



Synthèse hydro-géochimique des régions couvertes par les  
projets d'acquisition de connaissances sur les eaux  
souterraines

Et

Développement d'un indice de résistance chimique des  
eaux souterraines du Québec

**Rapport Final**



Rapport final du projet.

À la date du : 2021/09/01

Contractant/ demandeur:

Nom: Marie-Catherine Talbot Poulin
Adresse: Direction de l'eau potable et des eaux souterraines, Direction générale des politiques de l'eau Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques.
Mail: marie-catherine.talbotpoulin@environnement.gouv.qc.ca

Titre du projet:

Développement d'un indice de sensibilité hydrochimique des eaux souterraines pour les régions couvertes par les projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Rédaction du rapport :

<i>Responsable scientifique</i>
Nom: Barbecot Florent, professeur titulaire en hydrogéologie et géochimie des eaux
Adresse: GEOTOP - UQAM
Tel, Mail: +1 514 923 2405                      barbecot.florent@uqam.ca
<i>Chercheur post-doctoral</i>
Nom: Lefebvre Karine, chercheuse post-doctoral HydroSciences UQAM
Adresse: GEOTOP - UQAM
Tel, Mail: +1 514 923 2405                      lefebvre.karine@uqam.ca

Collaboration Scientifique :

Gillon Marina

Maitre de Conférences en hydrogéochimie, laboratoire d'hydrologie d'Avignon, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France  
marina.gillon@univ-avignon.fr

# Table des matières

Liste des Figures.....	6
Liste des Tableaux.....	13
Liste des Acronymes .....	14
Résumé du projet.....	15
Contexte .....	15
Objectifs .....	17
Méthodologie.....	18
Sélection des données.....	18
Synthèse hydro-géochimique des 16 sites.....	18
Le développement de l'indice de résistance chimique .....	19
Résultats .....	21
1 Introduction .....	25
1.1 Contexte.....	25
1.2 Notion de risque et ses composantes .....	26
1.3 Protéger les ressources .....	28
1.4 Objectifs et phases de travail .....	31
1.5 Résumé du travail réalisé pour chacune des phases .....	32
2 Méthodologie.....	36
2.1 Sélection/validation des données.....	36
2.1.1 Analyse des données disponibles et de leur fiabilité .....	36
2.1.1.1 Cas des paramètres physico-chimiques mesurés in situ .....	37
2.1.1.2 Cas des éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> ).....	40
2.1.1.3 Cas des éléments mineurs et traces .....	40
2.1.2 Balance ionique .....	40
2.1.3 Synthèse.....	44
2.2 Évolution chimique des eaux souterraines et diagramme d'évolution hydrochimique .....	44
2.2.1 Processus chimiques majoritaires dans les aquifères .....	45
2.2.2 Paramètres impactant la dynamique chimique des eaux souterraines .....	50
2.2.2.1 Type de roches rencontrées .....	50
2.2.2.2 La pression partielle (pCO <sub>2</sub> ) de l'eau .....	51
2.2.3 Calcul de l'indice de résistance chimique (IRC) .....	54
2.2.3.1 Cas des aquifères silicatés .....	54
2.2.3.2 Cas particulier des aquifères carbonatés.....	60

2.2.3.3	Calcul de l'Indice de résistance chimique (IRC).....	60
2.3	Synthèse de construction de l'IRC .....	61
2.3.1	Synthèse version courte.....	61
2.3.2	Synthèse version étendue .....	62
3	Résultats .....	65
3.1	Régions situées au Nord du fleuve Saint-Laurent .....	67
3.1.1	Abitibi-Témiscamingue (PACES ABTE 1 & 2) .....	67
3.1.2	Outaouais (PACES OUT).....	78
3.1.3	Vaudreuil-Soulanges (PACES VS) .....	86
3.1.4	Basses-Laurentides (PRE-PACES BL) .....	93
3.1.5	Mauricie (PACES MAU) .....	101
3.1.6	Portneuf (PRE-PACES PO) .....	110
3.1.7	Communauté métropolitaine de Québec (PACES CMQ).....	117
3.1.8	Saguenay-Lac Saint Jean (PACES SLSJ) .....	124
3.1.9	Charlevoix-Haute-Côte-Nord (PACES CHCN).....	131
3.2	Régions situées au Sud du fleuve Saint-Laurent .....	138
3.2.1	Châteauguay (PRE-PACES CH).....	138
3.2.2	Montérégie-Est (ME).....	145
3.2.3	Nicolet-Saint-François (PACES NSF) .....	153
3.2.4	Bécancour (PACES BEC) .....	160
3.2.5	Chaudières-Appalaches (PACES CA) .....	167
3.2.6	Nord-Est du Bas Saint-Laurent (PACES NEBSL).....	174
4	Discussion .....	181
4.1	Les grandes familles de systèmes aquifères .....	181
4.2	Applicabilité et limites de la méthode d'indice de résistance géochimique .....	184
5	Conclusion.....	186
6	Bibliographie.....	189

## Liste des Figures

Figure 1: Répartition des quantités d'eau douce disponible par an et par personne à travers le monde en 2007 (FAO, Nations Unies et World Resources Institute) .....	25
Figure 2: Localisation des PACES de 2009 à 2015 à l'échelle du Québec (MELCC, 2015) .....	26
Figure 3 : Représentation schématique des composantes de la notion de risque appliquée au cas de la ressource en eau souterraine .....	27
Figure 4: Approche de la notion de risque de contamination par le couplage d'un aléa et de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine (Mezonnat, 2012) .....	29
Figure 5 : Coupe schématique des écoulements souterrains dans un aquifère avec une aire de recharge unique et évolution de la résistance de la nappe de l'amont vers l'aval de la ligne d'écoulement principale (rouge = pas résistant et vert = fortement résistant) .....	30
Figure 6: Schéma conceptuel des temps de séjour des eaux souterraines en fonction des chemins parcourus (Winter <i>et al.</i> , 1998) .....	30
Figure 7 : Coupe schématique des écoulements souterrains dans un aquifère avec de multiples aires de recharge et évolution de la résistance de la nappe de l'amont vers l'aval de la ligne d'écoulement principale (rouge = pas résistant et vert = fortement résistant) .....	31
Figure 8: Représentation des principaux couples d'oxydo-réduction en fonction du potentiel redox de l'eau (Langmuir, 1997) .....	38
Figure 9: Exemple de températures mesurées <i>in situ</i> et modélisées pour la région PACES de la Montérégie Est .....	39
Figure 10: Comparaison statistique (a) et binaire (b) des résultats de la balance ionique des échantillons de la BD-V1 obtenus par tableur sous Excel (cette étude) et par modélisation PHREEQC (Bondu <i>et al.</i> , 2019).....	42
Figure 11: Relation entre la balance ionique calculée par PHREEQC et la minéralisation totale des eaux (TDS) .....	43
Figure 12 : Principes de cinétique et d'équilibre illustrés par l'évolution temporelle des teneurs en Na <sup>+</sup> en solution issue de la dissolution de la halite (Appelo <i>et al.</i> , 2005). .....	46
Figure 13 : Comparaison des taux de dissolution des minéraux carbonatés et silicatés en fonction du pH de l'eau (Langmuir, 1997) .....	47
Figure 14 : Évolution théorique des taux de dissolution des minéraux silicatés en fonction du pH de l'eau (Brantley <i>et al.</i> , 2008).....	48
Figure 15 : Séquence d'altération des minéraux silicatés en fonction de leur stabilité (Séquence de Goldich, modifiée de Langmuir, 1997) .....	48
Figure 16 : (a) Structure argiles de type 1/1 (famille de la kaolinite) et (b) structure des argiles de type 2/1 (familles illites, smectite) (Langmuir, 1997).....	49
Figure 17 : Schéma des sources et processus contrôlant la pCO <sub>2</sub> dans les sols (Gillon <i>et al.</i> , 2012)....	52
Figure 18 : Évolutions en système ouvert et en système fermé du carbone inorganique dissous dans l'eau en fonction du pH en considérant deux pressions partielles de CO <sub>2</sub> initiales différentes (Gillon <i>et al.</i> , 2009). .....	53
Figure 19 : Schématisation de l'équilibration de l'eau souterraine avec la roche dans la zone saturée donc en système fermé vis-à-vis du CO <sub>2</sub> (à gauche) ou dans la zone non saturée donc en système ouvert vis-à-vis du CO <sub>2</sub> (à droite) .....	53
Figure 20 : Impact des processus majoritaires des interactions eau - roche sur la composition chimique des eaux représenté sur un diagramme de PIPER (parcours de minéralisation adaptés de (Walter <i>et al.</i> , 2017)) .....	55
Figure 21 : Diagramme d'évolution hydrochimique et tendances associées aux processus majeurs observables dans les eaux souterraines (DEH).....	56

Figure 22 : Échelle de l'indice de résistance chimique à partir du DEH.....	57
Figure 23 : Modélisation de l'impact de la géologie et de la pCO <sub>2</sub> initiale sur l'évolution chimique des eaux souterraines appliquée au DEH (modélisation réalisée sous PHREEQC à partir de la chimie de deux puits du PACES CHCN ; les ratios entre anorthite et albite altérés sont de 3 ou 20 et la pCO <sub>2</sub> varie entre 10 <sup>-0.6</sup> et 10 <sup>-1.67</sup> ) .....	57
Figure 24 : Modélisation de l'altération d'anorthite et d'albite (ratio = 30) pour trois pCO <sub>2</sub> initiales différentes représentée par l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite (IS <sub>calcite</sub> ) en fonction des teneurs en alcalinité .....	58
Figure 25 : Représentation de l'impact cumulé de la géologie et de la pCO <sub>2</sub> initiale sur la chimie des eaux souterraines dominée par l'altération des silicates.....	59
Figure 26 : Représentation des échelles des sous-indices de résistance Ind <sub>Si</sub> (à gauche) et Ind <sub>TAC</sub> (à droite) .....	60
Figure 27 : Composition de l'indice de résistance chimique en fonction du contexte minéralogique des aquifères .....	62
Figure 28 : Synthèse du contexte hydrogéologique des PACES ABTE1 et 2 (Cloutier <i>et al.</i> , 2015)...	68
Figure 29 : Localisation des puits échantillonnés avec leur minéralisation totale dans la partie Ouest (ABTE 2 à gauche, Cloutier <i>et al.</i> (2015)) et leur qualité en fer et manganèse pour la partie Est (ABTE1 à droite, Cloutier <i>et al.</i> (2013)) .....	69
Figure 30: Faciès géochimique des eaux de la région ABTE représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite (IS <sub>calcite</sub> ) en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b) .....	70
Figure 31 : Faciès chimique des puits des PACES ABTE 1 et ABTE 2 représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	71
Figure 32 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observée dans les régions PACES ABTE 1 et 2 (points) et modélisée pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	72
Figure 33 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH (Ind <sub>DEH</sub> =IRC <sub>carbonates</sub> ) (a) et distribution des puits selon les gammes de valeur d'IRC et d'Ind <sub>DEH</sub> (b).....	73
Figure 34 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie nord-est.....	75
Figure 35 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie nord-ouest.....	76
Figure 36 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie sud .....	77
Figure 37: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Outaouais avec les faciès chimiques des ressources en eau et les principales lignes d'écoulement schématisées (Montcoudiol <i>et al.</i> , 2015) .....	78
Figure 38: Spatialisation des types d'eau des puits prélevés en fonction du type d'aquifère rencontré (Comeau <i>et al.</i> , 2013) .....	79
Figure 39 : Faciès géochimique des eaux de la région OUT représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des IS <sub>calcite</sub> en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	80
Figure 40 : Faciès chimique des puits du PACES OUT représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	81
Figure 41 : Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES OUT (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en	

fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	82
Figure 42 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	83
Figure 43 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES OUT.....	84
Figure 44 : Connexion entre les puits et les eaux de surface sur le secteur sud des MRC Papineau et Gatineau – PACES OUT.....	85
Figure 45: Coupe N-S synthétique du contexte hydrogéologique du secteur Vaudreuil-Soulanges (Larocque <i>et al.</i> , 2015b).....	86
Figure 46: Faciès géochimique des puits échantillonnés en fonction du contexte hydrogéologique (Larocque <i>et al.</i> , 2015b).....	87
Figure 47: Faciès géochimique des eaux de la région VS représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	88
Figure 48: Faciès chimique des puits du PACES VS représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	89
Figure 49: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES VS (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	90
Figure 50: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	91
Figure 51: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES VS.....	92
Figure 52 : Contexte hydrogéologique simplifié (a) et coupe transversale illustrant le modèle conceptuel des flux d'eau souterraine dans les unités hydrostratigraphiques principales (b) (Cloutier, 2004).....	94
Figure 53 : Répartition des puits échantillonnés dans le cadre du Pré-PACES Basses-Laurentides.....	95
Figure 54: Faciès géochimique des eaux de la région Pré-PACES BL représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	96
Figure 55: Faciès chimique des puits du Pré-PACES BL représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	97
Figure 56: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES BL (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	98
Figure 57: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	99
Figure 58: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) de la région Pré-PACES BL.....	100
Figure 59: Coupe de synthèse du contexte hydrogéologique du PACES de la Mauricie (a) et des écoulements souterrains (b) (Légaré-Couture <i>et al.</i> , 2017).....	101
Figure 60: Faciès géochimiques des eaux de nappes en fonction du type de confinement rencontré (Leblanc <i>et al.</i> , 2013) .....	102
Figure 61 : Faciès géochimique des eaux de la région MAU représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	103



Figure 62 : Faciès chimique des puits du PACES MAU représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	104
Figure 63 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES MAU (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	105
Figure 64 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	106
Figure 65: Évolution des teneurs en nitrates en fonction des indices de résistance chimique (IRC) calculés pour les masses d'eau de la région PACES de la Mauricie.....	106
Figure 66: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC des nappes libres – PACES MAU.....	108
Figure 67 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC des nappes captives – PACES MAU .....	109
Figure 68: Coupe synthétique du contexte géologique du bassin versant de la rivière Sainte Anne traversant la MRC de Portneuf (Larose-Charette <i>et al.</i> , 2000).....	110
Figure 69 : Faciès géochimique des eaux de la région PO représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	111
Figure 70: Faciès chimique des puits du Pré-PACES PO représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	112
Figure 71: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES PO (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	113
Figure 72: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	114
Figure 73: Évolution des teneurs en nitrates en fonction des indices de résistance chimique (IRC) calculés pour les masses d'eau de la région pré-PACES de Portneuf.....	115
Figure 74: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et des indices DRASTIC - Pré-PACES PO .....	116
Figure 75: Coupe synthétique du contexte hydrogéologique de la région du PACES-CMQ (Talbot Poulin <i>et al.</i> , 2013) .....	117
Figure 76: Localisation des puits prélevés en fonction du type d'aquifère correspondant (Talbot Poulin <i>et al.</i> , 2013).....	118
Figure 77 : Faciès géochimique des eaux de la région CMQ représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	119
Figure 78 : Faciès chimique des puits du PACES CMQ représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	120
Figure 79 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CMQ (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	121
Figure 80 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	122
Figure 81 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES CMQ.....	123

Figure 82: Coupe conceptuelle du contexte hydrogéologique régional du PACES SLSJ (CERM-PACES, 2013) .....	124
Figure 83: Répartition des puits échantillonnés en fonction du type de milieu aquifère puisé (CERM-PACES, 2013) .....	125
Figure 84 : Faciès géochimique des eaux de la région SLSJ représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	126
Figure 85 : Faciès chimique des puits du PACES SLSJ représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	127
Figure 86 : Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES SLSJ (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	128
Figure 87 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	129
Figure 88 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES SLSJ .....	130
Figure 89: Délimitations des contextes hydrogéologiques du PACES Charlevoix-Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015) .....	131
Figure 90 : Localisation des échantillons d'eau souterraine prélevés lors du PACES CHCN (CERM-PACES, 2015) .....	132
Figure 91 : Faciès géochimique des eaux de la région CHCN représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	133
Figure 92 : Faciès chimique des puits du PACES CHCN représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	134
Figure 93 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CHCN (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	135
Figure 94 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	136
Figure 95 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES CHCN.....	137
Figure 96: Localisation des puits échantillonnés en fonction du type d'aquifère prélevé et des conditions de captivité rencontrées (Blanchette, 2006).....	139
Figure 97: Faciès géochimique des eaux de la région CH représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	140
Figure 98: Faciès chimique des puits du Pré-PACES CH représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	141
Figure 99: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES CH (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	142
Figure 100: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	143

Figure 101: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - Pré-PACES CH.....	144
Figure 102: Coupes de synthèse des contextes hydrogéologiques présents sur le territoire du PACES de la Montérégie (Carrier <i>et al.</i> , 2013).....	146
Figure 103: Carte de répartition des puits échantillonnés en fonction du type d'aquifère prélevé (Carrier <i>et al.</i> , 2013).....	147
Figure 104: Faciès géochimique des eaux de la région ME représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{\text{calcite}}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	148
Figure 105: Faciès chimique des puits du PACES ME représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée.....	149
Figure 106: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES ME (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance.....	150
Figure 107: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{\text{DEH}}=IRC_{\text{carbonates}}$ ).....	151
Figure 108: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES ME.....	152
Figure 109: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Nicolet-Saint-François (Larocque <i>et al.</i> , 2015a).....	153
Figure 110: Répartition des puits échantillonnés et de leur type d'eau en fonction de l'indice de confinement du milieu (Larocque <i>et al.</i> , 2015a).....	154
Figure 111 : Faciès géochimique des eaux de la région NSF représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{\text{calcite}}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	155
Figure 112: Faciès chimique des puits du PACES NSF représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée.....	156
Figure 113: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES NSF (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en Si dissout (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance.....	157
Figure 114: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{\text{DEH}}=IRC_{\text{carbonates}}$ ).....	158
Figure 115: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES NSF.....	159
Figure 116: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Bécancour (Larocque <i>et al.</i> , 2013) .	160
Figure 117: Répartition spatiale des puits en fonction du type d'aquifère (triangles : aquifère roc, carrés : aquifère granulaire ; en jaune les puits dépassant la norme de potabilité pour l'antimoine, en vert pour l'arsenic, en orange pour le fluor et en bleu pour le barium, les points noirs ne dépassent aucune norme; Larocque <i>et al.</i> , 2013).....	161
Figure 118: Faciès géochimique des eaux de la région BEC représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{\text{calcite}}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	162
Figure 119: Faciès chimique des puits du PACES BEC représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée.....	163
Figure 120: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES BEC (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en	

fonction des teneurs en Si dissout (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	164
Figure 121: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	165
Figure 122: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES BEC .....	166
Figure 123: Conditions de confinement des nappes présentes sur le territoire du PACES Chaudières-Appalaches (Lefebvre <i>et al.</i> , 2015) .....	167
Figure 124: Faciès géochimique des eaux prélevés dans les puits en fonction du type d'aquifère concerné (Lefebvre <i>et al.</i> , 2015).....	168
Figure 125: Faciès géochimique des eaux de la région CA représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	169
Figure 126: Faciès chimique des puits du PACES CA représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	170
Figure 127: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CA (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	171
Figure 128: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	172
Figure 129: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES CA .....	173
Figure 130: Coupe de synthèse du contexte hydrogéologique du PACES NEBSL (Buffin-Bélanger <i>et al.</i> , 2015) .....	174
Figure 131: Spatialisation des types d'eau rencontrés dans les puits prélevés en fonction du type d'aquifère et des conditions de confinement du roc (Buffin-Bélanger <i>et al.</i> , 2015).....	175
Figure 132 : Faciès géochimique des eaux de la région NEBSL représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des $IS_{calcite}$ en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b).....	176
Figure 133: Faciès chimique des puits du PACES NEBSL représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée .....	177
Figure 134: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES NEBSL (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance .....	178
Figure 135: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ).....	179
Figure 136: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES NEBSL .....	180
Figure 137 : Répartition des teneurs en nitrates dans les aquifères granulaires libres (à gauche) et captifs (à droite) des régions étudiées en fonction des IRC .....	182
Figure 138: Répartition des gammes d'IRC par région étudiée.....	183
Figure 139: Évolution des teneurs en $NO_3^-$ dans les eaux souterraines en fonction des IRC calculés pour les régions contenant les lignes d'écoulement souterrain les plus longues .....	183
Figure 140 : Schéma de définition des aires de protection immédiate et éloignées des puits (MELCC) .....	184

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Résistance des réservoirs d'eau souterraine en fonction de leur taille et de leur taux de renouvellement .....	29
Tableau 2 : Liste des personnes référentes contactées pour chaque PACES étudié.....	33
Tableau 3 : Synthèse du nombre de données manquantes par champs inclus dans la base de données géochimiques.....	36
Tableau 4 : Bilan du nombre de puits conservés pour les calculs d'IRC par rapport aux données disponibles initialement pour chaque région étudiée .....	185

## Liste des Acronymes

ABTE = Abitibi Témiscamingue

BEC = Bécancour

BL = Basses-Laurentides

CA = Chaudières-Appalaches

CE = conductivité électrique, aussi symbolisée SC dans la base de données

CH = Châteauguay

CHCN = Charlevoix-Haute-Côte-Nord

DEH = Diagramme d'évolution chimique

IRC = Indice de Résistance Chimique

IS<sub>calcite</sub> = Indice de saturation vis-à-vis de la calcite

MAU = Mauricie

ME = Montérégie-Est

MELCC = Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques

MDDELCC = Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques

NEBSL = Nord Est du Bas Saint-Laurent

NSF = Nicolet-Saint-François

OUT = Outaouais

PACES = Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

PO = Portneuf

SLSJ = Saguenay-Lac-Saint-Jean

TDS = Total dissolved solids = minéralisation totale de l'eau

VS = Vaudreuil-Soulange

ZS = zone saturée

ZNS = zone non saturée

## Résumé du projet

### Contexte

Le Québec possède à lui seul 3% des réserves d'eau douce de la planète, contenues principalement dans les aquifères. À l'exception des grandes agglomérations (Montréal, Québec), 90 % du territoire habité du Québec s'alimente en eau potable dans les nappes d'eau souterraines, réservoirs aussi très utilisés en agriculture (Rousseau *et al.*, 2004). Le développement des aires urbaines et des productions agricoles accroît la pression sur les ressources en eau, alors que les connaissances sur ces systèmes sont encore trop limitées. Depuis vingt ans, le Québec investit autant dans la législation que dans les études afin de pallier ce manque de connaissances indispensables à la protection de la ressource en eau. Vitaines de cette dynamique provinciale, les programmes d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines ont été initiés dès 2008 (PACES, (2013)). De 2009 à 2015, les ressources en eau souterraines de 13 régions du Québec Méridional ont été caractérisées (MELCC, 2015). Pour chaque région étudiée, un portrait a été fait des réservoirs, de leur fonctionnement, de leur utilisation et des facteurs d'origine anthropique qui pouvaient les affecter.

Dans le cadre de l'exploitation des eaux souterraines, des aires de protection sont définies autour de chaque puits selon le règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP). Ce règlement impose aux responsables de prélèvement d'eau souterraine de réaliser tous les 5 ans une analyse de vulnérabilité de la ressource prélevée pour chaque aire de protection délimitée (Article 68 du RPEP). Cette analyse décrit la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en se basant sur la méthode DRASTIC (Article 53 du RPEP). Avec l'accroissement de son utilisation, le concept de vulnérabilité a beaucoup évolué, il convient donc de le définir plus clairement.

La définition de la **vulnérabilité** s'appuie sur trois composantes (Dauphiné *et al.*, 2013): la probabilité qu'une pollution atteigne la ressource en eau, mais également des propriétés propres au comportement de la ressource (enjeu): la **résistance** et la **résilience**. La résistance peut être définie comme la capacité de l'enjeu à résister face à l'aléa, tandis que la résilience caractérise la capacité de retour à la normale de l'enjeu après l'évènement de pollution. Dans le cas des ressources en eau souterraine (Figure R-1), décrire la vulnérabilité implique que soient bien appréhendés:

- La probabilité de transfert du polluant vers la nappe d'eau souterraine qui se déduit de la description de **la vulnérabilité des barrières naturelles** pouvant protéger la ressource. L'approche de type DRASTIC permet une évaluation généralement satisfaisante de cette vulnérabilité de barrière.
- L'intensité avec laquelle la ressource peut être affectée par le polluant et qui rend compte de la sensibilité intrinsèque de la ressource (intensité de dégradation). Pour simplification, c'est le paramètre inverse, la **résistance** de la ressource, qui sera estimé.
- Le temps nécessaire à la ressource pour retrouver un état de qualité satisfaisant après un épisode de pollution : la **résilience de la ressource**.

