neri, R., & Roe, M. J. (2001). Trace metal partitioning in Fe-Mn nodules from Sicilian soils, Italy. *Chemical Geology*, *173*, 257-269.
- Payette, S., & Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Saint-Nicolas: Les Presses de l'Université Laval.
- Pédrot, M., Le Boudec, A., Davranche, M., Dia, A., & Henin, O. (2011). How does organic matter constrain the nature, size and availability of Fe nanoparticles for biological reduction? *Journal of colloid and interface science*, *359*(1), 75-85.

- Peters, D. L., Buttle, J. M., Taylor, C. H., & LaZerte, B. D. (1995). Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin. *Water resources research*, 31(5), 1291-1304.
- Phillips, J. D. (2003). Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. *Progress in physical geography*, 27(1), 1-23.
- Räisänen, M. L., Kashulina, G., & Bogatyrev, I. (1997). Mobility and retention of heavy metals, arsenic and sulphur in podzols at eight locations in northern Finland and Norway and the western half of the Russian Kola Peninsula. *Journal of geochemical exploration*, 59, 175-195.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2000). *Biologie végétale* (6e ed.). Paris: De Boeck Université.
- Rawls, W. J., & Brakensiek, D. L. (1985, 30 avril - 1er mai). *Prediction of soil water properties for hydrologic modeling*. Paper presented at the Watershed management in the eighties., Denver.
- Richardson, J. L., & Vepraskas. (2001). *Wetland soils: Genesis, Hydrology, Landscape, and Classification*. Boca Raton: Lewis
- Rodhe, A. (1989). On the generation of stream runoff in Till Soils. *Nordic Hydrology*, 20, 1-8.
- Rose, C. (2004). *An introduction to the environmental physics of soil, water and watersheds*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Roulet, N. (1990). The hydrological role of peat-covered wetlands. *Le Géographe canadien*, 34(1), 82-83.
- Savoie, S. (1988). *Contribution of soil solution chemistry to stream water quality in a small forested watershed during spring snowmelt*. Master McGill University, Montréal.
- Scanlon, T. M., Raffensperger, J. P., & Hornberger, G. M. (2001). Modeling transport of dissolved silica in a forested headwater catchment: Implications for defining the hydrochemical response of observed flow pathways. *Water resources research*, 37(4), 1071-1082.
- Schut, P. H., & Evans, D. R. (1986). Variation in trace metal exports from small canadian shield watersheds. *Water, Air, and Soil Pollution*, 28, 225-237.
- Seibert, J., Bishop, K., & McDonnell, J. J. (2003). Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis. *Water resources research*, 39(1). doi: 10.1029/2002WR001404
- Seibert, J., & McDonnell, J. J. (2002). On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration *Water resources research*, 38(11), 1241. doi: 10.1029/2001WR000978,2002
- Seuntjens, P., Cornelis, C., De Brucker, N., & Geuzens, P. (1999). Derivation of functional layers in a podzol toposequence for simulating cadmium Transport. *Physics and chemistry of the Earth*, 24(7), 869-873.
- Shafer, M. M., Overdier, J. T., Hurley, J. P., Armstrong, D., & Webb, D. (1997). The influence of dissolved organic carbon, suspended particulates, and hydrology on the concentration, partitioning and variability of trace metals in two contrasting Wisconsin watersheds (U.S.A). *Chemical Geology*, 136, 71-97.
- Sheldrick, B. H. (1984). *Analytical methods manual*. Ottawa: Land resource research institute contribution.
- Sherrell, R. M., & Ross, J. M. (1999). Temporal variability of trace metals in New Jersey Pinelands streams: Relationships to discharge and pH. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19/20), 3321-3336.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., & Shimizu, T. (1995). Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *Journal of Hydrology*, 168, 227-250.
- Sigg, L., Behra, P., & Stumm, W. (2006). *Chimie des milieux aquatique: Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement* (4 ed.): Dunod.