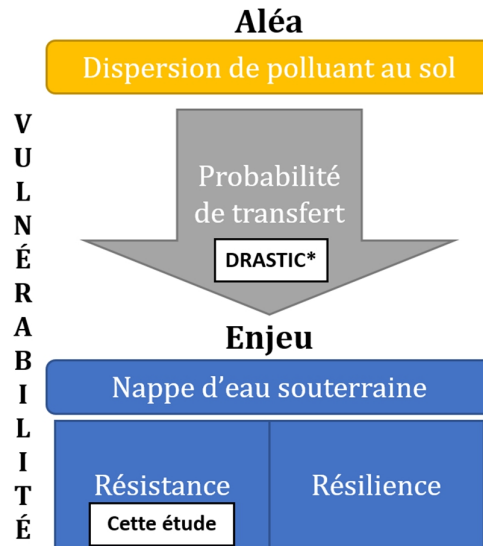


Figure R-1 : Représentation schématique des composantes de la notion de risque appliquée au cas de la ressource en eau souterraine

Des outils tels que l'indice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), utilisé dans les PACES, permettent une caractérisation satisfaisante de la probabilité de transfert des polluants vers la nappe en décrivant les propriétés des couches géologiques situées entre la surface du sol et la nappe. Ces approches intègrent une assimilation 1D verticale du transfert comme analogue de la vulnérabilité sans tenir compte réellement de la spécificité des écoulements au sein du bassin d'alimentation des puits. La résistance de la ressource à une éventuelle pollution traduit cette spécificité.

Dans ce travail, l'approche développée vise à apporter un regard novateur et plus intégrateur sur l'évolution géochimique des eaux souterraines et caractériser la composante résistance de la ressource en eau souterraine grâce à la reconnaissance des processus hydrochimiques dominants. Cette résistance va en premier ordre évoluer en fonction (i) de l'importance de la ressource (volume du réservoir) et (ii) de l'intensité et de la distribution de son renouvellement (Tableau R-1). Par extension, la résistance d'une masse d'eau souterraine sera une propriété intégrant les paramètres tels que la porosité efficace, la géométrie de l'aquifère (volume) et les conditions aux limites comme la recharge. Une résistance maximale correspond aux aquifères régionaux dont les taux de renouvellement sont faibles. À l'inverse, les petits aquifères locaux aux forts taux de renouvellement vont posséder une résistance très faible. (Arnoux *et al.*, 2017b).

Tableau R1 : Résistance des réservoirs d'eau souterraine en fonction de leur taille et de leur taux de renouvellement

	Petite taille de réservoir	Grande taille de réservoir
Faible taux de renouvellement	Résistance moyenne	Résistance forte
Fort taux de renouvellement	Résistance faible	Résistance moyenne

Si l'on considère la masse d'eau souterraine étudiée comme homogène, la résistance pourrait être décrite par la distribution des temps de séjour de l'eau. Ils sont minimums au niveau des aires de recharges, et augmentent au fur et à mesure de l'éloignement de la masse d'eau de ces secteurs à risque (Figure R-2a). Dans le cas d'aquifères régionaux possédant plusieurs zones de recharges, la résistance va évoluer en fonction des mélanges entre les eaux de recharge récentes et les eaux de nappe



plus anciennes (Figure R-2b). Les outils de datation des eaux seraient très pertinents pour étudier la résistance de la ressource ("Protection des captages : la connaissance de l'âge de l'eau, une donnée clef," 2021) mais leur coût et la rareté des données ne permettent pas d'obtenir une caractérisation suffisamment dense en vue de la protection des ressources. L'alternative choisie dans le cadre de cette étude est basée sur la chimie des eaux avec une approche descriptive des processus contrôlant la distribution des éléments majeurs dans l'eau souterraine depuis la recharge jusqu'aux lignes d'écoulements les plus profondes. Cette approche s'inscrit à la suite des travaux de Meyzonnat et al. 2016 qui ont démontré l'intérêt de développer des indices géochimiques pour discuter de la vulnérabilité des nappes.

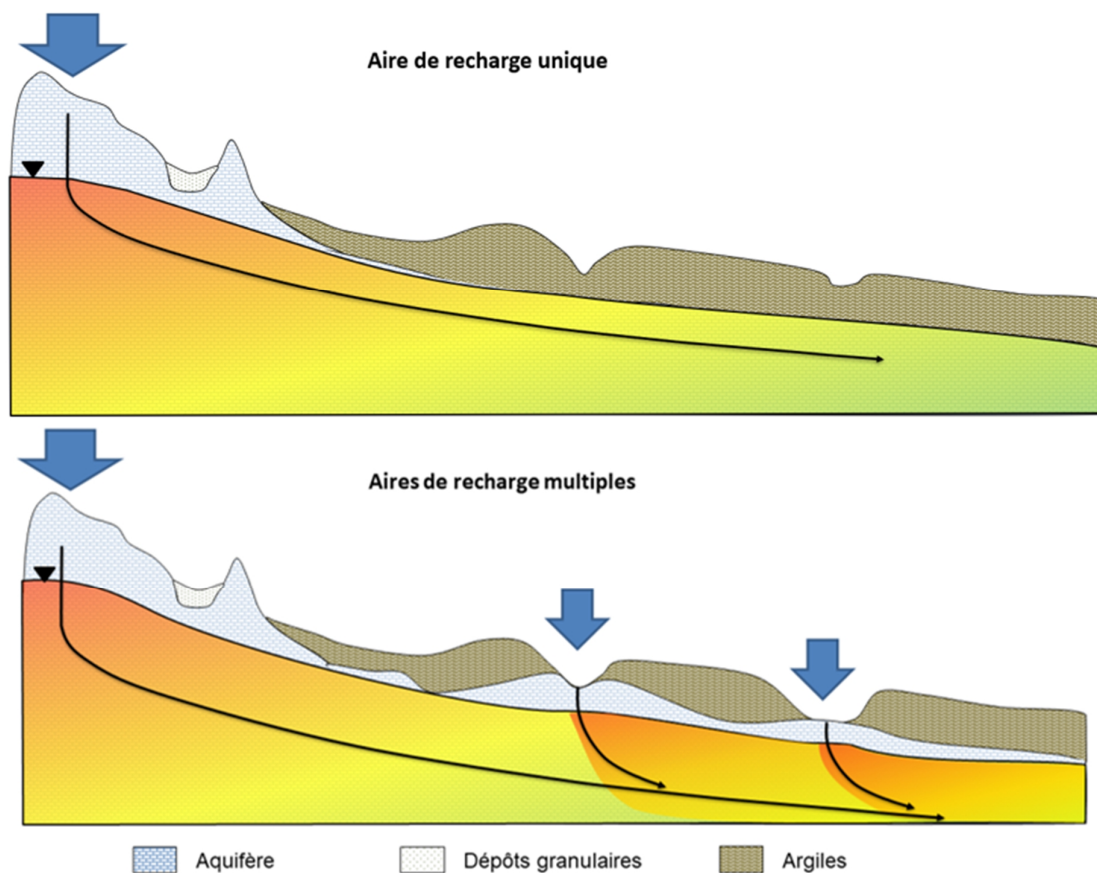


Figure R-2 : Coupe schématique des écoulements souterrains dans un aquifère avec une aire de recharge unique (1) ou avec de multiples aires de recharge (2) et évolution de la résistance de la nappe de l'amont vers l'aval de la ligne d'écoulement principale (rouge = pas résistant et vert = fortement résistant)

## Objectifs

L'objectif de cette étude est de construire une méthode robuste d'évaluation de la composante résistance des ressources en eau, afin d'enrichir les outils de protection de la ressource par une démarche complémentaire aux connaissances déjà acquises sur les régions PACES.

Pour cela, trois sous-objectifs ont été définis pour ce projet :

1. Construire un indice de résistance chimique (IRC) à partir des travaux antérieurs sur l'indice de vulnérabilité chimique (Meyzonnat *et al.*, 2016) pour l'ensemble des autres régions couvertes par les PACES ;
2. Réaliser des cartes de cet indice de résistance chimique des eaux souterraines ;

Tester la robustesse et l'utilité de ce nouvel IRC par rapport aux contextes et aux indices préalablement calculés dans le cadre des PACES (notamment l'indice DRASTIC).

## Méthodologie

### Sélection des données

Ce projet s'est appuyé sur une base de données géochimique du MELCC structurée par l'équipe de V. Cloutier (BD-V1) contenant 2608 puits analysés regroupant 13 projets PACES et 3 projets Pré-PACES. Afin de s'assurer que les objectifs spécifiques de la présente étude puissent être atteints, une analyse exhaustive des données géochimiques disponibles a été faite.

Plusieurs incohérences ont nécessité de faire des homogénéisations (CE) et des corrections (température). Pour faciliter le traitement des analyses, des changements d'unités ont été réalisés (TAC, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, HS). Un travail important sur le calcul des balances ioniques a été fourni pour tenter de conserver un maximum d'analyses tout en définissant les limites d'acceptabilité les plus pertinentes. À l'issue de cette étape, 244 échantillons, soit 9 % de la BD-V1 ont été écartés sur la base des critères suivants :

- Balance ionique < 10 % pour tout TDS > 200 mg.L<sup>-1</sup> ;
- Analyses chimiques complètes ;
- Données pH et TAC disponibles.

Des données telles que le potentiel redox (ORP), les teneurs en nitrates/nitrites/ammonium n'ont pas pu être exploitées car des carences dans les protocoles d'échantillonnages et/ou d'analyses demeurent. Des propositions d'amélioration des méthodes d'acquisitions (standardisation / formation) comme de validation des données en vue de leur intégration dans les bases de données ont été suggérées.

### Synthèse hydro-géochimique des 16 sites

En vue d'assurer de la pertinence des schémas conceptuels d'évolution hydrochimique des eaux, il était impératif de pouvoir s'appuyer sur une bonne compréhension des circulations sur chacun des sites étudiés. Un descriptif synthétique des schémas de circulations incluant la classification des eaux en groupes hydrodynamiques (libre / captif, granulaire / roc) et géochimiques (faciès dans un diagramme de Piper, Indice de saturation vis-à-vis de la calcite) a pu être proposé (Figure R-3). Ce travail a permis de reconnaître les provinces hydro-chimiques et posé les bases de compréhension des évolutions géochimiques dominantes nécessaires à la réalisation des indices.

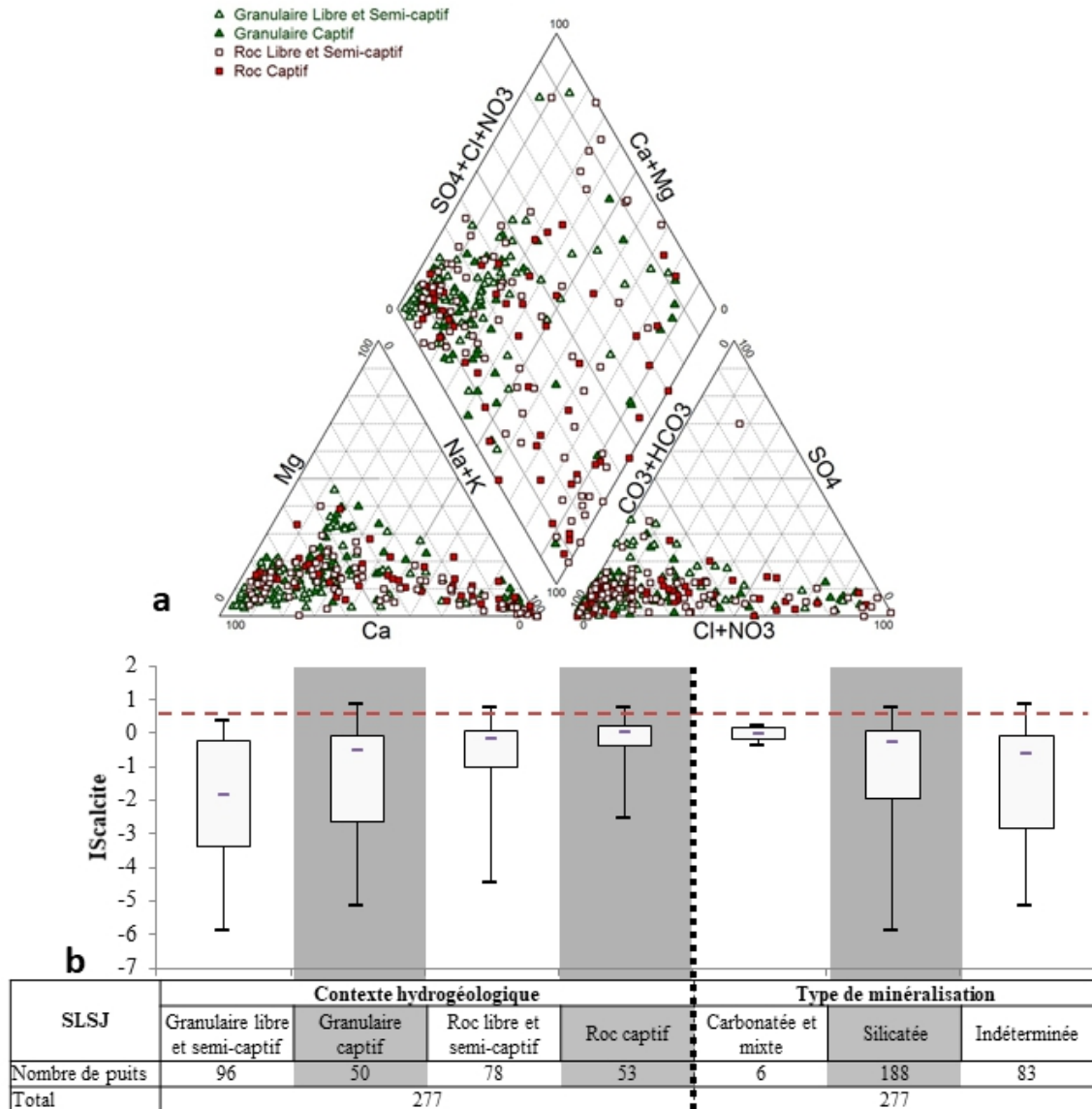


Figure R-3 : Exemple de synthèse hydro-chimique réalisée sur la région PACES du Saguenay-Lac-Saint-Jean

### Le développement de l'indice de résistance chimique

Pour que la notion d'indice hydro-chimique s'appuie sur une démarche scientifique robuste, il était nécessaire d'identifier pour chacune des régions les processus majeurs contrôlant la minéralisation de l'eau en milieu souterrain. Une attention particulière a notamment été portée aux processus suivants :

- (i) l'altération chimique des minéraux,
- (ii) les équilibres solides-solutions et la précipitation des minéraux
- (iii) les échanges cationiques avec les argiles,
- (iv) les mélanges de masses d'eau.

Les deux principaux contextes minéralogiques rencontrés correspondent aux aquifères silicatés et aux aquifères carbonatés (Mezzonati *et al.*, 2018a). Les vitesses d'altération des roches et de précipitation des minéraux secondaires étant beaucoup plus importantes dans les milieux carbonatés que dans les milieux silicatés (Langmuir, 1997), ces deux contextes ont été traités séparément.

Pour les aquifères carbonatés, l'indice de résistance chimique (IRC) se base uniquement sur le DEH (Figure R-4). En effet dans ce contexte, la dissolution des carbonates est très rapide et la saturation vis-à-vis des carbonates est atteinte en quelques jours/semaines soit beaucoup trop rapidement pour que le suivi d'indicateurs comme l'indice de saturation vis-à-vis  $IS_{\text{calcite}}$  soit pertinent. Le DEH retrace alors de façon très fidèle l'action conjointe des processus dominant la minéralisation des eaux souterraines.

Par contre, pour les aquifères silicatés, les cinétiques d'altération des minéraux sont lentes. Ainsi pour avoir une meilleure description de l'évolution hydrochimique dans la gamme de temps de résidence des eaux reconnues dans les aquifères québécois, nous avons proposé un calcul d'indices mixtes. Ce calcul permet de définir un indice de résistance chimique (IRC) sur la base des indices suivants (Figure R-4) :

- $Ind_{\text{DEH}}$ , déterminé à partir du diagramme d'évolution hydrochimique (DEH) mettant en relation les éléments majeurs présents dans les eaux souterraines (Na-Cl vs Ca+Mg-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>) ;
- $Ind_{\text{Si}}$ , déterminé à partir du suivi de l'évolution de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite ( $IS_{\text{calcite}}$ ) en fonction des teneurs en silice dissoute dans l'eau ;
- $Ind_{\text{TAC}}$ , déterminé à partir du suivi de l'évolution de l'  $IS_{\text{calcite}}$  en fonction des teneurs en alcalinité (TAC).

Ces indices retracent l'impact des processus dominant l'évolution hydrochimique des eaux souterraines. Pour chaque site leur pertinence a été validée par des modélisations sous PHREEQC. À l'exception des régions Vaudreuil-Soulanges et Basses Laurentides, ces modélisations de l'impact de processus hydrochimique sur la signature des eaux ont été contraintes par les  $p\text{CO}_2$  acquises lors de la recharge et la distribution des minéraux dans les aquifères (feldspaths plagioclases principalement).

La méthode développée n'est pas adaptée aux eaux trop minéralisées, ou trop impactées par de la pollution anthropique saline qui sont hors des gammes de potabilité. De ce fait, le calcul d'IRC a pu être réalisé sur tous les puits dont les analyses respectaient les critères suivants :

- $\text{TDS} < 1500 \text{ mg.L}^{-1}$  ;
- $IS_{\text{calcite}} \leq 1$  ;
- $\text{Na-Cl} > -0.5 \text{ meq.L}^{-1}$  ou  $(\text{Ca+Mg})-(\text{HCO}_3+\text{CO}_3+\text{SO}_4) < 0.5 \text{ meq.L}^{-1}$ .

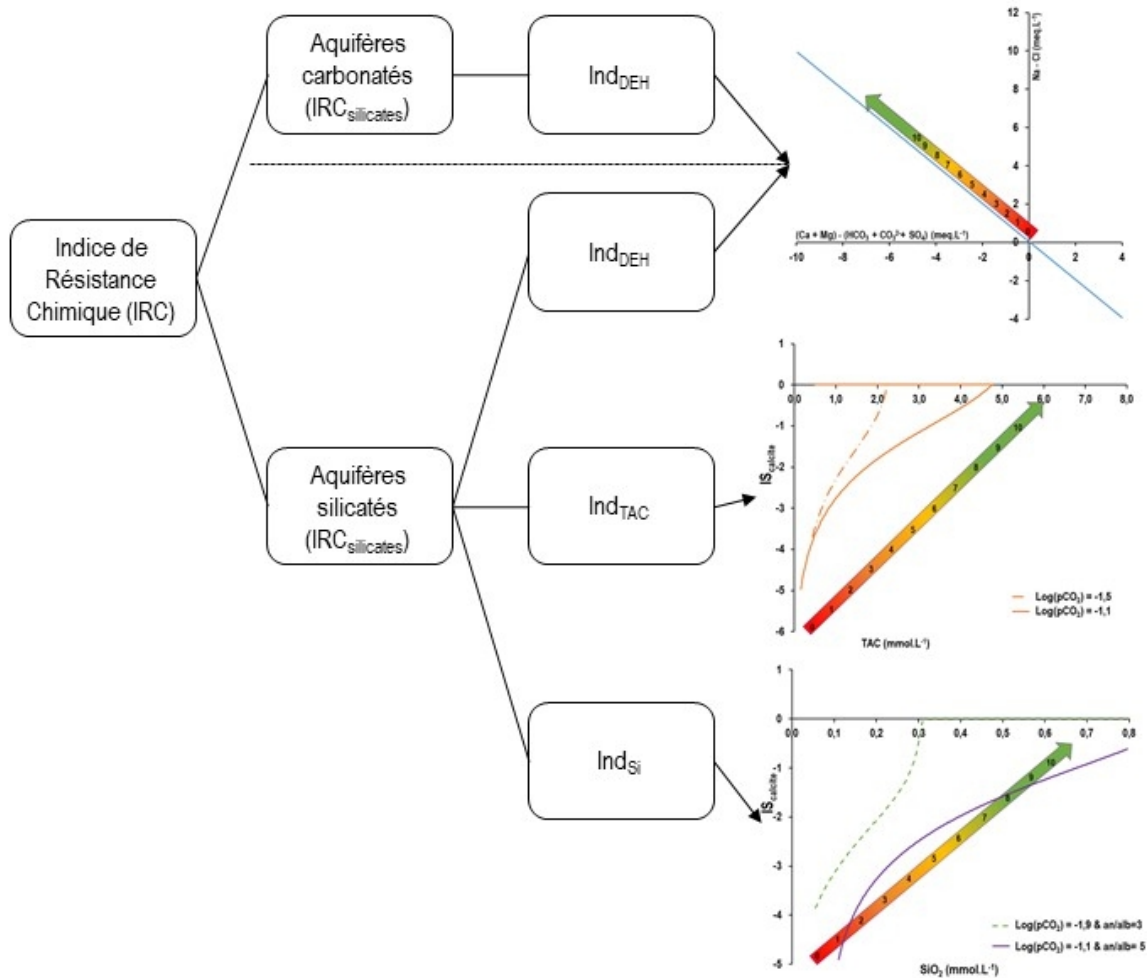


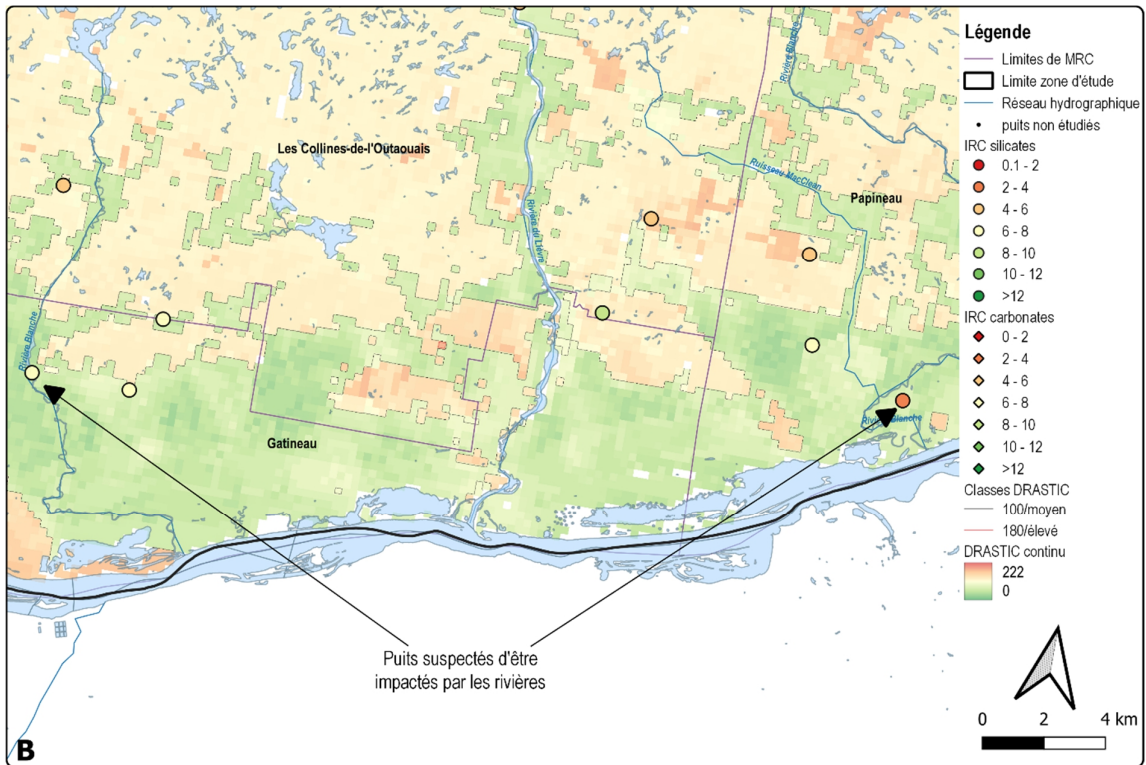
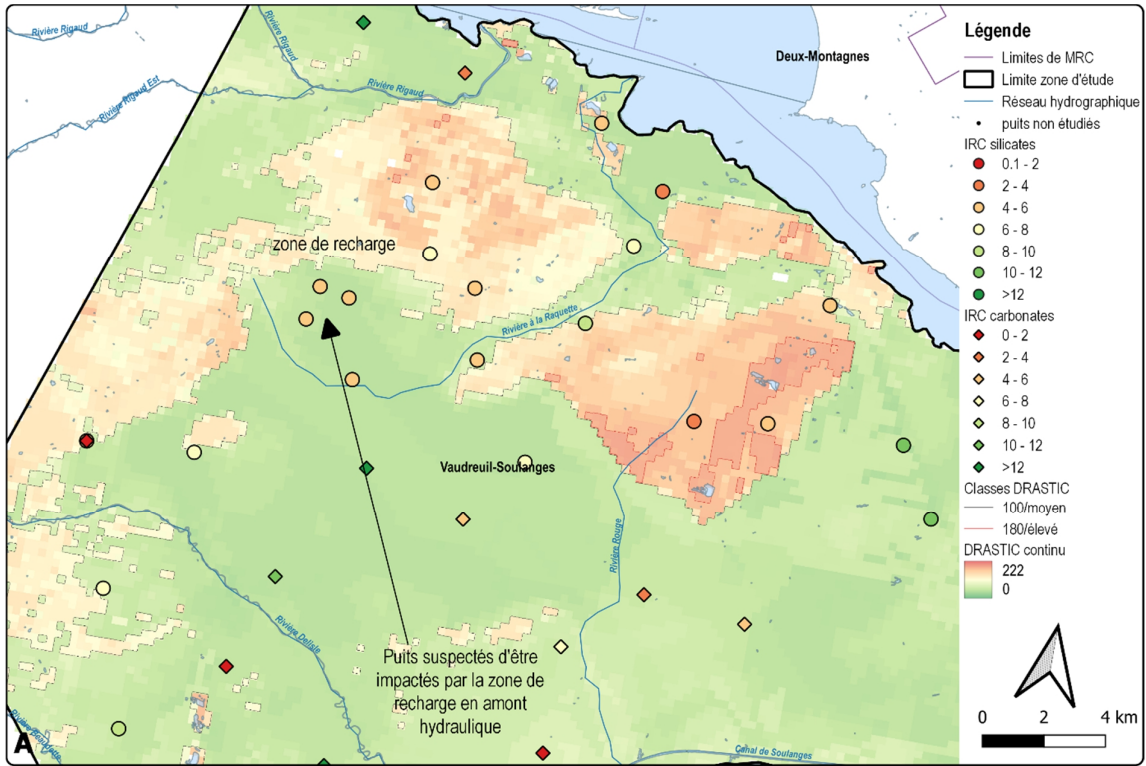
Figure R-4 : Composition de l'indice de résistance chimique en fonction du contexte minéralogique des aquifères

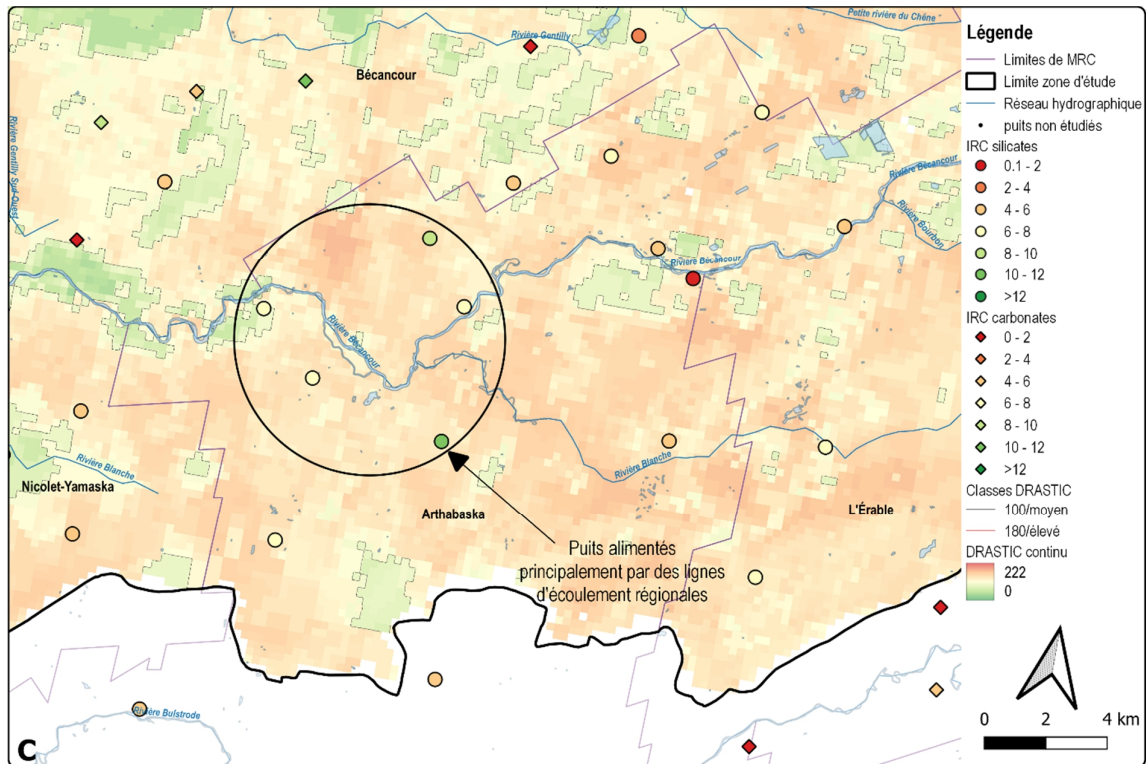
## Résultats

L'indice de résistance chimique (IRC) a été calculé pour l'ensemble des puits de la base de données. Les modélisations nous ont permis de valider les processus et l'indice s'est avéré pertinent sur l'ensemble des régions concernées.

L'indice de résistance chimique s'accorde le plus souvent avec l'indice DRASTIC bien que ces deux outils soient issus d'approches et paramètres indépendants. Reflet de l'impact de la distribution de la recharge et des écoulements sur la ressource en eau, l'IRC complète l'information DRASTIC. Lorsque ces deux approches ne donnent pas des résultats concordants, il a été possible de révéler :

- (i) l'existence de zones de recharge en amont du puit qui ne peuvent pas être considérées par DRASTIC (Résistance faible et DRASTIC peu vulnérable au droit du puits; Figure R-5A) ;
- (ii) la contribution d'eaux de surface sur les puits proches de rivières ou lacs (Résistance faible et DRASTIC peu vulnérable au droit du puits ; Figure R-5B) ;
- (iii) une contribution significative issue de la drainance ascendante des aquifères régionaux vers les aquifères granulaires superficiels, se traduisant par des vulnérabilités chimiques faibles malgré forte vulnérabilité DRASTIC. (IRC élevé et DRASTIC vulnérable ; Figure R-5C)





**Figure R-5 : Exemple de relation entre les aires de recharge aux indices DRASTIC élevé et les puits en aval direct aux IRC faibles à Vaudreuil-Soulanges (A), impact des eaux de rivière sur des puits situés à moins de 500 m d'un cours d'eau en Outaouais (B) et prédominance des écoulements régionaux dans des puits situés sur des secteurs jugés vulnérables par DRASTIC dans la région Bécancour (C)**

Grâce au couplage des sous-indices dans les milieux silicatés, l'IRC offre une sensibilité suffisante pour caractériser efficacement les ressources en eau des aquifères granulaires tout en restant pertinent pour les eaux plus anciennes (long trajet en milieu souterrain). Ainsi, les régions situées sur la plateforme du Saint-Laurent pour lesquelles les aquifères régionaux sont d'extension maximale possèdent les IRC les plus élevés (21,7 pour Vaudreuil-Soulanges, 24,6 pour Montérégie Est).

Il n'est pas simple de valider un indice de vulnérabilité. Si on s'attend à ce qu'un secteur présentant des signes de l'activité anthropique (teneurs élevées en  $\text{NO}_3^-$ , phytosanitaires) ait un faible IRC, la réciproque n'est pas systématique. En effet, les régions vulnérables ne sont pas toutes soumises à un aléa (activités anthropiques, pollutions), la comparaison des IRC avec les teneurs en nitrates doit donc donner une distribution des points dans les secteurs colorés sur la Figure R-6. C'est bien ce qui est obtenu dans les régions à forte pression agricole (Mauricie, Portneuf) et pour l'ensemble des puits dans les aquifères granulaires du Québec.

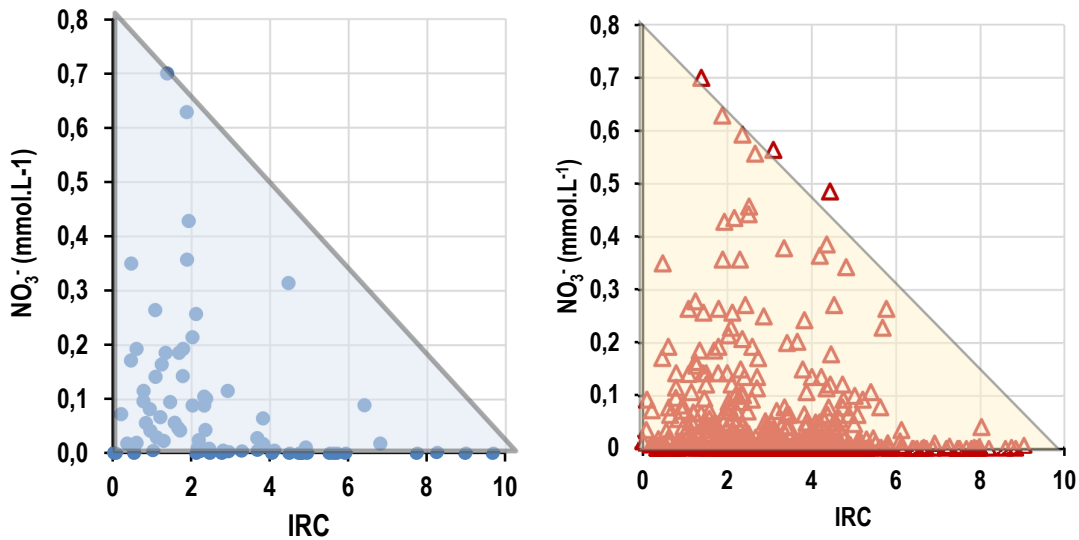


Figure R-6 : Évolution des teneurs en nitrates en fonction des indices de résistance chimique (IRC) calculés pour les masses d'eau de la région pré-PACES de Portneuf (à gauche) et des puits situés dans les aquifères granulaires libres toutes régions confondues (à droite)

Il a ainsi été démontré que l'utilisation de l'IRC présente un intérêt dans tous les contextes hydrogéologiques à condition de veiller à la bonne qualité des données chimiques recueillies. Les eaux sont fréquemment peu minéralisées au Québec et les incertitudes analytiques relatives peuvent être très importantes. Cette information, non disponible à ce jour, devrait être intégrée aux bases de données pour être utilisées dans les travaux futurs. Il serait alors possible de proposer des formulaires (tableur) qui permettrait de valider la qualité des données chimiques (Mesures in-situ, types de données, BI) et calculer automatiquement l'IRC pour étendre son utilisation.



# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Inégalement répartie à travers le monde, l'eau douce disponible pour les activités humaines est présente en très grandes quantités au Canada (Figure 1). Bien que le réseau d'eaux de surface (lacs et rivières) y soit très largement développé, ce sont les nappes d'eaux souterraines qui représentent le plus grand réservoir d'eau douce et soutiennent l'ensemble des hydrosystèmes du pays (Arnoux *et al.*, 2017a). Elles contribuent aussi à subvenir aux besoins de près de 30 % de la population canadienne, contre 50 % à l'échelle mondiale (Margat *et al.*, 2013), et sont majoritairement sollicitées pour l'irrigation des terres agricoles.

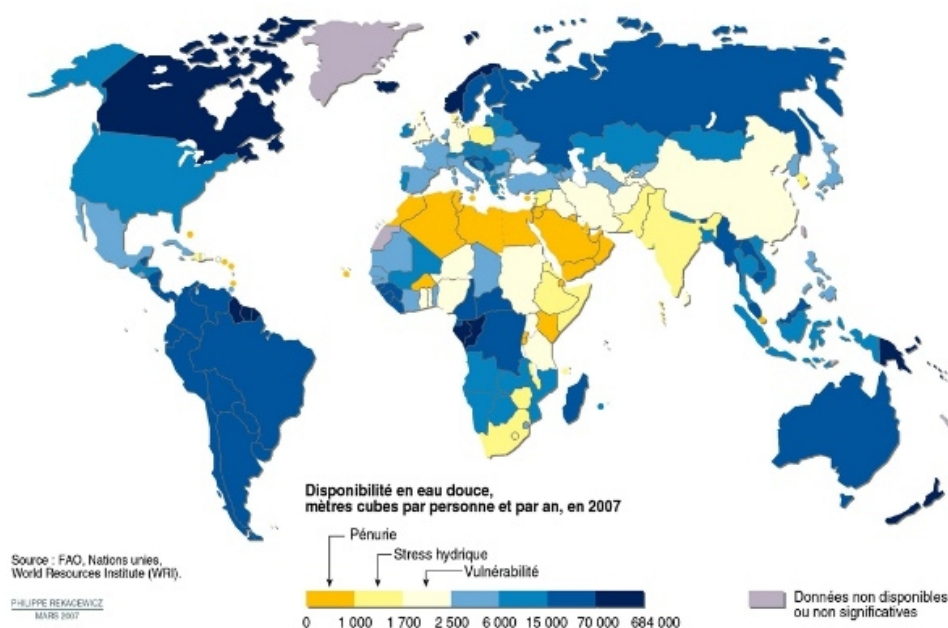


Figure 1: Répartition des quantités d'eau douce disponible par an et par personne à travers le monde en 2007 (FAO, Nations Unies et World Resources Institute)

À l'échelle nationale, la concentration des activités et des zones urbaines dans la moitié sud du pays crée une pression croissante sur les ressources en eau, notamment en Ontario et au Québec (NRTEE, 2010). Au Québec la population s'alimente en eau potable puisée dans les nappes d'eaux souterraines sur près de 90 % du territoire habité (Rousseau *et al.*, 2004). Utilisées pour leur faible coût d'exploitation, les ressources en eaux souterraines étaient encore très mal connues au début des années 2000. Le Québec a mis en place dès 2002 une politique provinciale de l'eau pour tenter de protéger cette ressource (i.e. loi sur l'eau de 2009) et soutenir l'acquisition de connaissances. Dès 2008, le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a élaboré le premier « Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec » (PACES, (2013)<sup>1</sup>). Trois vagues de PACES se sont succédé de 2009 à 2015 sur 13 régions du Québec méridional (Figure 2).

<sup>1</sup> <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>

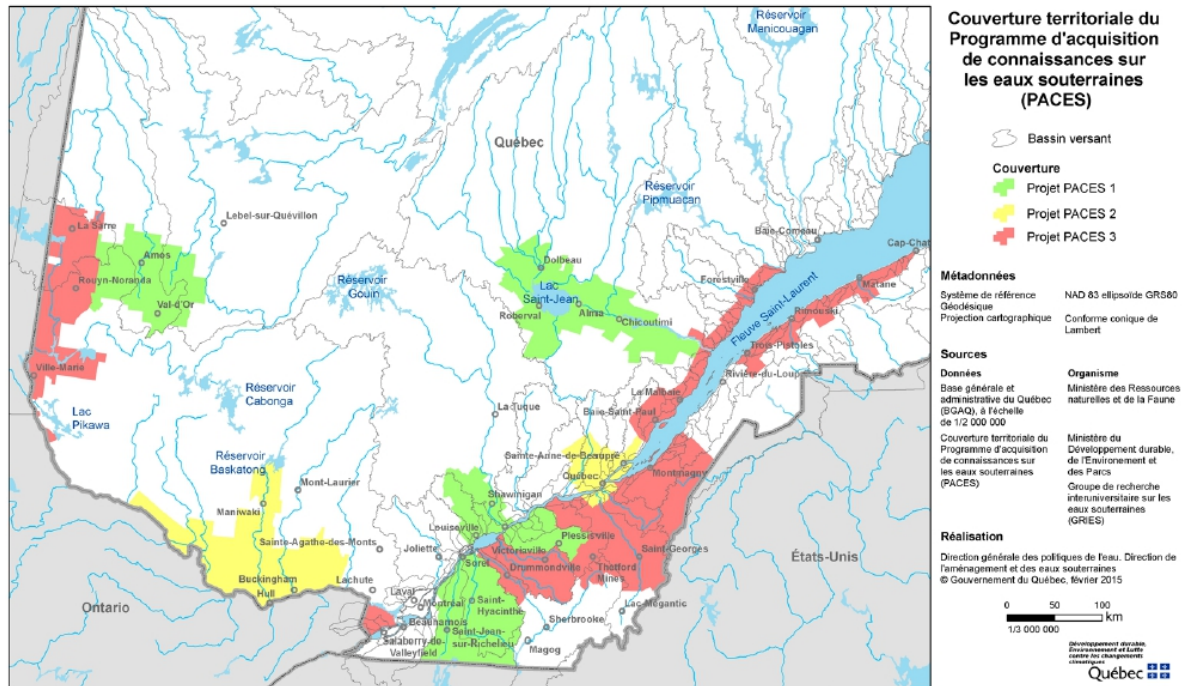


Figure 2: Localisation des PACES de 2009 à 2015 à l'échelle du Québec (MDELCC, 2015)

Pour chaque région étudiée, un portrait a été fait des ressources en eau, de leur fonctionnement, des réservoirs, de leur utilisation et des pressions anthropiques qui pèsent sur elles. Parmi ces nombreux aspects, la vulnérabilité des ressources a été évaluée à l'aide de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). Cette méthode largement utilisée au Québec pour définir la vulnérabilité des nappes au droit des puits, a été étendue afin de spatialiser cette connaissance locale sur l'ensemble des territoires. Les études portant sur des sources et risques de pollution comme les métaux lourds (Bondu *et al.*, 2020) et les pesticides (Barbecot, 2020a) et le constat d'une croissance continue de la pression humaine sur la ressource en eau ont renforcé le besoin de mieux anticiper la vulnérabilité des ressources en eau.

Dans le rapport prospectif visant le renforcement de la protection des puits municipaux en lien avec l'utilisation de pesticides (Barbecot, 2020b), il a été suggéré d'investiguer l'apport des index de vulnérabilité chimique pour améliorer la connaissance du risque de pollution des ressources en eau souterraine. C'est dans cet objectif que le MELCC a confié à Hydro-Sciences UQAM (Prof. responsable F. Barbecot) un travail inclusif de test, d'amélioration et de validation de l'approche par indice géochimique de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Chaque région ayant ses propres caractéristiques géochimiques, il a été nécessaire de tester et adapter cette approche hydro-géochimique en fonction des contextes hydrogéologiques reconnus au Québec.

## 1.2 Notion de risque et ses composantes

Née au 16<sup>ème</sup> siècle dans le domaine des assurances maritimes, la notion de risque est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines (social, économique, technologique, politique et écologique). Au fil du temps, la conception du risque a évolué de plusieurs manières en incluant notamment des notions de vulnérabilité de plus en plus étendues, souvent difficiles à contraindre (Dauphiné *et al.*, 2013). L'objectif de cette partie est de rappeler les notions de vulnérabilité propres aux eaux souterraines afin de pouvoir conduire les lecteurs dans les raisonnements qui soutiennent notre travail.

Le risque est généralement défini par la combinaison d'un aléa et de la vulnérabilité d'un système (enjeu). Par **aléa**, on entend un danger précis, qui peut impacter un enjeu, ici la ressource en eau, présent sur le territoire. Il est défini par une intensité, une occurrence spatiale et temporelle ([UVED \(mines-paristech.fr\)](http://www.mines-paristech.fr)). Dans le contexte de cette étude, l'aléa pourrait correspondre très schématiquement au déversement d'un polluant au sol, et l'**enjeu** à la ressource en eau souterraine exploitée pour l'alimentation en eau potable (Figure 3).

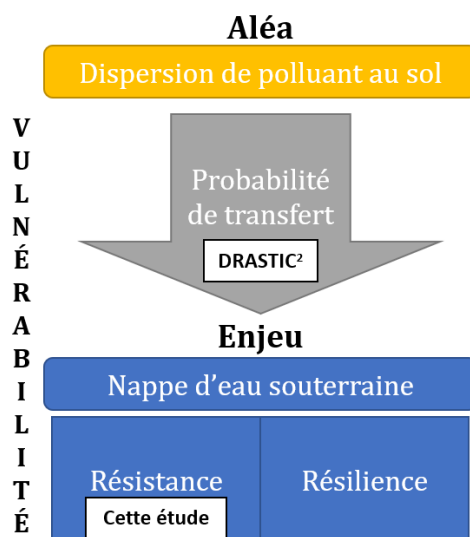


Figure 3 : Représentation schématique des composantes de la notion de risque appliquée au cas de la ressource en eau souterraine

La notion de **vulnérabilité** est décrite par trois composantes (Dauphiné *et al.*, 2013): la probabilité que la pollution atteigne la ressource en eau, c'est-à-dire que l'aléa atteigne l'enjeu, mais également des propriétés propres à l'enjeu : la **résistance** et la **résilience**. La résistance peut être définie comme la capacité de l'enjeu à résister à l'aléa, tandis que la résilience caractérise la capacité de retour à la normale de l'enjeu après l'évènement de pollution. Appliquée aux eaux souterraines, la vulnérabilité serait décrite comme ceci :

- La probabilité de transfert du polluant vers la nappe d'eau souterraine qui s'exprime par **la vulnérabilité des barrières naturelles protectrices**. Typiquement, l'approche de type DRASTIC permet une évaluation satisfaisante de cette vulnérabilité de barrière<sup>2</sup>.
- L'intensité avec laquelle la ressource peut être affectée par le polluant et qui rend compte de la sensibilité intrinsèque de la ressource (intensité de dégradation). Pour les eaux souterraines, c'est le paramètre inverse de la sensibilité, la **résistance** de la ressource, qui sera utilisé.
- Enfin, la vulnérabilité s'exprime également dans la dimension temporelle par le temps nécessaire à la ressource pour retrouver un état de qualité satisfaisant après l'épisode de pollution : la **résilience de la ressource**.

<sup>2</sup> composante principale de l'information donnée par l'indice DRASTIC

Comme le soulignent de nombreux auteurs (Dauphiné *et al.*, 2013; November, 2006), la concomitance de l'aléa et de l'enjeu/vulnérabilité de l'enjeu est obligatoire pour définir un risque. Quel que soit l'aléa concerné, s'il n'y a pas d'enjeu, le risque n'existe pas. C'est pour cette raison que la notion de risque est usuellement exprimée selon la formule : **risque = aléa x vulnérabilité**. L'indice DRASTIC ne décrivant qu'une partie de cette vulnérabilité, il est nécessaire de développer de nouveaux outils pour inclure dans la protection de la ressource les autres composantes que sont la résistance et la résilience. Dans ce contexte, ce projet de recherche vise à caractériser la résistance des ressources en eau de la moitié sud du Québec, par une approche complémentaire à celles développées dans le cadre des PACES.

### 1.3 Protéger les ressources

La protection des ressources en eau s'appuie en grande partie sur l'anticipation des risques de contamination (Figure 4). La mise en place d'une législation adaptée a significativement réduit les probabilités d'occurrence de contamination en surface, mais les activités anthropiques sont en croissance perpétuelle et potentiellement à l'origine de plus en plus de pollutions. Depuis les années 60, de nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer la vulnérabilité des barrières naturelles protectrices des ressources en eau. Introduite par Aller en 1987 (Aller *et al.*, 1987), la méthode DRASTIC fait encore aujourd'hui partie des méthodes les plus utilisées car elle est rapide et facilement applicable à l'échelle régionale (Rajput *et al.*, 2020). L'indice DRASTIC est composé de 7 paramètres qui caractérisent la ressource et son environnement dans une vision purement verticale : la profondeur de la nappe, la quantité de recharge, la lithologie de l'aquifère, le type de sol, l'impact de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère. Si l'on se réfère à la définition de la vulnérabilité proposée dans la partie 1, l'indice DRASTIC décrit bien la composante probabiliste de la vulnérabilité, en estimant la capacité ou non d'un polluant de surface à se transférer jusque dans la nappe sous-jacente. N'intégrant qu'une assimilation ponctuelle et verticale du transfert, il ne permet pas d'aborder correctement les composantes de résistance (sensibilité) et de résilience dans la description de la vulnérabilité de la ressource en eau. Ceci n'est pas surprenant puisque ces notions sont plus récentes et rationalisent une faiblesse souvent mise en avant des approches de type DRASTIC : ne pas réussir à bien représenter spatialement les secteurs où l'on retrouve des polluants dans les eaux souterraines (Mezonnat *et al.*, 2016).