- Soulsby, C. (1995). Contrasts in storm event hydrochemistry in an acidic afforested catchment in upland Wales. *Journal of Hydrology*, 170(159-179).
- Soulsby, C., Chen, M., Ferrier, R. C., Helliwell, R. C., Jenkins, A., & Harriman, R. (1998). Hydrogeochemistry of shallow groundwater in an upland Scottish catchment. *Hydrological processes*, 12(1111-1127).
- Spence, C., & Woo, M.-k. (2003). Hydrology of subarctic Canadian shield: soil-filled valleys. *Journal of hydrology*, 279, 151-166. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00175-6
- Sposito, G. (1994). *Chemical equilibria and kinetics in soils*. New York: Oxford university press.
- St. Louis, V. L., Rudd, J. W. M., Kelly, C. A., Beaty, K. G., Bloom, N. S., & Flett, R. J. (1994). Importance of Wetlands as Sources of Methyl Mercury to Boreal Forest Ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51, 1065-1076.
- Stieglitz, M., Shaman, J., McNamara, J., Engel, V., Shanley, J., & Kling, G. W. (2003). An approach to understanding hydrologic connectivity on the hillslope and the implications for nutrient transport. *Global biogeochemical cycles*, 17(4). doi: 10.1029/2003GB002041
- Stockdale, A., Davison, W., Zhang, H., & Hamilton-Taylor, J. (2010). The association of cobalt with iron and manganese (oxyhydr)oxides in Marine Sediment. *Aquatic Geochemistry*, 16, 575-585.
- Strobel, B. W., Hansen, H. C. B., Borggaard, O. K., Andersen, M. K., & Raulund-Rasmussen, K. (2001). Composition and reactivity of DOC in forest floor foil solutions in relation to tree species and soil type. *Biogeochemistry*, 56, 1-26.
- Struyf, E., & Conley, D. (2009). Silica: an essential nutrient in wetland biogeochemistry. *Frontiers in ecology and the environment*, 7(2), 88-94.
- Struyf, E., Mörth, C.-M., Humborg, C., & Conley, D. J. (2010). An enormous amorphous silica stock in boreal wetlands. *Journal of geophysical research*, 115. doi: 10.241029/2010JG0013
- Stutter, M. I., Deeks, L. K., Low, D., & Billett, M. F. (2006). Impact of soil and groundwater heterogeneity on surface water chemistry in an upland catchment. *Journal of Hydrology*, 318(103-120).
- Suchara, I., & Sucharova, J. (2002). Distribution of sulphur and heavy metals in forest floor humus of the Czech republic. *Water, Air, and Soil Pollution*, 136, 289-316.
- Sultan, K., & Dowling, K. (2006). Seasonal changes in arsenic concentrations and hydrogeochemistry of canadian creek, Ballarat (Victoria, Australia). *Water, Air, and Soil Pollution*, 169, 355-374.
- Taillefert, M., Macgregor, B. J., Gaillard, J.-F., Lienemann, C.-P., Perret, D., & Stahl, D. (2002). Evidence for a dynamic cycle between Mn and Co in the water column of a stratified lake. *Environmental science and technology*, 36(3), 468-476.
- Tarboton, D. G. (2005, 5 mai 2005). *Review of Proposed CUAHSI hydrologic information system hydrologic Observations Data Model*, Utah State University.
- Thériault, R. (2009). *Relations entre la réponse hydrochimique d'éléments traces dissous (As, Al, Ba, Cd, Ce, Cu, Mg, Ni, Pb, Rb, Sr, Y et Zn) et la réponse hydrologique d'un bassin versant forestier à l'échelle événementielle*. Mémoire de cheminement Honor. Département de géographie. Université de Montréal. Montréal.
- Toquet, É. (2010). *Connectivité hydrologique et écoulement hypodermique d'un bassin versant, au cours d'une saison et lors d'un épisode pluvieux, Basses-Laurentides, Québec, Canada*. Étude de cas Département de géographie. Université de Montréal. Montréal.
- Tromp-van Meerveld, H. J., & McDonnell, J. J. (2006a). Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water resources research*, 42. doi: 10.1029/2004WR003778,2006

- Tromp-van Meerveld, H. J., & McDonnell, J. J. (2006b). Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water resources research*, *42*. doi: 10.1029/2004WR003800,2006
- Turmel, M.-C., Turgeon, J. M. L., Cloutier-Hurteau, B., & Courchesne, F. (2005). Saisonnalité du transport de carbone organique dissous dans le ruisseau de l'Hermine, un bassin versant de tête de réseau du Bouclier Canadien. *Revue des sciences de l'eau*, *18*(3), 353-380.
- Uchida, T., Tromp-van Meerveld, I., & McDonnell, J. J. (2005). The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of hydrology*, *311*, 117-133.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., & Deban, L. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water resources research*, *32*(12), 3581-3592.
- Vereecken, H., Maes, J., & Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil science*, *149*, 1-12.
- Vidon, P. G. F., & Hill, A. R. (2004). Landscape controls on the hydrology of stream riparian zones. *Journal of hydrology*, *292*, 210-228. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.005
- Watmough, S. A., Eimers, C. M., & Dillon, P. J. (2007). Manganese cycling in central Ontario forests: Response to soil acidification. *Applied Geochemistry*, *22*, 1241-1247.
- Weiler, M., McDonnell, J. J., Tromp-van Meerveld, I., & Uchida, T. (2005). Subsurface stormflow. In M. G. Anderson (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (pp. 1719-1732). Chichester: John Wiley & Sons.
- Western, A. W., Blöschl, G., & Grayson, R. B. (2001). Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. *Water resources research*, *37*(1), 83-97.