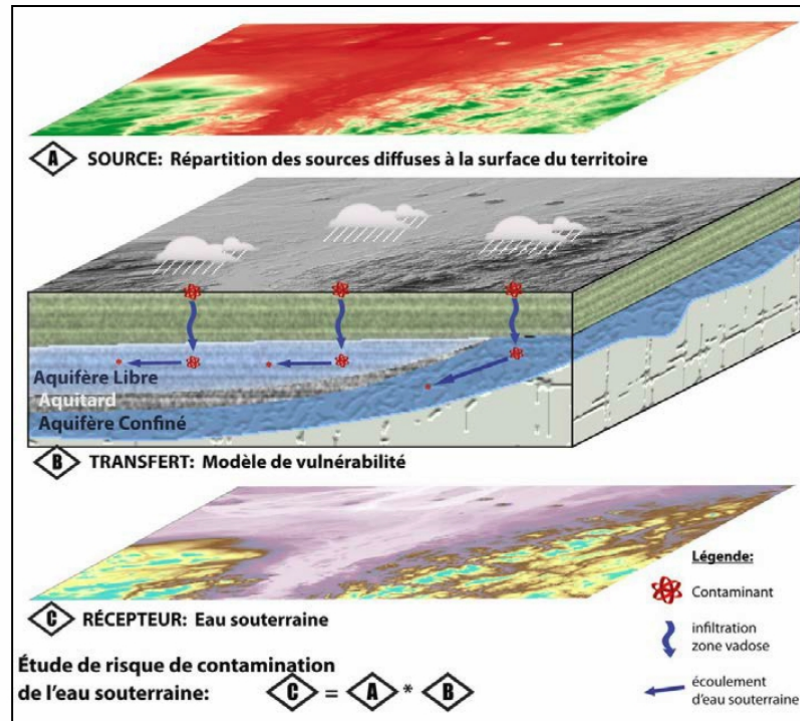


Figure 4: Approche de la notion de risque de contamination par le couplage d'un aléa et de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine (Meyzonnat, 2012)

Dans ce travail, l'approche géochimique développée vise à apporter un regard nouveau et plus intégrateur sur l'évolution géochimique des eaux souterraines pour caractériser la composante résistance de la ressource en eau souterraine face aux pollutions qui l'atteignent. Cette propriété (résistance) va en premier ordre varier en fonction (i) de l'importance de la ressource (volume du réservoir) et (ii) de l'intensité et de la distribution de son renouvellement. Par extension, la résistance d'une masse d'eau souterraine sera une propriété intégrant des paramètres tels que la porosité efficace, la géométrie de l'aquifère (volume) et des conditions aux limites comme la recharge. Très schématiquement, un petit réservoir à fort taux de renouvellement sera moins résistant (plus vulnérable) face aux pollutions anthropiques qu'un réservoir de grande taille alimenté par un faible taux de renouvellement (Tableau 1, (Arnoux *et al.*, 2017b)).

Tableau 1 : Résistance des réservoirs d'eau souterraine en fonction de leur taille et de leur taux de renouvellement

	Petite taille de réservoir	Grande taille de réservoir
Faible taux de renouvellement	Résistance moyenne	Résistance forte
Fort taux de renouvellement	Résistance faible	Résistance moyenne

L'hydrogéologie illustre le déplacement des eaux souterraines depuis les aires de recharge vers les zones de décharge par des lignes d'écoulement. Ce trajet est plus ou moins long (distance, temps) en fonction de la taille de l'aquifère, de ses propriétés intrinsèques (porosité cinématique, conductivité hydraulique) et des conditions aux limites (différences de charges hydrauliques de l'amont à l'aval). Dans un système simple où il n'y a qu'une seule zone de recharge bien délimitée en amont d'un territoire (Figure 5), le temps de résidence moyen de l'eau souterraine augmente conjointement avec la résistance à une éventuelle pollution en zone de recharge.

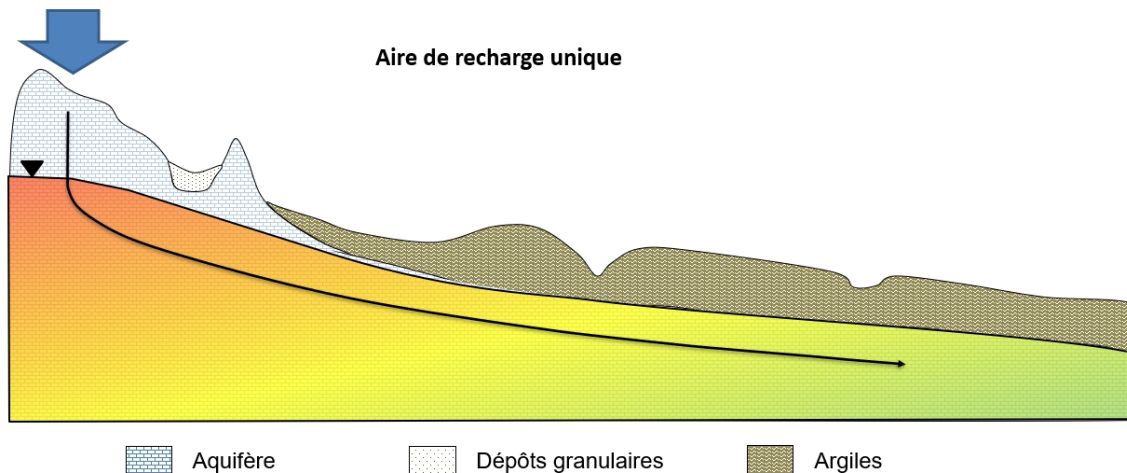


Figure 5 : Coupe schématique des écoulements souterrains dans un aquifère avec une aire de recharge unique et évolution de la résistance de la nappe de l'amont vers l'aval de la ligne d'écoulement principale (rouge = pas résistant et vert = fortement résistant)

En général, le temps de séjour n'est pas distribué de façon homogène dans les aquifères : la recharge se faisant selon des flux verticaux sur une masse d'eau dont le déplacement principal est horizontal (Figure 6). Au sein d'un aquifère, la résistance de la ressource en eau souterraine augmentera avec le temps de résidence apparent des eaux ("Protection des captages : la connaissance de l'âge de l'eau, une donnée clef," 2021).

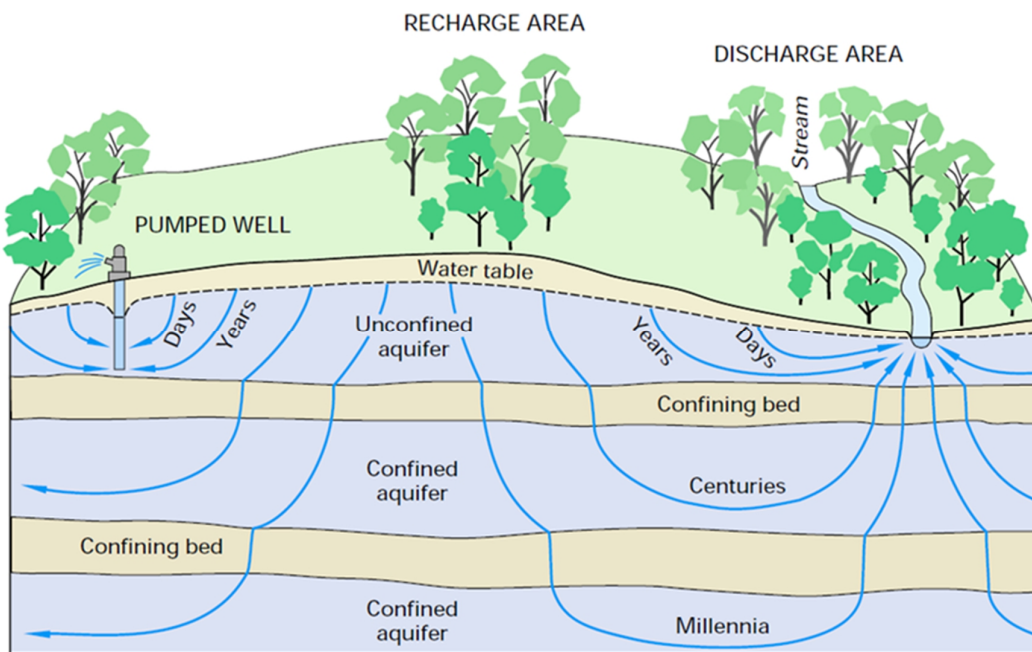


Figure 6: Schéma conceptuel des temps de séjour des eaux souterraines en fonction des chemins parcourus (Winter *et al.*, 1998)

Lorsque la recharge n'est plus ponctuelle, mais distribuée dans l'espace, la résistance de la ressource diminue au droit des zones d'infiltration. En effet, le mélange d'eau de la ligne d'écoulement principale avec des eaux plus récentes issues de zones de recharge ponctuelles diminue la résistance de la ressource, une évolution bien représentée par la diminution de son âge apparent (Figure 7). La résistance va augmenter lentement avec l'éloignement de la zone de recharge contrairement à la vulnérabilité des barrières naturelles (DRASTIC) qui par sa construction strictement verticale n'intègre pas la composante horizontale, pourtant dominante, dans l'écoulement des eaux souterraines (Corcho Alvarado *et al.*, 2008).

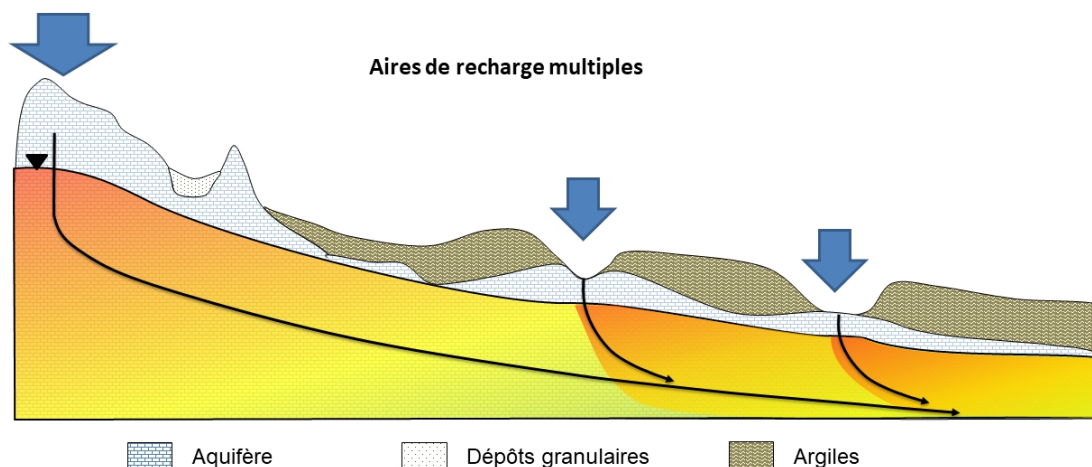


Figure 7 : Coupe schématique des écoulements souterrains dans un aquifère avec de multiples aires de recharge et évolution de la résistance de la nappe de l'amont vers l'aval de la ligne d'écoulement principale (rouge = pas résistant et vert = fortement résistant)

Il est primordial de prendre en compte cette notion de transport à la fois vertical et horizontal de l'eau dans les systèmes aquifères pour caractériser au mieux la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines. Pour cela, il suffirait de pouvoir définir le champ de distribution du temps de séjour apparent de l'eau souterraine. Il existe des méthodes de datation qui permettent de mesurer les différentes gammes d'âges présents dans les aquifères (Tritium, Carbone-14, CFC/SF<sub>6</sub>). Lorsqu'elles existent, ces données ont permis d'identifier une évolution temporelle de la chimie des eaux (Méjean *et al.*, 2016; Saby *et al.*, 2016; Vautour *et al.*, 2015) et de la discuter (Darling *et al.*, 2012; Gooddy *et al.*, 2006). Mais elles sont encore peu accessibles, les données sont rares et l'expression des teneurs mesurées en âge est délicate dans le cas de systèmes complexes présentant des zones de mélanges. En nous appuyant sur les éléments majeurs présents dans l'eau, nous proposons ici une clé de lecture de l'évolution hydrochimique des eaux souterraines le long de leur parcours depuis les aires de recharge jusqu'aux lignes d'écoulement profondes. Cette clé permet de traduire cette évolution hydrochimique en temps de séjour apparent de l'eau en milieu souterrain et d'aboutir à l'expression de la résistance des masses d'eau souterraines.

#### 1.4 Objectifs et phases de travail

Trois objectifs principaux ont été définis pour mener à bien ce projet :

1. Développer un indice de résistance chimique (IRC) pour l'ensemble des régions couvertes par les PACES, en s'inspirant de l'indice de vulnérabilité chimique développé par Meyzonnat *et al.* (2016) pour le PACES de la Bécancour,

2. Réaliser des cartes de cet IRC des eaux souterraines sur les régions PACES,
3. Tester la robustesse et l'utilité de ce nouvel IRC par rapport aux contextes et aux indices préalablement calculés dans le cadre des PACES (notamment l'indice DRASTIC).

Pour atteindre ces objectifs, le travail s'est articulé autour de cinq principales étapes :

- 1) Phase de sélection/validation des données hydrochimiques ;
- 2) Phase de reconnaissance des processus chimiques dominants lors de la recharge et de l'interaction des eaux avec la matrice ;
- 3) Phase de développement et d'adaptation de l'indice de résistance chimique à chacune des régions ;
- 4) Phase de réalisation de cartes d'indice de résistance chimique ;
- 5) Phase de comparaison/validation de la distribution des IRC par rapport à d'autres indicateurs de pollution (nitrates, pesticides) ou de vulnérabilité (DRASTIC) lorsque disponibles.

## 1.5 Résumé du travail réalisé pour chacune des phases

Les treize projets PACES ont été menés par sept équipes de recherche du Québec. Tous les projets ont fait l'objet de rendus sous la forme de rapports scientifiques et synthèses. À l'issue des trois premières phases de PACES réalisées entre 2009 et 2015, et avec l'aide des équipes de recherche ayant conduit ces projets, les agents du ministère ont construit des bases de données terrain et cartographiques très importantes et regroupant la presque totalité des informations acquises sur les ressources en eau dans les régions concernées. Ces données sont accessibles via Données Québec, sous différents formats (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/projets-d-acquisition-de-connaissances-sur-les-eaux-souterraines-paces>).

Certaines équipes ont bonifié leur étude de la qualité de l'eau par des analyses complémentaires ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  dans 9 régions,  $\delta^{13}\text{C}$  dans 4 régions, pesticides et résidus pharmaceutiques à Nicolet-Saint-François...) qui peuvent apporter des informations très pertinentes pour la protection et la vulnérabilité des ressources.

Une synthèse de ces informations a été entreprise pour la phase deux du projet, notamment pour discuter des principales interactions eau-roche attendues. Pour nous assurer que nous avons accès aux informations les plus pertinentes ainsi qu'au regard critique de ceux qui ont produit ces données, il a été choisi de contacter les responsables de l'aspect hydrochimie de chaque PACES (Tableau 2).

Un premier travail de synthèse des données géochimiques a été effectué par le professeur V. Cloutier et son équipe de l'UQAT dans le cadre d'un mandat donné par le MELCC (Bondu *et al.*, 2019). L'équipe de l'UQAT a été contactée en premier afin de discuter des actions prises pour construire leur base de données comportant 2608 puits analysés (base de données nommée ici BD-V1). Ensuite, dès l'automne 2020, nous avons pris contact avec les personnes ressources pour les autres PACES. Par la suite, des échanges avec les équipes ont eu lieu tout au long du projet afin de valider les hypothèses de travail et les critères de sélection des puits échantillonnés.



**Tableau 2 : Liste des personnes référentes contactées pour chaque PACES étudié**

<b>PACES concerné</b>	<b>Personne contactée</b>	<b>Université/Institut de recherche</b>
ABTE 1 et 2	Vincent Cloutier, Eric Rosa	UQAT
CHCN et SLSJ	Julien Walter	UQAC
BEC, NSF et VS	Marie Larocque, Sylvain Gagné	UQAM
NEBSL	Gwénaëlle Chaillou	UQAR
CMQ et OUT	Yohann Tremblay	Laval
CA et ME	René Lefebvre	INRS
MAU	Yves Leblanc	UQTR

Phase 1 :

La base de données BD-V1 réalisée par l'équipe de V. Cloutier reprend les résultats analytiques des 13 PACES entre 2009 et 2015 ainsi que des trois projets pré-PACES (entre 1998 et 2006) (Bondu *et al.*, 2019). Seuls les résultats analytiques des échantillons d'eau souterraine directement prélevés par les équipes de recherche réalisant ces projets ont été inclus dans cette base de données. Les nombreux suivis complémentaires ayant été recensés lors des projets, tels des suivis de la qualité de l'eau réalisés par des municipalités, ont été mis à l'écart. L'UQAT a appliqué sa propre méthodologie de validation et de sélection des données BD-V1 utilisées pour réaliser la synthèse des données géochimiques des PACES et pré-PACES ((Bondu *et al.*, 2020)).

La prise en main de la base de données géochimique BD-V1 a nécessité un travail conséquent d'analyse des différentes données disponibles afin de s'assurer de leur bonne lecture et interprétation. Des échanges techniques ont eu lieu avec Raphaël Bondu et Magalie Roy (Equipe du Professeur V. Cloutier) sur les méthodes employées pour la réalisation de la compilation telle que reçue. Pendant cette période d'appropriation, nous avons également contacté Yohann Tremblay, Julien Walter, Vincent Cloutier, Marie Larocque et Sylvain Gagné ainsi que le laboratoire ayant réalisé la majorité des analyses chimiques afin de s'assurer de la validité des données et des critères de sélection choisis.

Un premier tri des données BD-V1 a été effectué dans le cadre de cette étude spécifique selon 3 critères :

- 1) Analyse complète des ions majeurs (HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, Ca, Mg, Na et K) ;
- 2) Mesures de pH disponibles ;
- 3) Balance ionique (BI) comprise dans  $\pm 10\%$  pour tous les échantillons ayant une minéralisation totale (TDS) supérieure à 200 mg.L<sup>-1</sup>.

Pour éviter les confusions, la base de données ainsi triée sera nommée BD-V2 pour la suite du projet.

Les étapes de validation des données et le choix des critères de sélection réalisés dans cette phase sont détaillés et explicités dans la première partie du chapitre 2 de ce rapport. Pour chaque région, le nombre de puits pour lesquels les résultats analytiques ont été conservés est indiqué lors de la présentation des résultats dans le chapitre 3.

Phase 2 :

La phase 2 a débuté par un important travail de synthèse bibliographique basé sur les rapports PACES et sur les articles scientifiques associés, afin de réaliser une synthèse hydrogéologique adaptée à ce projet pour chaque région concernée par la base de données. Cette synthèse a été complétée par une analyse des faciès géochimiques des eaux souterraines grâce à la représentation de la chimie des eaux dans le diagramme de PIPER et au calcul des indices de saturation vis-à-vis de la calcite (nommés

$IS_{\text{calcite}}$  ci-après). Une évaluation statistique du portrait des eaux en fonction de leur contexte hydrogéologique associé ou bien de la minéralisation des aquifères a aussi été réalisé pour compléter la caractérisation de chaque région. Pour ce faire, les puits ont été classés en 4 catégories selon les contextes hydrogéologiques (Granulaire Libre, Granulaire Captif, Roc Libre et Roc captif) et en 3 catégories pour le type de minéralisation (silicates, carbonates et indéterminé). La réalisation des diagrammes d'évolution hydrochimique (DEH) mettant en relation le bilan Na-Cl versus le bilan  $(Ca + Mg) - (HCO_3 + CO_3 + SO_4)$  a permis de mettre en évidence les processus dominants dans les aquifères : dissolution, altération des minéraux, échanges cationiques avec les argiles, mélanges. Les synthèses hydrogéologiques sont présentées dans le chapitre 3.

#### Phase 3 :

La phase 3 regroupe l'ensemble du travail de modélisation géochimique réalisé pour chaque région afin de comprendre, quantifier et valider l'impact réel des différents processus sur la chimie des eaux et par conséquent sur la position des points représentatifs des masses d'eau dans le DEH. La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel PHREEQC (Parkhurst *et al.*, 2013). Créé par T. Appelo, ce logiciel est la référence dans le domaine des calculs de spéciation, de calcul des équilibres solides – solution et de modélisation des interactions eau – roche. Pour chaque région, les modélisations ont été ajustées pour représenter au mieux les distributions des faciès hydrochimiques. Ce travail a nécessité de revenir à la base des équations et équilibres chimiques qui contrôlent les processus de dissolution et d'altération en milieu aqueux. Pour ce faire, nous avons sollicité la collaboration scientifique de M<sup>me</sup> M. Gillon (professeure à l'Université d'Avignon, France), spécialiste en hydrogéochimie et en modélisation géochimique. Dans les milieux silicatés, cette approche par modélisation a abouti à la construction et l'optimisation d'un indice de résistance chimique plus sensible que l'indice basé uniquement sur le DEH. Dans le cas des aquifères carbonatés, les cinétiques de réaction n'ont pas permis de réaliser une optimisation de l'indice complexe. L'approche basée sur le DEH s'est avérée la plus robuste et a donc été conservée.

Dans cette phase, nous avons choisi de ne pas inclure les eaux ayant des caractéristiques atypiques comme des minéralisations trop fortes ( $TDS > 1500 \text{ mg.L}^{-1}$ ), un faciès chloruré-calcique, ou un indice de saturation vis-à-vis de la calcite incohérent pour des eaux naturelles ( $IS_{\text{calcite}} > 1$ ). Ainsi, les résultats analytiques de 12 % des puits de la base de données ont été exclus du calcul d'indices. Pour les 2054 puits restants sur l'ensemble des secteurs étudiés, les indices ont été calculés selon la méthode adaptée au type de minéralisation. La méthodologie développée dans cette phase est présentée dans la seconde partie du chapitre 2 et les résultats sont présentés dans le chapitre 3 à la suite des synthèses hydrogéologiques.

#### Phase 4 :

Le travail cartographique de la phase 4 a été réalisé à l'aide du logiciel QGis. Grâce aux coordonnées spatiales des puits présentes dans la base de données, les indices ont pu être spatialisés. Les données spatiales issues des PACES (couche DRASTIC...) ont été recueillies sur le site web du ministère afin de réaliser les fonds de carte pour l'ensemble des secteurs. Une carte a été réalisée pour chaque région. Les cartes sont présentées et interprétées dans la partie résultat du présent rapport (voir chapitre 3).

#### Phase 5 :

La comparaison des indices de résistance chimique et des indices DRASTIC a été réalisée sur la base des cartographies réalisées en phase 4. Contrairement à la vision verticale de DRASTIC, les indices de résistance sont intégrateurs des parcours souterrains des lignes d'eau, depuis les aires de recharge jusqu'au puit de prélèvement. Il s'est avéré plus pertinent d'examiner la concordance spatiale de ces indices avec la distance des aires vulnérables décrites par DRASTIC plutôt que de retranscrire les

valeurs de chaque indice dans des graphiques binaires IRC vs DRASTIC. Lorsque jugé pertinent, les indices de résistance obtenus ont été comparés avec les teneurs en nitrates observées dans les nappes afin de caractériser le lien supposé entre la résistance des masses d'eau et les contaminations observables dans les eaux souterraines. Les interprétations de ces comparaisons sont présentées dans les chapitres 3 et 4.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Sélection/validation des données

#### 2.1.1 Analyse des données disponibles et de leur fiabilité

La BD-V1 compilée par l'équipe de Vincent Cloutier contient 66 champs correspondant aux informations les plus souvent collectées sur l'ensemble des PACES. Cependant, la plupart ne sont pas renseignés de manière systématique dans la base de données (Tableau 3). En effet, certains paramètres n'ont pas été analysés dans le cadre de tous les PACES en raison de l'adaptation de chaque projet aux contextes et besoins locaux. C'est le cas notamment pour certains éléments chimiques mineurs (PO<sub>4</sub>) et traces (Be, Bi, Mo, Sn, Ti et V) dont nous ne tiendrons pas compte dans ce projet.

Tableau 3 : Synthèse du nombre de données manquantes par champs inclus dans la base de données géochimiques

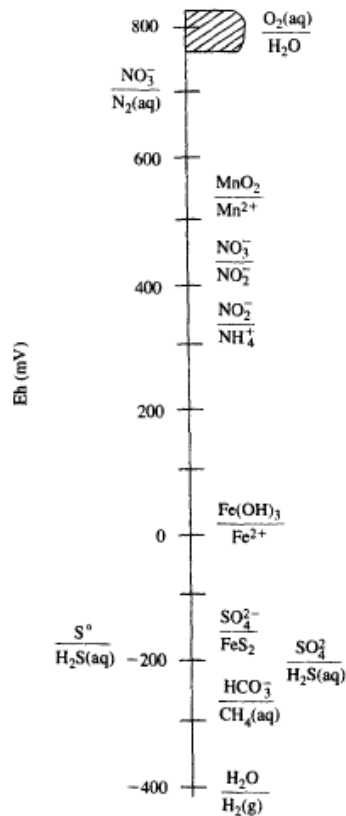
Champs	Données absentes		Champs	Données absentes	
	nombre	%		nombre	%
<b>Caractérisation physique/géographique</b>			<b>Éléments chimiques mineurs</b>		
Synthese_id	0	0%	CO <sub>3</sub>	32	1%
MELCC_id	2608	100%	Br	6	0%
PACES_id	0	0%	Si	9	0%
Date	127	5%	F	28	1%
X_QL	0	0%	B	7	0%
Y_QL	0	0%	HS_S	113	4%
Z	1	0%	NH <sub>3</sub> _N	92	4%
Municipalite	0	0%	PO <sub>4</sub> _P	99	4%
Affectation_puits	1	0%	Sr	3	0%
Type_captage	347	13%	Fe	9	0%
Prof_puits	184	7%	Mn	8	0%
Prof_casing	1705	65%	Al	8	0%
Annee_puits	1543	59%	<b>Éléments chimiques traces</b>		
Diam_puits	1526	59%	Ba	9	0%
Type_aquifere	13	0%	Ag	53	2%
Hydrogeol	401	15%	As	20	1%
Geol	250	10%	Be	470	18%
Age_formation	278	11%	Bi	470	18%
Strati	72	3%	Cd	59	2%
<b>Paramètres physico-chimiques</b>			Co	470	18%
T	42	2%	Cr	6	0%
pH	98	4%	Cu	6	0%
CE (inscrite SC)	36	1%	Li	124	5%
O <sub>2</sub>	553	21%	Mo	470	18%
O <sub>2</sub> _p	1453	56%	Ni	8	0%
Eh	687	26%	Pb	59	2%
<b>Éléments chimiques majeurs</b>			Sb	396	15%
tot_alc	32	1%	Se	132	5%
HCO <sub>3</sub>	32	1%	Sn	470	18%
SO <sub>4</sub>	7	0%	Ti	470	18%
Cl	1	0%	U	213	8%
NO <sub>3</sub> _NO <sub>2</sub> _N	15	1%	V	470	18%
Ca	0	0%	Zn	7	0%
Mg	0	0%			
Na	0	0%			
K	0	0%			

Malgré l'important travail de collecte d'information des différentes équipes de recherche et la volonté d'uniformisation de la méthodologie à l'échelle de tous les projets, certains renseignements se sont avérés impossibles à obtenir, notamment concernant les propriétés des puits échantillonnés (profondeur du puits, profondeur du tubage, année de création, formation géologique rencontrée, contexte hydrogéologique). En effet, dans un contexte d'étude de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine, il serait utile de pouvoir relier la qualité d'une eau échantillonnée à son milieu aquifère ainsi qu'à la profondeur à laquelle elle est puisée. Dans le cas des puits privés, ces informations sont souvent partielles, ce qui renforce la nécessité de trouver d'autres moyens d'affiner les connaissances sur les puits à partir des données facilement accessibles, à savoir les paramètres physico-chimiques et les analyses géochimiques. Ces paramètres contenus dans la base de données sont discutés ci-après.

#### *2.1.1.1 Cas des paramètres physico-chimiques mesurés in situ*

##### Oxygène dissous et potentiel redox :

L'oxygène dissous et le potentiel redox ne sont pas renseignés de manière homogène sur les différents PACES : certains ont un seul des deux paramètres, d'autres ont des mesures manquantes de ces deux paramètres sur certains puits. Les conditions d'oxygénation du milieu apportent une information importante sur les processus chimiques qui peuvent être à l'origine de la qualité de l'eau. Elles contrôlent en grande partie la spéciation des éléments majeurs présents dans l'eau (Figure 8). Les mesures d'oxygène dissous sont généralement plus faciles à faire, mais elles ne couvrent pas la moitié du spectre du potentiel redox. En effet, les teneurs en oxygène dissout varient dans les eaux naturelles d'environ 8 mg.L<sup>-1</sup> à 0 mg.L<sup>-1</sup> pour une gamme de potentiel redox comprise entre +800 et +200 mV (Langmuir, 1997). L'information obtenue est donc partielle. Le potentiel redox est plus difficile à mesurer sur le terrain et pour chaque type d'électrode utilisé, une correction de la mesure de terrain doit être faite. À partir des documents mis à notre disposition (base de données et rapports PACES), aucune information précise sur les mesures et sur les corrections, si réalisées, n'a été trouvée. Les échanges avec les référents PACES n'ont pas permis de combler cette lacune et de déterminer la valeur réelle de ces mesures. Ces données ont été mises de côté du fait de l'observation de nombreuses incohérences: des potentiels redox significativement supérieurs à 200 mV avec une concentration en O<sub>2</sub> dissout égale à 0, ou à l'inverse, un potentiel redox inférieur à 100 mV avec des teneurs en O<sub>2</sub> dissout supérieures à 0.



**Figure 11.10** The theoretical Eh (mV) of some important oxidation-reduction couples at equal molar ion concentrations except as indicated below, at pH = 7 and 25°C. Cross-hatched area gives Eh's for  $O_2(aq)/H_2O$ , where  $O_2(aq)$  ranges from 8.25 to 0.01 mg/L. Other conditions are:  $NO_3^-/N_2(aq)$  at  $N_2(aq) = 14$  mg/L (atmospheric  $N_2 = 0.80$  bar),  $NO_3^- = 62$  mg/L;  $MnO_2(\text{pyrolusite})/Mn^{2+}$  at  $Mn^{2+} = 1$  mg/L;  $Fe(OH)_3/Fe^{2+}$  at  $Fe^{2+} = 10^{-38.5}$ ;  $SO_4^{2-}/FeS_2(\text{pyrite})$  at  $Fe^{2+} = 1$  mg/L and  $SO_4^{2-} = 96$  mg/L; and  $S^0(\text{native sulfur})/H_2S(aq)$  at  $H_2S(aq) = 108$  mg/L ( $10^{-1.5}$  mol/L). After D. Langmuir, Physical and chemical characteristics of carbonate water. In *Guide to the hydrology of carbonate rocks*, ed. P. E. Lamoreaux, B. M. Wilson, and B. A. Memeon. Copyright 1984 by UNESCO. Used by permission.

**Figure 8:** Représentation des principaux couples d'oxydo-réduction en fonction du potentiel redox de l'eau (Langmuir, 1997)

#### pH et conductivité électrique :

Certaines données des paramètres de pH et de conductivité électrique sont manquantes, sûrement en raison de problèmes techniques rencontrés sur le terrain. Les procédures de calibration et les incertitudes sur les mesures ne sont pas reportées. Si une mesure de pH effectuée à posteriori en laboratoire peut être source d'incertitude, celle de la conductivité électrique en revanche est tout à fait réalisable avec une précision satisfaisante. Il serait donc pertinent que les laboratoires accrédités pour les analyses géochimiques des eaux puissent faire ces analyses en laboratoire lorsque la donnée n'a pas pu être mesurée sur le terrain. Dans le cas de la BD-V1, 98 analyses n'ont pas de données de mesure du pH. La spéciation du carbone inorganique calculée avec un pH hypothétique de 7 était présente dans la BD-V1. Toutefois, le choix a été fait de n'inclure dans la BDV-2 que des données mesurées ou recalculées avec des paramètres dont les mesures ont été validées et inscrites dans la base de données. De façon générale, l'incertitude sur la mesure *in situ* n'est pas explicite et il n'est pas possible de propager l'erreur dans les calculs de spéciation pour la validation des BI. Ce problème est significatif car le pH joue énormément sur la spéciation du carbone et donc sur l'équilibre chimique des eaux.

Dépendamment des PACES, les mesures de conductivité électrique n'ont pas toutes été retranscrites dans la même unité : certaines étaient en  $mS.cm^{-1}$  et d'autres en  $\mu S.cm^{-1}$ . Un travail d'homogénéisation a donc été réalisé afin de ramener toutes les mesures en  $\mu S.cm^{-1}$ .

#### Température de l'eau :

Le paramètre de température est manquant pour 42 puits, et des valeurs très élevées pour la province ( $>15^\circ C$ ) sont observées dans 46 puits. La température peut avoir un impact significatif sur les

processus et les équilibres chimiques ayant lieu dans les nappes ainsi que sur la dissolution des gaz (notamment du CO<sub>2</sub>) dans l'eau. Contrairement aux autres paramètres physico-chimiques, il est possible à posteriori de recalculer la température de l'eau prélevée dans un puits à partir des données climatiques locales (i.e. températures moyennes annuelles de l'air) et de la profondeur des puits (Mezonnat *et al.*, 2018b).

Dans un souci de précision et d'homogénéité dans le traitement, les données climatiques ont été récupérées dans les rapports PACES lorsqu'elles étaient disponibles, ou sur le site du gouvernement dans le cas contraire (<https://environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/cartes/temperature-moyenne.pdf>). Pour chaque région, la température a donc été recalculée selon l'équation 1.

#### Équation 1 : Correction de la température

$$T_{\text{corrigée}} = T_{\text{moy-air}} + 1 + \frac{3}{100} * Prof_{\text{puits}}$$

Avec  $T_{\text{moy-air}}$  la température moyenne annuelle de l'air de la région concernée en °C, et  $Prof_{\text{puits}}$  la profondeur du puits en mètres.

Pour l'exemple, le graphique ci-dessous représente la droite théorique de température obtenue grâce à l'équation 1, mise en comparaison avec les données de terrain pour la région de Montérégie Est. Bien que les eaux des puits les moins profonds soient très éloignées de la droite théorique, ces derniers tendent à s'aligner sur la droite à moyenne et grande profondeur. Cela signifie que les facteurs externes réchauffant la température de l'eau (ex : pompes) ne sont significatifs que pour les puits peu profonds. Il a donc été choisi ici de recalculer l'ensemble des températures des eaux de ces puits avec les équations théoriques et d'utiliser cette valeur recalculée dans la suite du projet. Une nouvelle colonne comportant ces données a été ajoutée dans la BD.

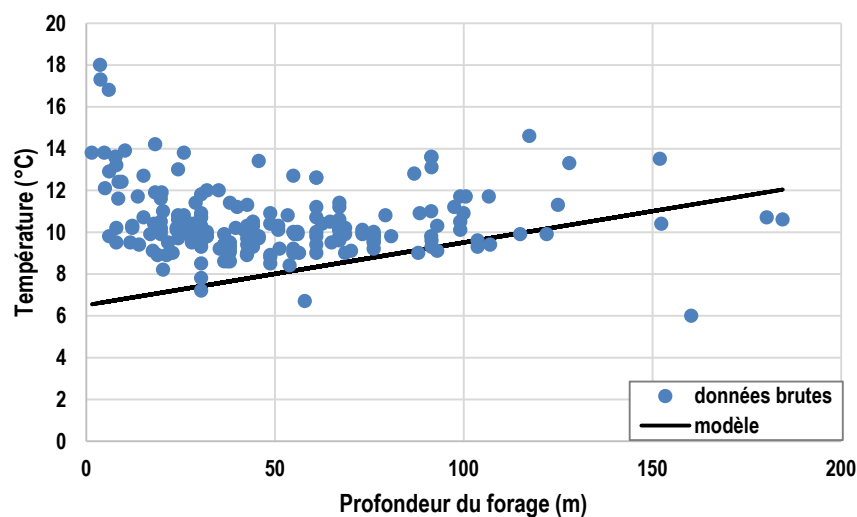


Figure 9: Exemple de températures mesurées *in situ* et modélisées pour la région PACES de la Montérégie Est

En conclusion, l'acquisition de données justes repose sur des mesures physico-chimiques de terrain réalisées selon un protocole normalisé et adapté selon les contextes et conditions de terrain. Ceci devra notamment inclure une stratégie relative à la qualité et la fréquence des calibrations des boîtiers utilisés pour mesures *in-situ*.

### 2.1.1.2 Cas des éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>)

Comme leur nom l'indique, les éléments majeurs sont présents en quantité significatives, généralement supérieures au mg.L<sup>-1</sup>, dans la majorité des eaux naturelles. Il peut arriver qu'un élément ne soit pas présent dans l'eau, en revanche il est impossible que l'ensemble des cations majeurs ou des anions majeurs soient absents. Un contrôle simple à effectuer à chaque retour d'analyse d'un laboratoire est donc de vérifier la présence de ces éléments. Dans la BD-V1, 9 échantillons présentent une absence totale de teneurs en cations majeurs. Ces échantillons ont donc été exclus de cette étude. De la même façon, la mesure d'alcalinité<sup>3</sup> manque pour 32 échantillons, qui ont aussi été écartés.

Un total de 41 échantillons a été retiré de la base de données sur ces critères, soit 1,5 % de la BD-V1.

### 2.1.1.3 Cas des éléments mineurs et traces

Les éléments mineurs et traces peuvent être ponctuellement présents en quantité significative en fonction des contextes locaux et des conditions redox des eaux souterraines. Les éléments mineurs ont été analysés dans tous les secteurs à l'exception de 4 % des échantillons pour lesquels certaines formes de nutriments (HS, NH<sub>3</sub> et PO<sub>4</sub>) n'ont pas été analysés. Dans le cas des éléments traces, certains manquent dans près de 20 % des analyses, car ils ont été considérés comme des compléments optionnels laissés au choix des équipes en fonction des contextes locaux. Il est donc normal que la base de données ne contienne pas de résultats de ces mesures pour certains PACES.

Dans le cadre de cette étude, les données manquantes dans ces éléments ne paraissent pas limitantes, ainsi aucun critère de rejet n'a été appliqué sur la base des analyses des éléments mineurs et traces.

## 2.1.2 Balance ionique

La seconde partie de la phase de tri de la BD-V1 s'est appuyée sur le critère le plus solide de validation des analyses : la balance ionique (BI). En effet, quelle que soit sa salinité, une eau naturelle doit être neutre électriquement, c'est-à-dire qu'elle doit comporter autant de charges négatives que de charges positives. Or les analyses chimiques réalisées sur les eaux comportent systématiquement un part d'erreur inhérente à la méthode analytique employée et aux procédures de contrôles et standardisations considérées dans les laboratoires. Afin de valider une analyse chimique, la balance ionique doit être calculée selon l'Équation 2, où les concentrations sont exprimées en meq.L<sup>-1</sup>.

### Équation 2 : Calcul de la balance ionique

$$BI = \frac{\Sigma cations + \Sigma anions}{\Sigma cations - \Sigma anions} * 100$$

À l'international, les spécialistes du domaine considèrent qu'une balance ionique est acceptable si elle est comprise entre -5 et +5 % (Appelo *et al.*, 2004; Clark, 2015). De nombreuses études relèvent cependant un seuil d'acceptabilité des balances ioniques jusqu'à +/-10 % (Adimalla *et al.*, 2020; Bondu *et al.*, 2020; Domenico *et al.*, 1998). Il est pertinent d'accroître le seuil de tolérance pour les eaux faiblement minéralisées, pour lesquelles les erreurs analytiques relatives sont plus importantes et approchent parfois les limites de quantification (Clark, 2015).

Si la formule est simple, la BI peut varier selon l'approche choisie pour son calcul. Le calcul de base, que l'on peut réaliser sur un tableur Excel, prend en compte les éléments majeurs tels qu'ils ont été

---

<sup>3</sup> Bien qu'une différence existe entre l'alcalinité et la mesure du Titre alcalimétrique (TAC), dans cette étude, ces deux notions ont été considérées comme équivalentes. Les deux termes sont donc utilisés dans ce rapport faisant référence aux mesures de TAC.



analysés dans l'eau:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  pour les cations et  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  pour les anions. Or, la spéciation<sup>4</sup> des éléments chimiques joue un rôle très important sur l'électroneutralité des solutions aqueuses. Et des biais de calcul de la BI sont fréquents lorsque la spéciation n'est pas prise en compte. Il est donc préférable de modéliser la spéciation de l'échantillon avec le logiciel PHREEQC (Parkhurst *et al.*, 1999) pour le calcul de la BI. De plus, il arrive régulièrement que des éléments dits « mineurs » soient présents dans des concentrations assez élevées pour ne plus être considérés comme secondaires et jouer de manière significative sur la balance ionique. C'est le cas des ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), du fer dissous ( $\text{Fe}^{2+}$ ) et des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), identifiés dans près d'une centaine d'analyses de la base de données.

A partir de la BD-V1, nous avons étudié de plus près ces balances ioniques, afin d'identifier s'il était judicieux d'exclure des analyses de notre étude par rapport à ce critère ou non. En parallèle de la récupération des BI issues de PHREEQC, un calcul uniquement basé sur les ions majeurs a également été réalisé à l'aide d'un tableur. Très simple, cette approche est utilisée pour comparer les résultats des deux méthodes et contrôler l'impact de la prise en compte de la spéciation des éléments et des teneurs en éléments mineurs sur la valeur des balances ioniques obtenues pour les eaux du Québec. Pour ce faire, plusieurs traitements de données ont dû être réalisés. En effet, certaines conversions issues de la volonté de comparer les résultats analytiques à des normes de potabilité ne sont pas pertinentes pour la base de données. Par exemple, les concentrations en phosphates sont exprimées en  $\text{mg.L}^{-1}$  de phosphore ( $\text{mg.L}^{-1} \text{P-PO}_4^{3-}$ ). Cette unité ne représente pas la mesure brute réalisée en laboratoire de la concentration en phosphates ( $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{PO}_4^{3-}$ ), et contraint l'utilisateur de la base de données à retranscrire les données traitées en données brutes. C'est aussi le cas pour l'azote mesuré sous forme de nitrates, nitrites et ammoniac. Les concentrations en nitrates sont aussi additionnées à celle des nitrites par les laboratoires. En effet, lors du traitement des analyses, ces derniers compilent l'ensemble des données pertinentes et ne permettent plus de vérifier la qualité des analyses. Cette présentation des résultats est conforme à la norme de santé<sup>5</sup> qui pose un seuil de potabilité de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  d'azote sous forme  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ , mais ne convient pas aux autres problématiques. Dans le cadre d'études de la qualité des eaux, les valeurs brutes issues des analyses en laboratoires devraient toujours être reportées et non uniquement leur somme utile pour valider un critère de potabilité. Sans cela, il faut faire l'hypothèse que les nitrites sont négligeables dans les échantillons analysés afin de ne prendre en compte que la forme nitrate pour la balance ionique. Cette hypothèse, souvent vérifiable dans le cas des eaux de surface, est cependant bien moins certaine dans certains contextes souterrains.

L'amélioration de la base de données passe par une évolution des paramètres devant y être inclus. Il est nécessaire de s'assurer que les rapports d'analyses des laboratoires incluent à l'avenir les valeurs brutes des nitrites et des nitrates de façon distincte.

Enfin, les valeurs d'alcalinité sont exprimées dans la BD-V1 en  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ . Cette unité est une conversion à partir de la mesure brute qui se fait en  $\text{mg.L}^{-1}$  ou en  $\text{meq.L}^{-1}$  de  $\text{HCO}_3^-$ . Malgré l'utilité de cette unité pour le contrôle de la dureté de l'eau, cette dernière n'est cependant pas adéquate lorsque l'on étudie plus largement la chimie de l'eau. Le maintien de cette unité peut induire des erreurs dans le traitement des bases de données à grande échelle. Il serait pertinent pour éviter toute erreur de calcul que les mesures d'alcalinité soient elles aussi transmises sous la forme de données brutes par les laboratoires, c'est-à-dire en  $\text{meq.L}^{-1}$  d' $\text{HCO}_3^-$ .

<sup>4</sup> La spéciation correspond à l'ensemble des formes chimiques que prend un élément dans une solution. Elle dépend en premier ordre du pH et du potentiel rédox des eaux.

<sup>5</sup> <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/annexe.htm#annexes>

En comparant les balances ioniques issues des deux modes de calcul (tableur simple versus PHREEQC), il apparaît que pour ce jeu de données, les résultats sont globalement concordants (Figure 10a). Il est toutefois important de noter que dans la gamme de valeurs de la BI située entre -20 % et +20 %, les deux méthodes renvoient des résultats partiellement différents (Figure 10b). Ainsi, la dispersion des points représentée dans la Figure 10b de part et d'autre de la droite de pente 1 indique que les deux modes de calcul ne permettent pas de faire ressortir les mêmes familles de points considérés à l'extérieur de la gamme de BI acceptable. Le calcul de la BI doit impérativement inclure la spéciation des éléments chimiques pour être rigoureux. Ainsi, il devient évident que si le calcul via le tableur apporte déjà un regard critique sur la qualité des analyses faites sur les eaux des projets PACES, cette approche n'est pas suffisante et ne devrait rester qu'une première étape de contrôle qualité. La modélisation Phreeqc étant plus rigoureuse et précise, il est important de réaliser le tri final sur les balances ioniques issues des modélisations plutôt que celles obtenues sur un simple tableur.

Le tableur doit ici être considéré comme un contrôle validant le processus d'acquisition des données hydrochimiques. Il permettrait de repérer automatiquement les analyses à refaire, mais un contrôle plus poussé reste nécessaire pour valider les bases de données.

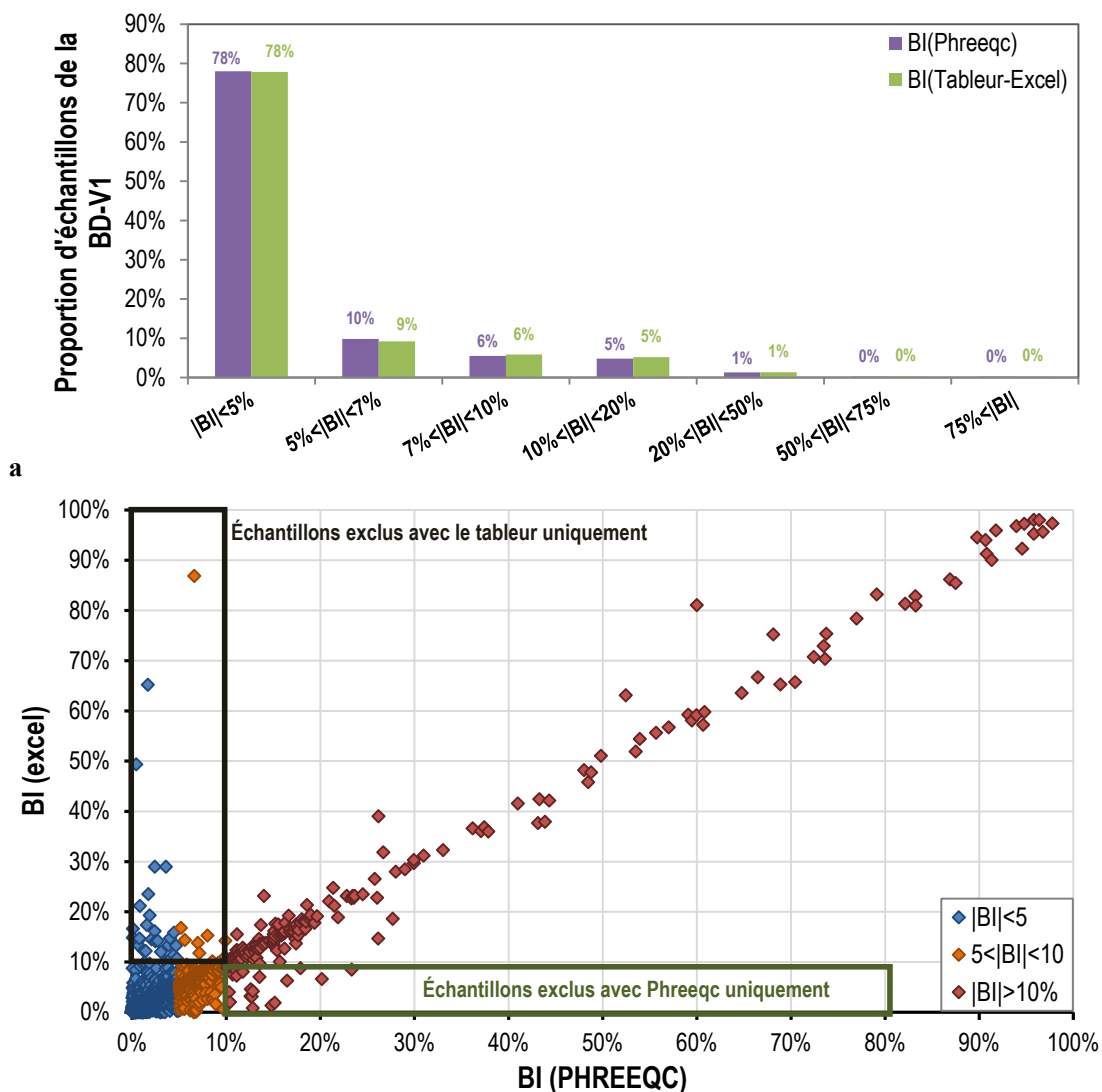


Figure 10: Comparaison statistique (a) et binaire (b) des résultats de la balance ionique des échantillons de la BD-V1 obtenus par tableur sous Excel (cette étude) et par modélisation PHREEQC (Bondu *et al.*, 2019)

Par la suite, les valeurs des balances ioniques peuvent être discutées au regard de la minéralisation des eaux (Figure 11). Les mesures de conductivité électrique n'ayant pas toujours été réalisées ou reportées dans les bases de données, la minéralisation totale (TDS = total dissolved solids) a été recalculée à partir de la chimie des échantillons. Pour faire ce calcul, nous avons utilisé le logiciel Diagrammes (Simler, 2020), qui propose une interface conviviale et en libre accès, pour des calculs simplifiés réalisés sous PHREEQC (<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>).

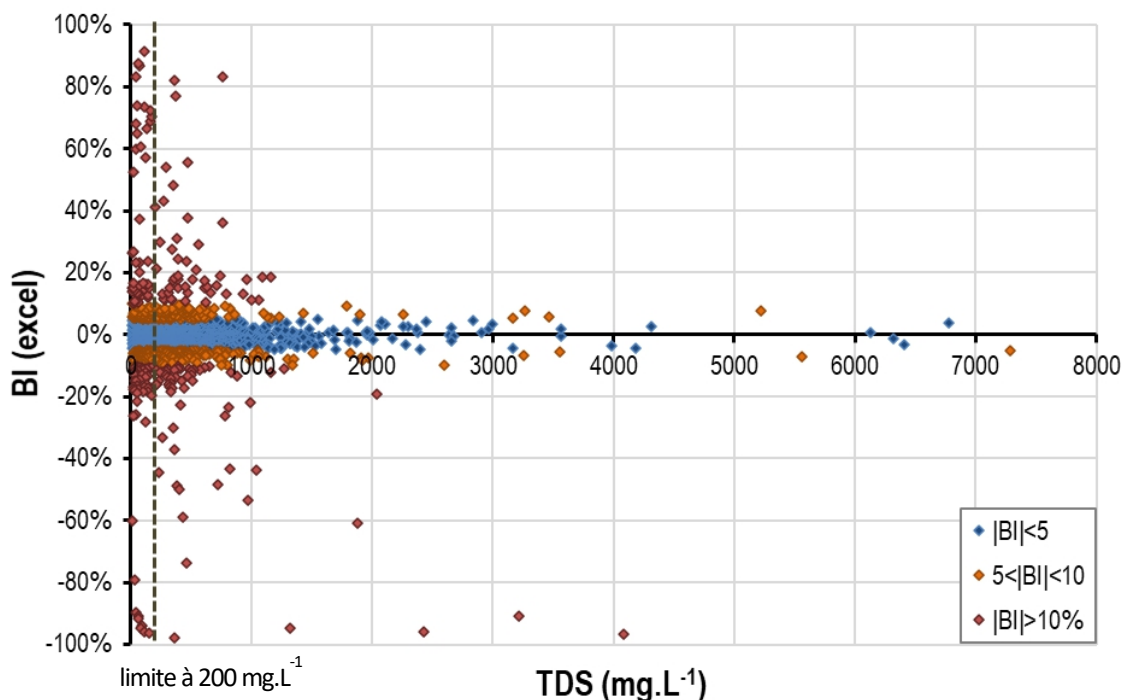


Figure 11: Relation entre la balance ionique calculée par PHREEQC et la minéralisation totale des eaux (TDS)

Comme attendu, les balances ioniques les moins bonnes sont associées à des échantillons de faible minéralisation. Bien que les teneurs mesurées pour les éléments majeurs soient souvent bien supérieures aux limites de détection, les incertitudes deviennent importantes sur des minéralisations trop faibles. Nous avons donc tenté de définir l'évolution de ces incertitudes pour chaque élément majeur, en nous tournant vers le laboratoire qui a réalisé la majorité des analyses des eaux des PACES. Cependant, aucune information n'a pu être obtenue au sujet de ces incertitudes car les analyses sont aujourd'hui trop anciennes pour obtenir cette information. De ce fait, tous les échantillons dont la minéralisation totale est inférieure à  $200 \text{ mg.L}^{-1}$  ont été conservés dans la BD-V2 quelle que soit la valeur de la balance ionique. Ces analyses doivent être considérées avec précaution, sachant que les incertitudes sont importantes. En revanche, pour les échantillons ayant une minéralisation suffisante pour que les incertitudes relatives demeurent négligeables (i.e. supérieur à  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ ), les balances ioniques supérieures à 10% illustrent un réel problème analytique. Ils ont donc été retirés de la base de données pour la suite de cette étude. Près de 100 échantillons ont été rejetés à cette étape (soit 3,8 % des données brutes).

La question des erreurs analytiques est importante, et à l'issue des échanges que nous avons eu avec les laboratoires concernés ainsi qu'un représentant de l'ordre de chimistes, il apparaît comme une nécessité pour les projets futurs de faire la demande du rapport des incertitudes au moment de la réalisation du devis pour l'analyse des échantillons.

### 2.1.3 Synthèse

La présente étude a utilisé la base de données géochimiques brutes compilées en 2019 par l'équipe de Vincent Cloutier regroupant les résultats analytiques de 2608 échantillons prélevés dans le cadre des 13 PACES réalisés entre 2009 et 2015 et des 3 projets pré-PACES réalisés entre 1998 et 2006. La fiabilité des données brutes a été évaluée afin de sélectionner les données appropriées pour atteindre les objectifs visés par la présente étude. Ainsi, les résultats analytiques de 244 échantillons (9 % des données) ont été écartés pour des raisons de données ou de qualité insuffisante. Des questions demeurent sur la validité de certaines analyses, en lien avec l'évolution des incertitudes des méthodes analytiques en fonction de la minéralisation totale, mais nous n'avons pas pu obtenir les réponses sur ce jeu de données.

Cette première phase a permis de mettre en lumière des sources d'incertitudes ou d'erreurs qu'il est difficile de corriger à posteriori à l'échelle de bases de données aussi importantes. Il serait beaucoup plus simple de proposer des bonnes pratiques pour les éviter au moment de l'acquisition et la récupération des données. Les points suivants ont plus particulièrement été relevés :

- Des concentrations retranscrites dans des unités inadaptées
- L'absence de données de conductivité électrique et de pH dues à des problèmes techniques de terrain
- Pas de validation des corrections sur les mesures de potentiel redox
- Analyses d'éléments majeurs manquantes ou erronées
- Pas de report des incertitudes analytiques, un point délicat pour les échantillons faiblement minéralisés (TDS < 200 mg.L<sup>-1</sup>)
- Erreurs de transcription entre rapports analytiques et la base de données

La qualité des données repose sur de bonnes pratiques et l'utilisation d'outils de validation. À titre d'exemple, la robustesse des bases de données géochimiques peut être améliorée grâce à l'utilisation d'un tableur formaté dans lequel la présentation des analyses sont normalisées et où le calcul de la balance ionique est automatisé. Au regard des incertitudes et biais identifiés par cette étude, il est proposé de réaliser une mise à jour des protocoles développés par les équipes scientifiques lors des PACES.

## 2.2 Évolution chimique des eaux souterraines et diagramme d'évolution hydrochimique

Les processus chimiques liés aux dynamiques des eaux naturelles ont été documentés par une multitude d'articles et plusieurs livres faisant synthèse de ces articles. Les informations présentées dans cette partie sont issues des livres de Langmuir (Langmuir, 1997), Appelo et Postma (Appelo *et al.*, 2005), Brantley (Brantley *et al.*, 2008), trois ouvrages qui font référence dans le domaine.

Cette partie du rapport reprend les aspects théoriques des différentes composantes de la minéralisation des eaux souterraines. Concrètement, le travail réalisé pour ce projet a comporté de nombreuses modélisations hydrochimiques sur les différents PACES. Après de nombreux tests et étapes de validation, nous avons opté pour la construction d'un indice multiple apportant une robustesse complémentaire à la lecture de la résistance des masses d'eau. Sa construction est décrite ici et correspond à une démarche d'amélioration de la compréhension des processus marquant la chimie des eaux souterraines.

## 2.2.1 Processus chimiques majoritaires dans les aquifères

Quel que soit l'aquifère considéré, l'évolution de la chimie de l'eau souterraine sera la résultante de quatre processus majoritaires :

- (i) L'altération chimique des roches,
- (ii) La précipitation des minéraux,
- (iii) Les échanges cationiques avec les argiles
- (iv) Les mélanges de masses d'eau.

### **Altération chimique et précipitation :**

L'altération des roches comprend la dissolution des minéraux stables à basse pression/basse température (i.e. calcite, halite) et l'altération des minéraux formés à haute pression/haute température (i.e. feldspaths, olivine, biotite..), qui ne sont pas stables dans les environnements terrestres de surface et les aquifères peu profonds (Langmuir, 1997).

Les minéraux stables dans des conditions basses température/basse pression sont soumis à la dissolution. Lorsque l'eau devient suffisamment enrichie en éléments dissous, ces phases minérales peuvent précipiter de nouveau. La réaction chimique de dissolution-précipitation est dite « réversible » (Équation 3 et Équation 4). Un équilibre entre l'eau et le minéral tend à s'établir avec le temps.

Les minéraux hors de leur domaine de stabilité quant à eux sont sujets à de l'altération car ils ne peuvent reprécipiter dans les conditions de surface, indépendamment de la chimie de l'eau. La réaction chimique est irréversible (Équation 5 et Équation 6). L'altération de ces minéraux hors de leur domaine de stabilité s'accompagne de la précipitation de phases secondaires qui sont principalement la calcite, les argiles et les oxydes/hydroxydes de fer.

#### Équation 3 : dissolution de la halite

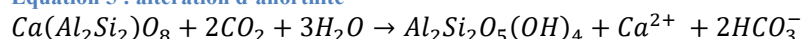


#### Équation 4 : dissolution de carbonate

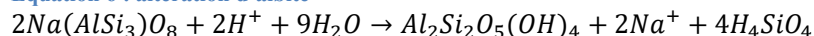


Avec X = Ca + Mg en proportions variables selon les carbonates (X = Ca pour la calcite pure)

#### Équation 5 : altération d'anorthite



#### Équation 6 : altération d'albite



Dans le processus de dissolution, l'équilibre entre le minéral et la solution est décrit par une constante de solubilité  $K_s$  thermo-dépendante. Cette constante, égale au produit des concentrations<sup>6</sup> de certains ions en solution, est atteinte lorsque l'eau s'équilibre avec la phase minérale ( $t > t_2$  sur la Figure 12). Dans le cas de l'halite, la constante de solubilité correspond au produit des teneurs en sodium et en chlorures dissous lorsque la saturation est atteinte (Équation 7). Pour la calcite,  $K_s$  correspond au produit des teneurs en calcium et en carbonates ( $CO_3$ ; Équation 8). La solubilité est propre à chaque minéral et dépend des conditions environnementales ( $T^\circ$ , pH, Eh, TDS). Dans les aquifères, les

---

<sup>6</sup> Pour simplifier la lecture du rapport, nous avons choisi de ne pas nuancer les notions de concentration et d'activité. Pour le lecteur spécialiste appréciant la rigueur scientifique, les calculs ont tous été réalisés en activités sous PhreeqC.

évaporites sont les minéraux les plus solubles, suivis par les carbonates. Le quartz (ou plus généralement la silice) est peu soluble.

Équation 7 : constante de solubilité de l'halite

$$K_{S_{halite}} = [Na^+] * [Cl^-]$$

Équation 8 : constante de solubilité de la calcite

$$K_{S_{calcite}} = [Ca^{2+}] * [CO_3^{2-}]$$

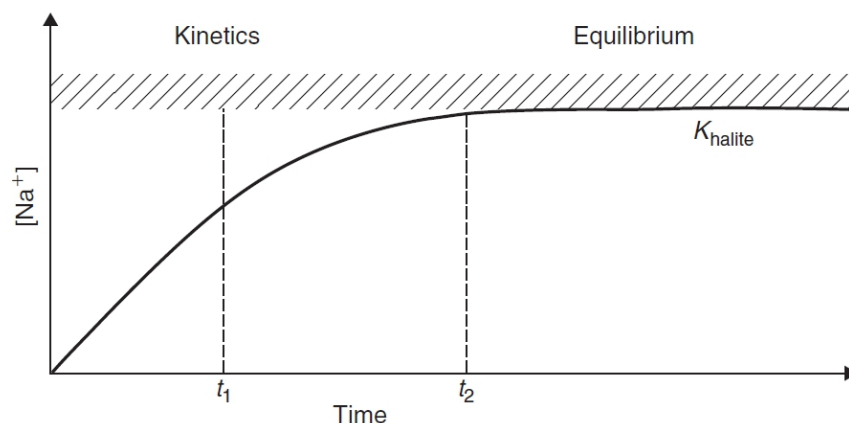


Figure 12 : Principes de cinétique et d'équilibre illustrés par l'évolution temporelle des teneurs en  $Na^+$  en solution issue de la dissolution de la halite (Appelo *et al.*, 2005).

Dans un aquifère, les réactions de dissolution des carbonates et des évaporites présents se poursuivent jusqu'à ce que l'eau atteigne l'équilibre avec la phase minérale si le temps d'interaction et les quantités de minéraux à dissoudre sont suffisants. Lorsque cet état d'équilibre est atteint vis-à-vis d'un minéral donné, les flux de précipitation et de dissolution se compensent (i.e. réaction chimique réversible, Équation 3 et Équation 4). La caractérisation de l'avancée du système vers cet état d'équilibre se fait par le calcul des indices de saturation (IS) de l'eau vis-à-vis des phases minérales présentes dans l'aquifère (i.e. avec la calcite pour l'Équation 9).

Équation 9 : indice de saturation vis-à-vis de la calcite

$$IS_{calcite} = \log\left(\frac{Q_{calcite}}{K_{S_{calcite}}}\right)$$

Avec  $Q_{calcite}$  le produit d'activité des ions  $Ca^{2+}$  et  $CO_3^{2-}$  et  $K_{S_{calcite}}$  la constante d'équilibre égale à  $10^{-8.5}$

Tant que l'eau souterraine ne contient pas suffisamment d'éléments en solution, les indices de saturation vis-à-vis des phases minérales sont négatifs : l'eau est définie comme sous-saturée vis-à-vis des phases minérales concernées. Lorsque l'eau souterraine acquiert suffisamment d'éléments dissous pour atteindre l'équilibre vis-à-vis d'une phase minérale, on dit qu'elle est saturée vis-à-vis de cette phase minérale (i.e.  $IS_{calcite} = 0$  lorsque les activités en  $Ca^{2+}$  et  $CO_3^{2-}$  dans l'eau sont équivalentes à la constante de solubilité de la calcite  $K_{S_{calcite}}$ ). Un enrichissement supplémentaire conduit alors à une sursaturation ( $IS > 0$ ), qui se traduit à plus ou moins long terme par la précipitation du minéral à partir de cette solution enrichie. Dans les aquifères peu profonds, tels que ceux présents au Québec, les phases minérales principales qui seront à même de précipiter sont la calcite, les argiles et les oxydes/hydroxydes de fer.

Dans le cas particulier de l'altération des minéraux silicatés, l'équilibre entre l'eau et le minéral n'est jamais atteint car les éléments dissous issus du processus d'altération sont réutilisés pour précipiter des minéraux secondaires plus stables en conditions supergènes comme la calcite. De ce fait, la constante

de solubilité de ces minéraux n'est pas limitante pour la réaction et les indices de saturation vis-à-vis de ces minéraux restent négatifs tout au long du parcours de l'eau souterraine : tant que le minéral est présent, il va s'altérer au contact de l'eau.

La dissolution ou l'altération des minéraux est aussi caractérisée par la cinétique ou vitesse de réaction qui décrit la rapidité avec laquelle l'eau va atteindre l'équilibre avec le minéral. La vitesse de dissolution dépend du minéral, de la composition chimique de l'eau et des surfaces disponibles pour l'interaction entre l'eau et le minéral. Les cinétiques de dissolution des évaporites et des carbonates sont élevées, tandis que les cinétiques d'altération des silicates sont de 100 à 1 million de fois plus faibles dans la gamme de pH des eaux naturelles (Figure 13 et Figure 14).

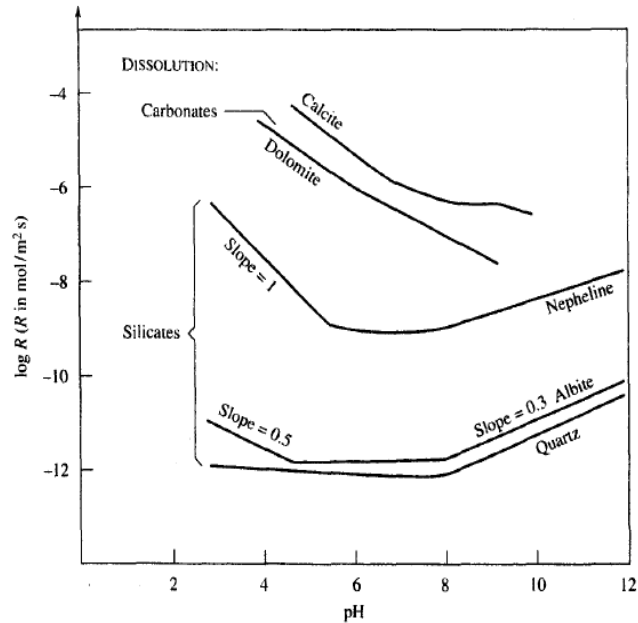


Figure 13 : Comparaison des taux de dissolution des minéraux carbonatés et silicatés en fonction du pH de l'eau (Langmuir, 1997)

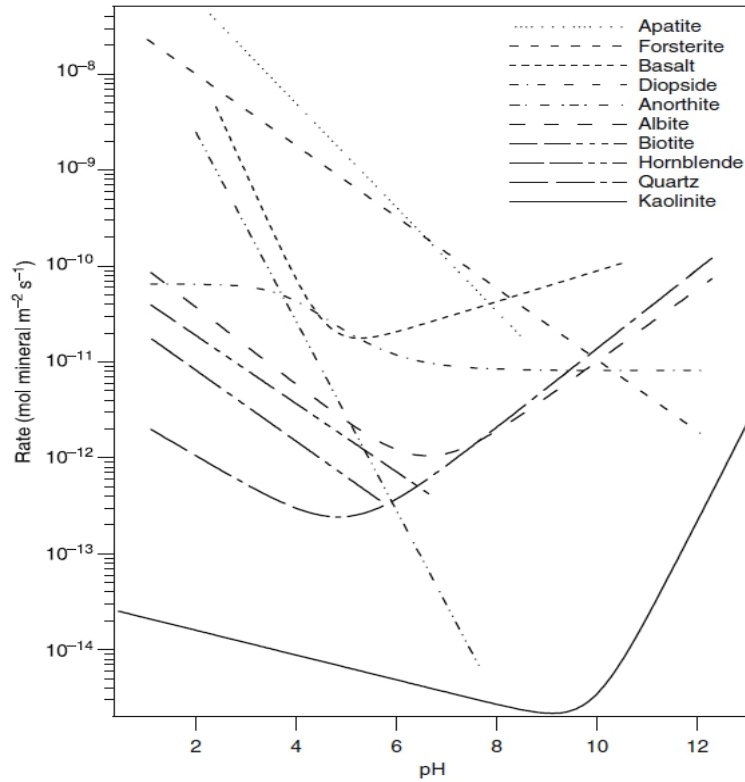


Figure 14 : Évolution théorique des taux de dissolution des minéraux silicatés en fonction du pH de l'eau (Brantley *et al.*, 2008)

Dans le cas des silicates, les principaux minéraux sont classés dans une séquence d'altération pour laquelle moins un minéral est stable en conditions de surface, plus il sera altéré rapidement (Figure 15).

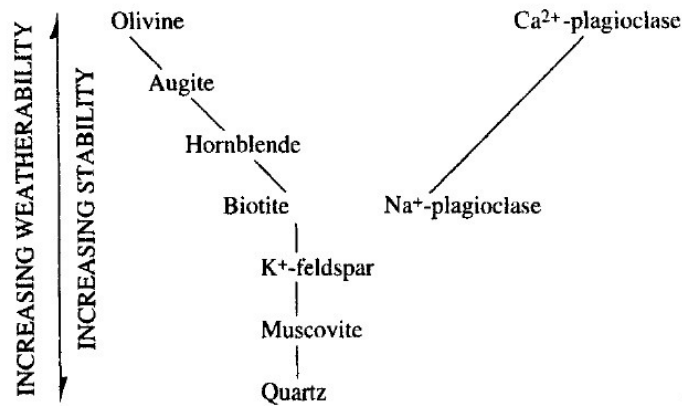


Figure 15 : Séquence d'altération des minéraux silicatés en fonction de leur stabilité (Séquence de Goldich, modifiée de Langmuir, 1997)

**Échange cationique :**

Le processus d'échange cationique se fait entre l'eau souterraine et les argiles présentes dans et au contact des aquifères. Les argiles sont des produits d'altération des minéraux silicatés : la kaolinite est issue de l'altération des minéraux présents dans les granites (plagioclases...), la smectite provient de l'altération des minéraux de roches mafiques riches en calcium et magnésium et l'illite se forme suite



à l'altération des minéraux potassiques (Clark, 2015). Les argiles sont des silicates en feuillets, constituées d'une alternance de couches tétraédriques  $\text{SiO}_4$  et de couches octaédriques  $\text{Al}(\text{OH})_6$  (Figure 16). Entre les feuillets, des éléments peuvent être incorporés tels que les cations majeurs ou bien les molécules d'eau. L'échange cationique entre l'eau et les argiles intervient dans ces espaces interfoliaires pour compenser un déséquilibre de charge dans les feuillets d'argiles lorsque des substitutions ont lieu au sein des feuillets ( $\text{Si}^{4+}$  substitué par  $\text{Al}^{3+}$  dans les tétraèdres ou  $\text{Al}^{3+}$  substitué par  $\text{Mg}^{2+}$  dans les octaèdres). Dépendamment de la structure des argiles, celles-ci ne vont pas avoir la même capacité d'échange cationique (CEC). Les argiles de la famille de la kaolinite (argiles type 1/1) sont les plus stables dans leur structure. Le taux de substitution est faible et par conséquent la CEC aussi. Les smectites quant à elles ont une CEC bien plus importante grâce à leur structure plus désordonnée propice aux substitutions. Les échanges cationiques sont très rapides, mais les quantités d'ions échangées dépendent à la fois des cations présents dans l'eau mais aussi de l'état des surfaces des argiles disponibles dans la roche où s'écoule l'eau. Les échanges cationiques vont se poursuivre pour rapprocher les argiles d'un équilibre avec la phase aqueuse.

Dans le sud du Québec, la plupart des niveaux argileux présents sont issus des transgressions marines des mers de Champlain et Laflamme (Meyzonnat *et al.*, 2018a; Walter *et al.*, 2017). Ces argiles sont enrichies en sodium et auront tendance à échanger ce sodium avec les autres cations présents dans l'eau souterraine. Un enrichissement progressif en sodium dans les eaux souterraines qui interagissent avec ces argiles est donc à prévoir dès lors que la ressource en eau se retrouve en contact avec ces argiles, c'est-à-dire dans les parties aval des régions étudiées.

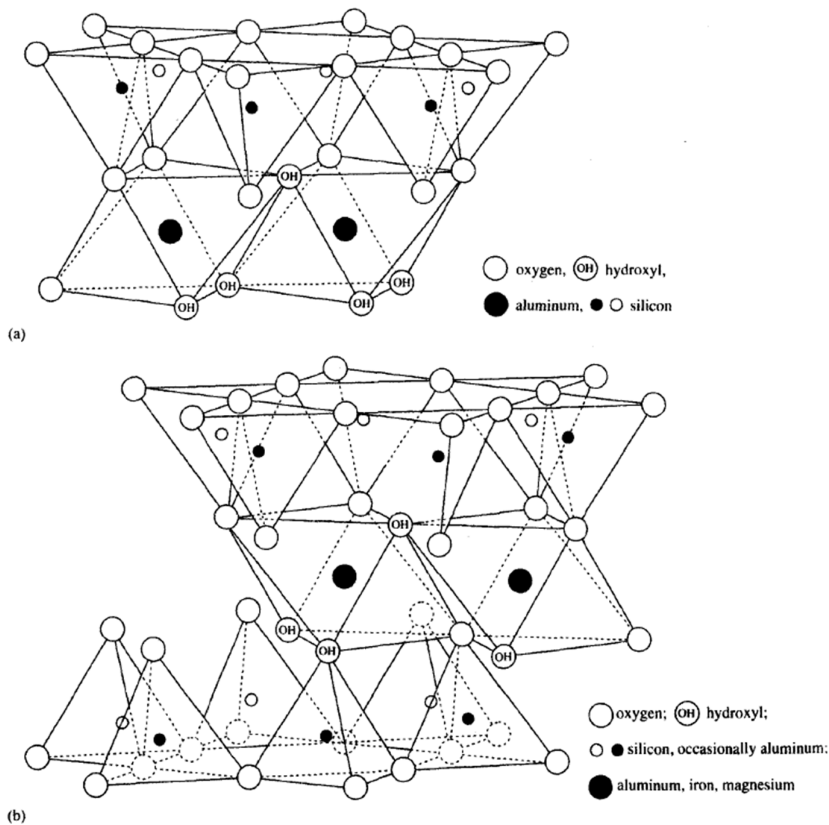


Figure 16 : (a) Structure argiles de type 1/1 (famille de la kaolinite) et (b) structure des argiles de type 2/1 (familles illites, smectite) (Langmuir, 1997)

## **Mélange des masses d'eau :**

Le mélange des masses d'eaux prend en compte à la fois les mélanges de différentes masses d'eau au sein d'un même aquifère, mais aussi le mélange de l'eau de recharge avec l'eau souterraine déjà présente dans la zone saturée de l'aquifère (ZS). Si les trois premiers processus (dissolution-altération/précipitation/échange cationique) sont facilement mis en évidence avec la chimie de l'eau et la connaissance globale de la géologie des aquifères, les mélanges sont eux beaucoup plus difficiles à contraindre. Dans un aquifère silicaté à recharges multiples (Figure 7), les processus d'altération des minéraux étant lents, une eau de recharge récente sera peu minéralisée comparée à une eau qui aura séjourné plus longtemps dans l'aquifère. Le mélange eau de surface – eau souterraine se traduit alors par une « dilution » de l'eau souterraine initiale, lui donnant les caractéristiques d'une eau « plus jeune ». Cette dilution de l'eau souterraine sera d'autant plus forte que la recharge sera importante par rapport aux flux impliqués dans la ligne d'écoulement principale.

### 2.2.2 Paramètres impactant la dynamique chimique des eaux souterraines

Pour relier la minéralisation de l'eau souterraine à son temps de séjour apparent dans l'aquifère, il est nécessaire de contraindre au maximum les cinétiques des processus chimiques au sein de la nappe. Ces cinétiques dépendent à la fois :

- du type de minéraux présents dans l'aquifère, et
- de l'agressivité de l'eau, représentée par la pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) dans l'eau (pour les minéraux silicatés et carbonatés).

#### 2.2.2.1 Type de roches rencontrées

Dans les environnements naturels, les trois grands types de roches sont les roches carbonatées, les roches silicatées et les évaporites. Dans le sud du Québec, les aquifères identifiés dans les PACES sont carbonatés ou silicatés. Dans de rares cas la présence d'évaporites mélangées à des silicates a été rapportée dans les descriptions géologiques des forages, mais les eaux prélevées dans ces puits étaient trop minéralisées pour être potables, elles ont donc été écartées de cette étude.

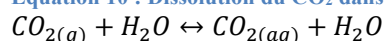
Dans les aquifères silicatés (présents dans les provinces de Grenville, Supérieure et des Appalaches), la composition minéralogique des roches est très diversifiée. Néanmoins, en première approximation, le contexte géologique peut être simplifié en un faciès granitique qui représente la composition minéralogique moyenne des roches terrestres silicatées. Les aquifères rencontrés contiennent une proportion importante de plagioclases. Ces minéraux étant plus facilement altérés que les autres silicates (Figure 15), ils contrôlent la minéralisation de l'eau souterraine associée au processus d'altération des minéraux (Ghesquière *et al.*, 2015; Montcoudiol *et al.*, 2015; Walter *et al.*, 2017).

Pour les aquifères carbonatés (présents dans la Plate-forme du Saint-Laurent et la Province des Appalaches), la minéralisation issue de la dissolution de la roche est principalement contrôlée par les carbonates (calcite et dolomite; Cloutier *et al.*, 2009; Blanchette *et al.*, 2010) dont les taux de dissolution sont 10<sup>5</sup> fois plus élevés que ceux des plagioclases (Figure 13 et Figure 14). La différence de cinétique de mise en solution entre carbonates et silicates est telle que les eaux souterraines vont se minéraliser plus rapidement en milieu carbonaté. Dans les aquifères où les deux types de minéraux sont présents, la minéralisation sera dominée dans un premier temps par la dissolution des carbonates. Afin de prendre en compte les différences de comportement (cinétiques, solubilités) sur les différentes régions PACES, les puits situés en milieu carbonaté et en milieu mixtes (carbo-silicatés) ont été étudiés séparément des puits en milieu silicatés.

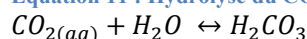
### 2.2.2.2 La pression partielle ( $p\text{CO}_2$ ) de l'eau

L'altération chimique des roches dépend majoritairement des teneurs en acide carbonique de l'eau puisqu'il est l'acide le plus abondant dans les ressources en eau naturelles (Langmuir, 1997). Il se forme par hydrolyse du  $\text{CO}_2$  dissout dans l'eau (noté  $\text{CO}_{2(aq)}$ ) dont la quantité dépend de la  $p\text{CO}_2$ , c'est-à-dire la pression de  $\text{CO}_2$  gazeux dans la zone non saturée impliquée dans la recharge des aquifères (Équation 10 et Équation 11). La dissociation de l'acide carbonique permet la libération du proton utilisé dans les processus d'altération des minéraux silicatés et de dissolution des carbonates (Équation 12). Dans des eaux à pH élevé, les protons sont libérés principalement par la dissociation des bicarbonates formant des ions carbonates (Équation 13).

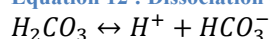
#### Équation 10 : Dissolution du $\text{CO}_2$ dans l'eau



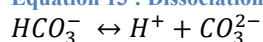
#### Équation 11 : Hydrolyse du $\text{CO}_2$



#### Équation 12 : Dissociation de l'acide carbonique



#### Équation 13 : Dissociation des bicarbonates



Les équilibres entre les quatre formes de carbone inorganique dissous dans l'eau dépend de nombreux facteurs tels que la température et les minéraux en présence et la salinité (Zeebe *et al.*, 2001). C'est cet équilibre qui contrôle le pH des eaux naturelles. Contrairement aux évaporites, les cinétiques de dissolution des minéraux carbonatés et d'altération des minéraux silicatés sont dépendantes de la quantité de protons disponibles et donc par extension de la  $p\text{CO}_2$  de l'eau. Cette pression partielle varie de plusieurs ordres de grandeur en fonction des conditions de recharge et des processus de minéralisation au sein des aquifères.

#### 2.2.2.2.1 Variabilité de la $p\text{CO}_2$ à la recharge

La  $p\text{CO}_2$  imposée à l'eau de recharge<sup>7</sup> au moment où elle atteint la zone saturée dépend des quantités de  $\text{CO}_2$  produites dans le sol, de la diffusion de ce  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère et des interactions eau – roche dans la zone non saturée (Gillon *et al.*, 2012). Dans le sol, le  $\text{CO}_2$  est produit par l'activité microbienne et la respiration racinaire des plantes qui s'y développent (Figure 17). La perte d'une partie du  $\text{CO}_2$  produit par diffusion du sol vers l'atmosphère dépend des propriétés physiques (porosité, perméabilité) et hydriques du sol (taux de saturation en eau de la porosité) ainsi que de la température (Romero-Mujalli *et al.*, 2019). Elle est maximale dans les sols à porosité élevée, perméables et faiblement saturés en eau (Gillon *et al.*, 2012). Une autre part de  $\text{CO}_2$  peut être consommée dans la zone non saturée dans les processus d'altération ou de dissolution des minéraux présents. La pression partielle de  $\text{CO}_2$  imposée à la recharge résulte donc d'un équilibre entre les quantités de  $\text{CO}_2$  produites par l'activité biologique, de la perte par diffusion vers l'atmosphère et du  $\text{CO}_2$  consommé par les réactions d'altération de la roche encaissante. Lorsque le sol est absent (i.e. sur les zones où l'aquifère affleure), les sources de  $\text{CO}_2$  issues des processus biologiques deviennent négligeables. La  $p\text{CO}_2$  imposée à la recharge reste proche de celle de l'atmosphère (équivalent à  $10^{-3.5}$  atm).

<sup>7</sup> La recharge correspond à la lame d'eau qui traverse la zone non saturée (ZNS) pour alimenter la nappe (zone saturée = ZS).

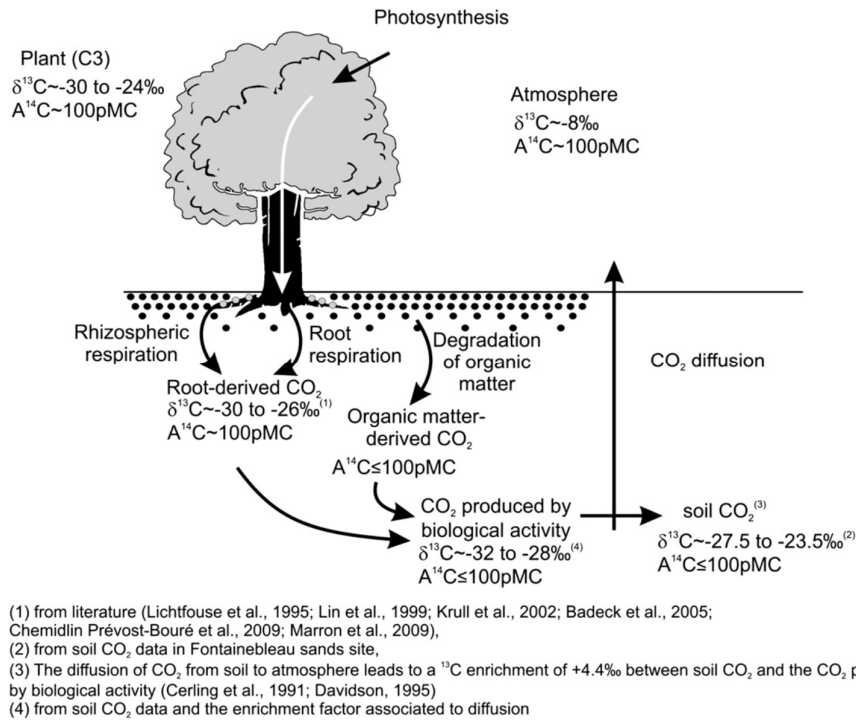


Figure 17 : Schéma des sources et processus contrôlant la  $\text{pCO}_2$  dans les sols (Gillon *et al.*, 2012)

#### 2.2.2.2.2 Variabilité de la $\text{pCO}_2$ dans la ZNS et dans la nappe

La  $\text{pCO}_2$  de l'eau est affectée par les interactions eau – roche qui, en consommant les protons, peuvent conduire à une diminution de la  $\text{pCO}_2$  apparente de l'échantillon. Dans la zone non saturée (ZNS), tant que la phase gazeuse est présente, elle impose à l'eau une source permanente de  $\text{CO}_2$ . La minéralisation de l'eau se fait alors en « système ouvert » sur la phase gazeuse. La  $\text{pCO}_2$  dans l'eau reste représentative de la  $\text{pCO}_2$  de la zone non saturée. Dans la zone saturée, la phase gazeuse n'existe plus et la minéralisation se fait en « système fermé ». La  $\text{pCO}_2$  dans l'eau n'est alors plus représentative de la  $\text{pCO}_2$  du sol car le  $\text{CO}_2$  dissous est « consommé » au fur et à mesure de l'interaction eau – roche.

Plus le transit de l'eau dans la ZNS est long, plus la minéralisation en système ouvert va être importante. Ce temps de transit dépend de la perméabilité de la ZNS, de son épaisseur mais aussi de l'intensité de la recharge. De ce fait, à  $\text{pCO}_2$  identique au moment de la recharge, l'eau souterraine qui alimente la nappe sera plus minéralisée si son temps de transit dans la ZNS a été long.

Le contexte dans lequel ont lieu les interactions eau – roche (système ouvert ou fermé) a également des conséquences sur la minéralisation totale de l'eau et son pH. Le renouvellement permanent de  $\text{CO}_2$  dissous en système ouvert maintient un pH bas favorisant la dissolution et l'altération des minéraux et donc la minéralisation de l'eau. En système fermé, le  $\text{CO}_2$  n'est pas renouvelé, le pH augmente alors plus rapidement ce qui traduit une limitation progressive des processus de dissolution et d'altération et donc de la minéralisation de l'eau. Pour des conditions initiales identiques, la minéralisation de l'eau en système fermé sera donc moins importante que la minéralisation de l'eau en système ouvert (Figure 18 ; exemple en milieu carbonaté).

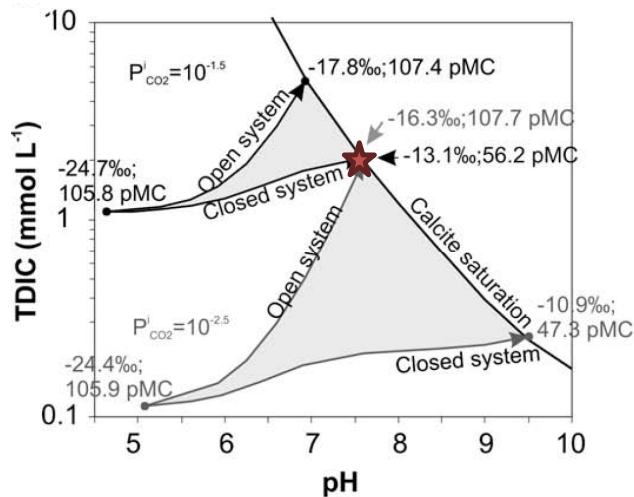


Figure 18 : Évolutions en système ouvert et en système fermé du carbone inorganique dissous dans l'eau en fonction du pH en considérant deux pressions partielles de  $CO_2$  initiales différentes (Gillon *et al.*, 2009).

La  $pCO_2$  mesurée dans un échantillon résulte donc de son histoire hydrogéochimique qui comprend (i) le mode d'infiltration/recharge et (ii) l'histoire de sa minéralisation. A posteriori il n'est pas possible de différencier les conséquences des deux processus impliqués dans la minéralisation des eaux puisque deux eaux avec une histoire différente peuvent avoir une chimie similaire en termes de carbone dissous (Figure 19). Un outil alternatif à considérer est le  $\delta^{13}C_{DIC}$  pour les milieux carbonatés (DIC : carbone inorganique dissous dans l'eau). En effet, le  $\delta^{13}C_{DIC}$  de l'eau permet de distinguer la dynamique du système ouvert/fermé et les interactions eau – carbonates (Figure 18). Sur certains PACES, ces mesures isotopiques ont été réalisées. Elles pourraient être utiles dans un second temps pour affiner l'approche développée ici. Dans le cadre de cette étude, la distinction de ces processus n'est pas indispensable car il est possible de tenir compte de l'ensemble des  $pCO_2$  que l'on peut rencontrer sur les régions PACES en modélisant l'impact de différentes  $pCO_2$  sur l'altération/dissolution des minéraux afin d'encadrer les évolutions chimiques rencontrées dans les nappes d'eau souterraine.

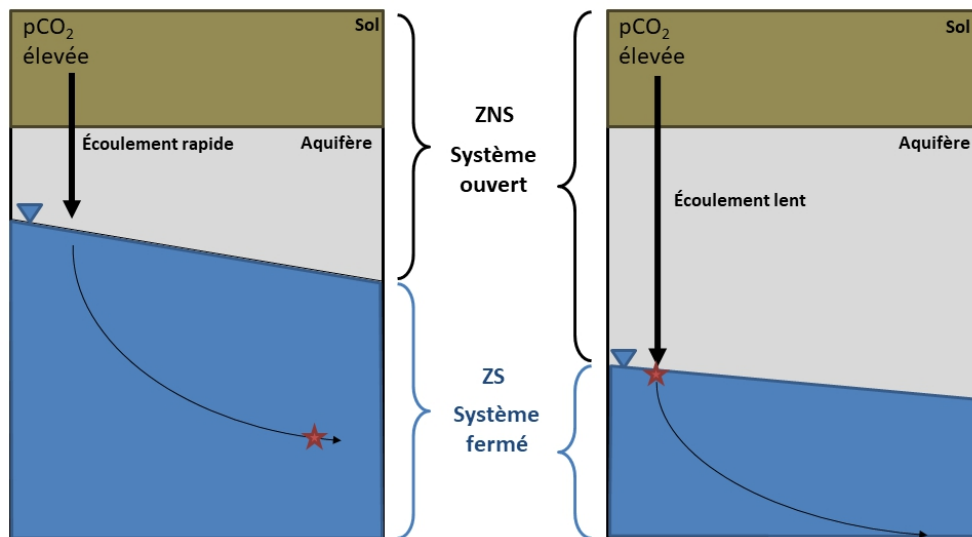


Figure 19 : Schématisation de l'équilibration de l'eau souterraine avec la roche dans la zone saturée donc en système fermé vis-à-vis du  $CO_2$  (à gauche) ou dans la zone non saturée donc en système ouvert vis-à-vis du  $CO_2$  (à droite)

### 2.2.3 Calcul de l'indice de résistance chimique (IRC)

Au vu des connaissances du fonctionnement hydrogéologique des nappes et des processus à l'origine du faciès chimique des eaux souterraines, la géochimie des eaux souterraines représente un ensemble d'informations pertinentes pour discuter de la résistance des ressources en eau, car son évolution spatiale reflète le temps de séjour apparent des eaux dans le milieu souterrain. L'enjeu est de trouver les indicateurs les plus adaptés pour obtenir une résolution fine de cette résistance en fonction des types d'aquifères rencontrés. Une des méthodes basées sur la géochimie des eaux s'appuie sur la relation établie entre les bilans en milliéquivalents par litre de  $\text{Na} - \text{Cl}$  versus  $(\text{Ca} + \text{Mg}) - (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4)$ . Cette mise en relation a été utilisée plusieurs fois par le passé car elle permet de discuter de l'évolution de la chimie des eaux en fonction des processus d'interaction eau – roche (Blanchette *et al.*, 2010; Cloutier *et al.*, 2006; Meyzonnat *et al.*, 2016). L'intérêt de cette méthode est de pouvoir représenter l'impact de l'ensemble des processus décrits précédemment sur un seul graphique. Cependant, en fonction du contexte géologique et des conditions de recharge, les eaux souterraines ne vont pas se minéraliser uniformément. Il est donc nécessaire d'associer à cette approche d'autres outils permettant de contraindre plus finement les évolutions chimiques contrôlées par la géologie et la  $\text{pCO}_2$  de l'eau dans les aquifères du Québec.

#### 2.2.3.1 Cas des aquifères silicatés

##### 2.2.3.1.1 Évolution chimique des eaux en fonction des processus rencontrés

La source principale d'eau rechargeant les nappes est la pluie. Dépourvue de bicarbonates et faiblement concentrée dans les autres éléments majeurs, le faciès chimique de la pluie dans la moitié sud du Québec est sulfatée-nitratée-calcique (Environnement et Changement climatique Canada 2021 Réseau canadien d'échantillonnage des précipitations et de l'air (RCEPA) ; Figure 20).

#### **Lors de la recharge des aquifères :**

Dans les aquifères silicatés, lors de la recharge, le processus contrôlant la chimie de l'eau est l'altération des minéraux. Le type de roche pouvant être simplifié au contexte granitique, les plagioclases dominent le processus d'altération. Les plagioclases sont les feldspaths dépourvus de potassium qui évoluent entre le pôle calcique (anorthite) et le pôle sodique (albite). Leur altération va engendrer la précipitation d'argiles et la mise en solution de calcium, de sodium et de bicarbonates (Équation 5 et Équation 6). Dans l'ensemble des aquifères rencontrés les minéraux calciques sont les premiers à s'altérer, suivis dans un second temps par les minéraux sodiques (Langmuir, 1997). Au fur et à mesure de son parcours dans l'aquifère, l'eau souterraine va se charger prioritairement en calcium et en bicarbonates (Appelo *et al.*, 2005), contrairement à d'autres éléments peu présents dans les roches tels que les chlorures. De ce fait, la recharge est caractérisée par un faciès bicarbonaté-calcique ((Beaudry *et al.*, 2018) ; Figure 20). En fonction des activités humaines présentes en surface sur les aires de recharge, des éléments supplémentaires peuvent être lessivés par les précipitations et une partie peut être entraînée vers la nappe sous-jacente avec l'eau de recharge. Dans le cas des pollutions agricoles ou routières, l'impact sur la recharge est visible notamment au travers des ions majeurs par une concentration en nitrates ou en chlorures plus importante, pouvant faire tendre le faciès de recharge vers le pôle chloruré-nitraté-calcique.

#### **Avec l'écoulement dans les aquifères :**

Les interactions eau – roche se poursuivent le long de la ligne d'écoulement. En milieu silicaté, l'altération lente des minéraux sodiques apporte peu à peu du sodium en solution ce qui provoque un changement de faciès des eaux souterraines de bicarbonaté-calcique vers carbonaté-sodique. L'échange cationique avec les argiles marines enrichies en sodium accentue ce changement de faciès,

car les argiles libèrent leur sodium pour incorporer le calcium présent dans l'eau souterraine (Walter *et al.*, 2017). Enfin, la consommation du carbone inorganique dissous dans la précipitation de carbonates (tels que la calcite), ainsi que le mélange avec des saumures piégées dans les niveaux argileux d'origine marine entraînent un nouveau changement de faciès vers le pôle chloruré-sodique. En général ce dernier stade correspond à des eaux fortement minéralisées non potables qui ont été exclues de cette étude.

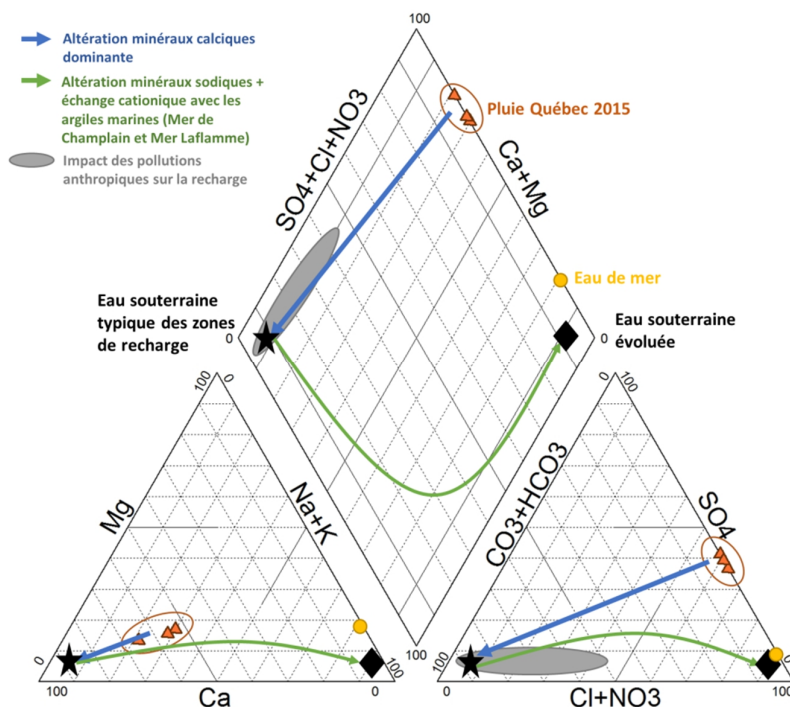


Figure 20 : Impact des processus majoritaires des interactions eau - roche sur la composition chimique des eaux représenté sur un diagramme de PIPER (parcours de minéralisation adaptés de (Walter *et al.*, 2017))

### 2.2.3.1.2 Représentation par le Diagramme d'évolution hydrochimique – 1<sup>er</sup> sous-indice

En partant des études précédentes dont celle de Meyzonnat *et al.* 2016, l'évolution chimique des eaux souterraines a ensuite été représentée dans le diagramme d'évolution hydrochimique mettant en relation le bilan en milliéquivalents des teneurs en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  en fonction du bilan des teneurs en  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-}$ . Pour simplifier la nomenclature dans ce rapport, l'abréviation DEH sera utilisée pour le diagramme d'évolution hydrochimique (Figure 21). Cette représentation a été choisie car elle permet de mettre en évidence les évolutions chimiques principales issues des processus majeurs intervenant au sein des aquifères.

#### Lors de la recharge des aquifères :

L'eau souterraine acquiert au début de son parcours un faciès bicarbonaté-calcique et se trouve au niveau du point A dans le DEH (Figure 21). Tant que l'altération des minéraux calciques est dominante, le point représentatif de la chimie de l'eau reste au niveau du point A.

#### Avec l'écoulement dans les aquifères :

Le long des lignes d'écoulement, les minéraux sodiques vont s'altérer progressivement, libérant notamment du sodium et des bicarbonates en solution. Cela se traduit par le déplacement du point représentatif des eaux dans le domaine de type 1 du DEH. Les échanges cationiques avec les argiles marines enrichies en sodium vont accentuer cette augmentation des teneurs en sodium dissous et ainsi accroître le déplacement du point représentatif des eaux le long de la droite de type 1 du DEH. Cette

évolution de la chimie des eaux vers ce domaine sera d'autant plus marquée que le temps de séjour dans l'aquifère sera long et que les surfaces spécifiques d'échanges seront importantes.

Dans le cas d'un système simple avec une zone de recharge présente uniquement sur les secteurs les plus amonts de l'aquifère, cette évolution pourra être corrélée à l'emplacement du forage le long de la ligne d'écoulement (Figure 5). En revanche, dans le cas des systèmes complexes où des zones de recharges sont observées à différents endroits de l'aquifère, la recharge partielle sur une ligne d'écoulement aura tendance à ramener les points représentatifs des eaux vers le point A. Ce retour apparent vers des eaux moins évoluées, et donc moins résistantes, sera proportionnel à la contribution relative de la recharge par rapport au volume d'eau souterraine arrivant de l'amont de la ligne d'écoulement impactée.

### Cas particulier des apports en sels :

Si la proportion de sels apportés par les aérosols et les précipitations lessivant les sels de route est significative, la position des eaux de recharge devrait s'éloigner du point A selon la flèche de type 2 du DEH. Les eaux se retrouvant dans cette partie du DEH n'ont pas été traitées car le biais chimique apporté par ces pollutions anthropiques fausse l'interprétation pouvant être faite de la résistance par le DEH. En première approximation, il est possible d'émettre l'hypothèse que tous les points se situant dans le domaine d'évolution de type 2 sont représentatifs d'eaux dont la résistance est minimale car l'impact des apports anthropiques domine le faciès chimique de l'eau.

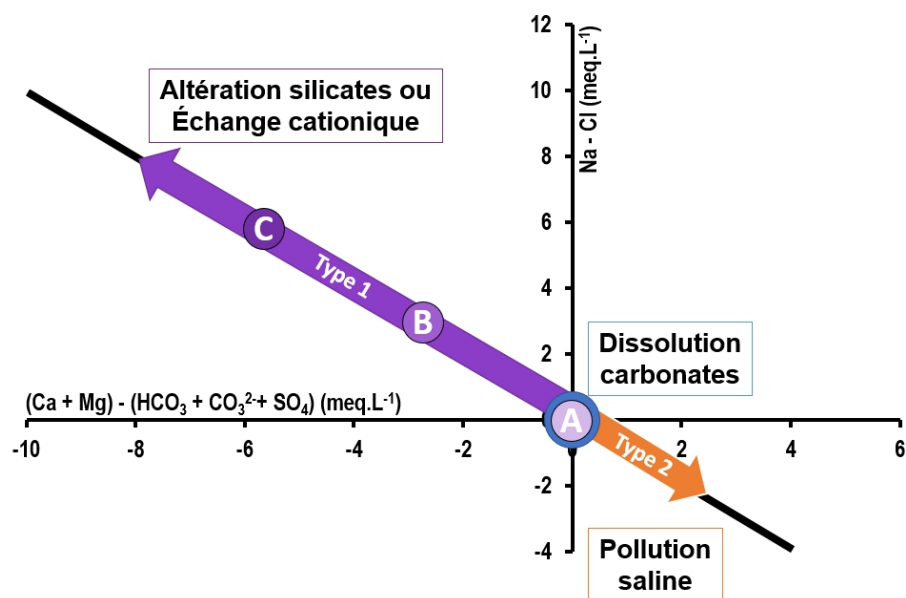


Figure 21 : Diagramme d'évolution hydrochimique et tendances associées aux processus majeurs observables dans les eaux souterraines (DEH)

À partir du DEH, une échelle d'indice de résistance a été réalisée le long de la pente créée par l'évolution chimique de type 1, sur la base que plus une eau est proche du point A sur le diagramme, plus elle est vulnérable et moins elle est résistante ((Meyzonnat *et al.*, 2016) ; Figure 22). L'indice minimum fixé à 0, correspondant à une résistance minimale, a donc été placé aux coordonnées (0, 0) du graphique. Puis une échelle linéaire de pente -1 a été définie suivant l'extension moyenne des points des différents PACES. En partant de la valeur minimale au centre du graphique, chaque point d'indice gagné correspond à un déplacement de 1 meq.L<sup>-1</sup> sur le bilan  $\text{Na} - \text{Cl}$  et de -1 meq.L<sup>-1</sup> sur le bilan  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-})$ . Afin de pouvoir comparer les secteurs entre eux, la même échelle a été appliquée à tous.



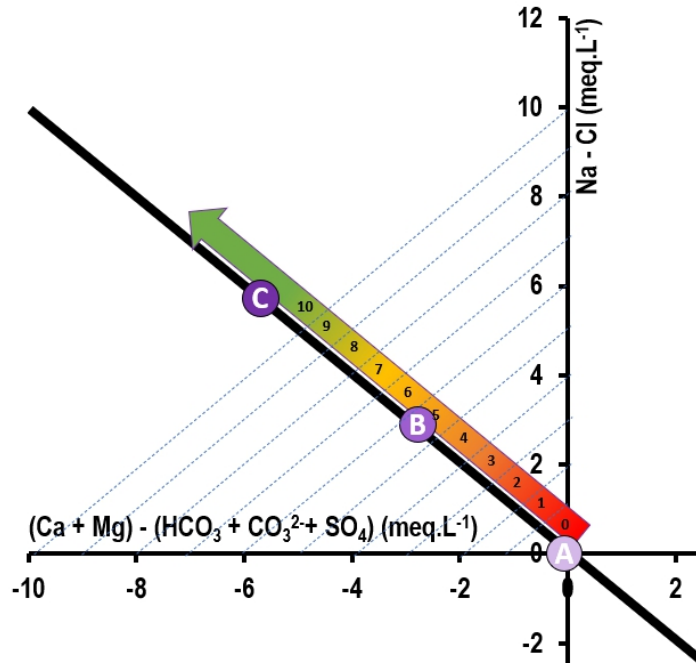


Figure 22 : Échelle de l'indice de résistance chimique à partir du DEH

### 2.2.3.1.3 Prise en compte de la géologie et de la $pCO_2$ – 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> sous-indices

Par la représentation du DEH, l'impact de la  $pCO_2$  et des types de minéraux présents dans les aquifères peut s'illustrer par une expansion plus ou moins importante des points le long de l'échelle de résistance (Figure 23). Le DEH ne permet donc pas toujours de différencier la résistance de deux ressources en eau lorsqu'elles sont issues de contextes hydrogéologiques différents (pression partielle de  $CO_2$  de la recharge, minéraux présents dans l'aquifère) et il doit donc être complété par d'autres indices.

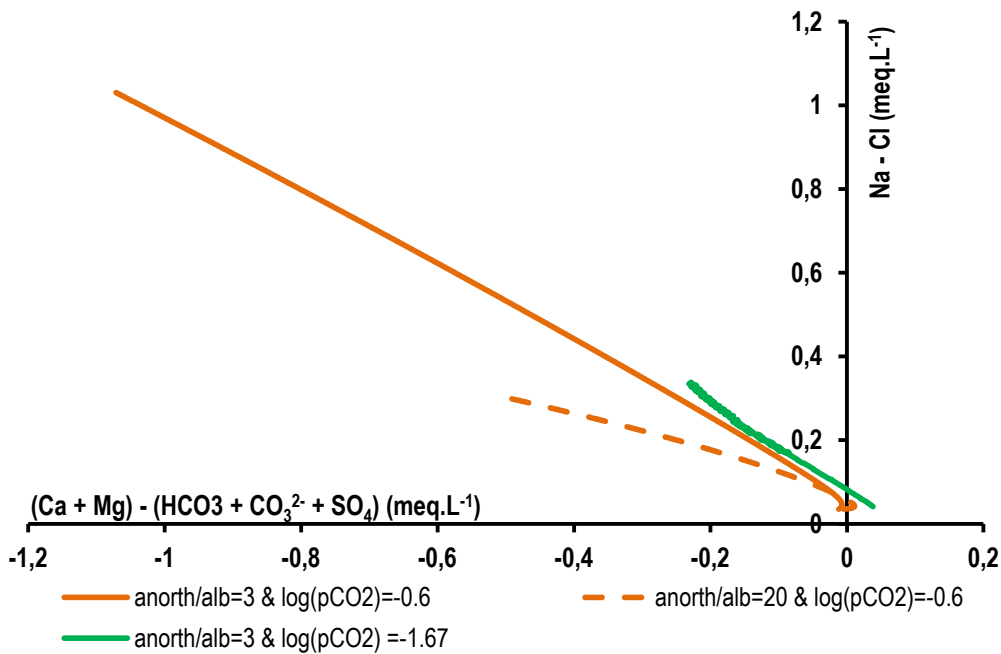


Figure 23 : Modélisation de l'impact de la géologie et de la  $pCO_2$  initiale sur l'évolution chimique des eaux souterraines appliquée au DEH (modélisation réalisée sous PHREEQC à partir de la chimie de deux puits du PACES CHCN ; les ratios entre anorthite et albite altérés sont de 3 ou 20 et la  $pCO_2$  varie entre  $10^{-0.6}$  et  $10^{-1.67}$ )

Afin de caractériser l'impact de la  $p\text{CO}_2$  et de la minéralisation des aquifères et d'encadrer les évolutions chimiques des eaux de nappe analysées dans les PACES, des modélisations de l'altération des principaux minéraux ont été réalisées à l'aide du logiciel PHREEQC (Parkhurst *et al.*, 2013). Dans le cas des aquifères silicatés, cette modélisation a été réalisée en altérant des plagioclases (l'anorthite et l'albite) dans des proportions différentes (ratio anorthite/albite allant de 3 à 30). Ce ratio des quantités des minéraux altérés représente le contexte géologique rencontré et les valeurs choisies permettent de refléter l'impact global de l'ensemble des facteurs contrôlant l'évolution chimique de l'eau issue du processus d'altération à savoir :

- (i) les vitesses d'altération des minéraux,
- (ii) la distribution des minéraux dans la roche,
- (iii) la taille des minéraux présents,
- (iv) les surfaces d'échanges entre les minéraux et l'eau souterraine et
- (v) les produits d'altération.

Ces modélisations ont été réalisées en système fermé vis-à-vis du  $\text{CO}_2$ , avec comme signal de départ la chimie des eaux prélevées dans le cadre des PACES ayant un faciès le plus proche de celui d'une recharge (c'est-à-dire : pH acide, faible TDS, et  $\text{IS}_{\text{calcite}}$  inférieur à (-4) mais avec des  $p\text{CO}_2$  variables), afin d'encadrer au mieux les ensembles de puits des PACES. Deux traceurs de l'impact de la  $p\text{CO}_2$  sur la chimie des eaux, ont été déterminés dans cette étude, soit l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite et l'alcalinité. De plus, indépendamment de la géologie rencontrée, pour une  $p\text{CO}_2$  initiale donnée, l'alcalinité induite par la cinétique d'altération des plagioclases suit la même tendance d'évolution vers l'équilibre vis-à-vis de la calcite. Le changement de tendance est donc uniquement dû à la  $p\text{CO}_2$  initiale dans l'eau. Plus la  $p\text{CO}_2$  initiale est élevée, plus le potentiel d'altération est fort et plus la minéralisation de l'eau devra être importante afin d'atteindre la saturation vis-à-vis de la calcite (Figure 24). Pour une eau moins acide, initialement la saturation avec la calcite est atteinte en altérant moins de silicates. Les diminutions de teneurs en alcalinité après l'atteinte de la saturation illustrent le processus de précipitation de la calcite afin de ne pas sursaturer les solutions ( $\text{IS}_{\text{calcite}} > 0$ ).

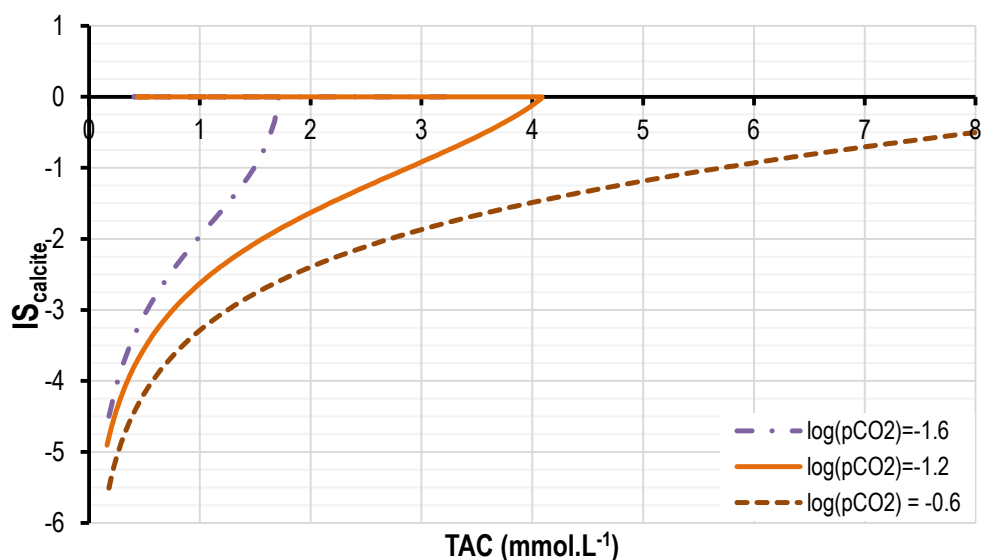


Figure 24 : Modélisation de l'altération d'anorthite et d'albite (ratio = 30) pour trois  $p\text{CO}_2$  initiales différentes représentée par l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite ( $\text{IS}_{\text{calcite}}$ ) en fonction des teneurs en alcalinité

L'impact de la géologie peut quant à lui être représenté par le couplage de l' $IS_{\text{calcite}}$  en fonction des teneurs en silice dissoute. En effet, en fonction du ratio d'altération entre l'anorthite et l'albite, les quantités de silice et de calcium libérées vont varier pour une  $pCO_2$  initiale identique. Plus le ratio sera important et plus la saturation avec la calcite sera atteinte rapidement car suffisamment de calcium aura été libéré par l'altération de l'anorthite (Figure 25). L'augmentation de la  $pCO_2$  va quant à elle jouer sur la quantité nécessaire de minéraux altérés pour atteindre la saturation vis-à-vis de la calcite : pour un ratio anorthite/albite identique, une  $pCO_2$  plus élevée crée une dynamique d'équilibration plus lente qu'une  $pCO_2$  plus faible.

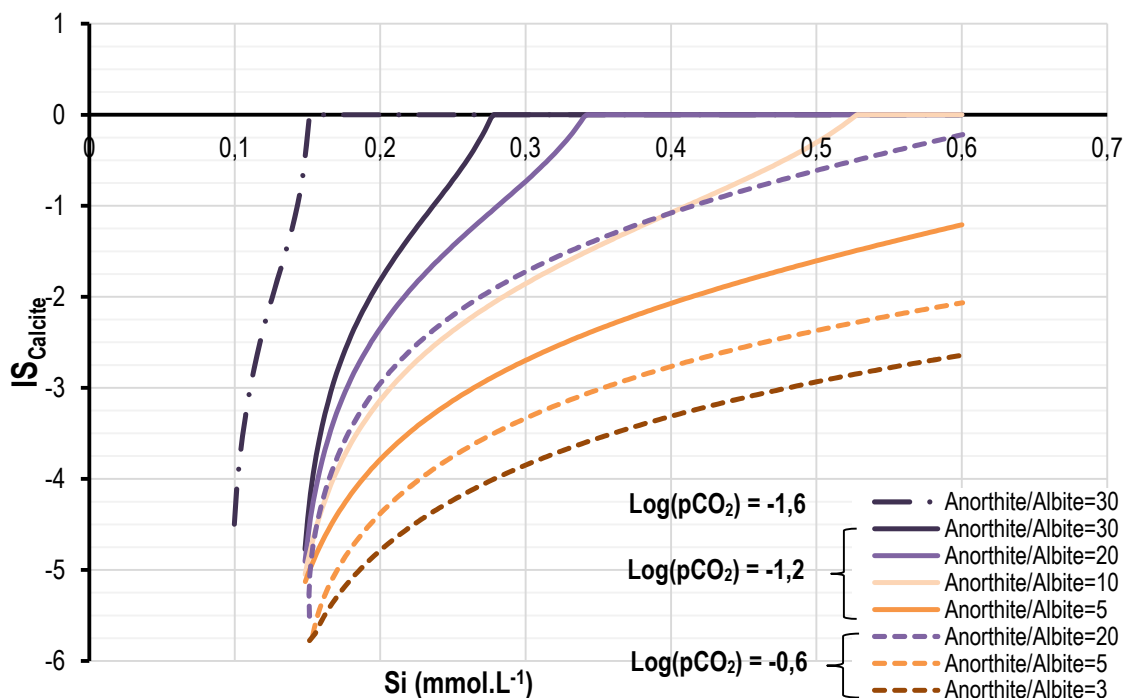


Figure 25 : Représentation de l'impact cumulé de la géologie et de la  $pCO_2$  initiale sur la chimie des eaux souterraines dominée par l'altération des silicates

Avec le support de ces modélisations, deux indices complémentaires ont pu être établis en considérant les représentations de l' $IS_{\text{calcite}}$  en fonction (1) des teneurs en silice dissoute et (2) de l'alcalinité. Là encore, les échelles des indices sont linéaires et ont été choisies de façon à encadrer au mieux la chimie des masses d'eau des différents secteurs étudiés. Pour l'indice basé sur la silice ( $Ind_{Si}$ ), chaque point d'indice est représenté par une droite d'équation  $y' = -10x' + b'$  où  $b'$  varie entre -4 et +6 pour les valeurs d'indices égales à 0 et 10 respectivement (Figure 26). Pour l'indice basé sur l'alcalinité ( $Ind_{TAC}$ ), chaque point d'indice est représenté par une droite d'équation  $y'' = -x'' + b''$  où  $b''$  varie entre -5 et +5 pour les valeurs d'indices égales à 0 et 10 respectivement.

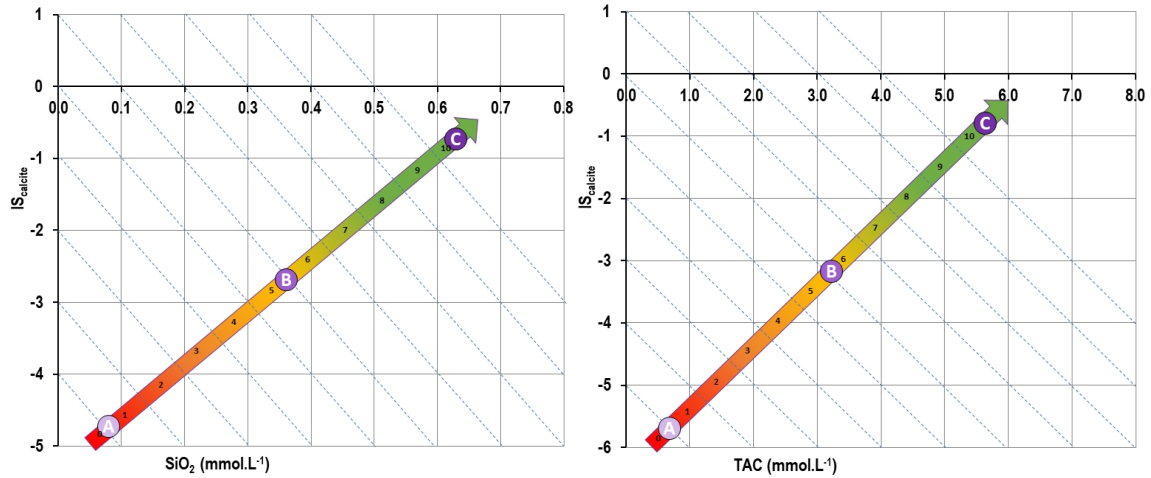


Figure 26 : Représentation des échelles des sous-indices de résistance  $Ind_{Si}$  (à gauche) et  $Ind_{TAC}$  (à droite)

### 2.2.3.2 Cas particulier des aquifères carbonatés

Pour les aquifères carbonatés et mixtes, les sous-indices  $Ind_{Si}$  et  $Ind_{TAC}$  perdent leur sensibilité sur les eaux jeunes car l'équilibre avec la calcite se produit très rapidement, les indices de saturation vis-à-vis de la calcite sont donc majoritairement autour de 0. Pour cette raison, ces sous-indices ont été retirés de l'interprétation de la chimie des eaux dans ces milieux. À ce stade, aucun élément supplémentaire n'a permis de compléter l'approche du DEH dans les milieux carbonatés et mixtes.

### 2.2.3.3 Calcul de l'Indice de résistance chimique (IRC)

Dans le cadre de cette étude, un indice de résistance chimique (IRC) a été développé pour les aquifères silicatés en faisant une moyenne arithmétique des 3 sous-indices décrits précédemment (Équation 14).

Équation 14 : indice de résistance chimique pour les aquifères silicatés

$$IRC_{silicates} = \frac{Ind_{DEH} + Ind_{Si} + Ind_{TAC}}{3}$$

Pour les aquifères carbonatés et mixtes, l'IRC est réduit au sous-indice lié au DEH (Équation 15).

Équation 15 : indice de résistance chimique pour les aquifères carbonatés

$$IRC_{carbonates} = Ind_{DEH}$$

## 2.3 Synthèse de construction de l'IRC

### 2.3.1 Synthèse version courte

La vulnérabilité des eaux souterraines est très généralement décrite par l'indice DRASTIC. Mais cette approche basée sur un transfert vertical de la surface à la ressource ne peut pas prendre en compte les écoulements latéraux et l'inertie de la ressource. Pour pallier ce manque, un indice de résistance chimique (IRC) calculé sur les données de chimie des eaux existantes est proposé. Facile à mettre en œuvre, sans coût supplémentaire, il permet de conforter l'approche DRASTIC dans la majorité des cas, mais surtout de mettre en évidence une vulnérabilité non identifiée par les approches conventionnelles.

L'indice de résistance chimique rend compte de la capacité d'une masse d'eau souterraine à résister à une pollution de surface. Cette capacité de la masse d'eau à atténuer l'impact d'un flux polluant, correspond à identifier le poids de la recharge dans l'écoulement global du bassin d'alimentation du puits. Autrement dit, la caractérisation de la résistance revient à discuter de la distribution des temps de séjour des eaux dans le milieu aquifère : les eaux les moins résistantes sont les plus récentes (recharge) et les eaux les plus résistantes correspondent aux eaux ayant séjourné très longtemps dans la nappe. Cette information n'est pas directement disponible, et elle a été approchée par l'étude de la dynamique des interactions fluide – roche, contrôle principal de l'évolution de la chimie des eaux souterraines. Pour cela 4 processus dominants ont pu être identifiés, modélisés et quantifiés sur l'ensemble des sites PACES :

- (i) l'altération chimique des roches,
- (ii) la précipitation de minéraux secondaires,
- (iii) l'échange cationique avec les argiles,
- (iv) les mélanges de masses d'eau.

Les processus d'altération et de précipitation des minéraux sont très variables en fonction du contexte géologique. Par conséquent, le calcul de l'IRC a été adapté à la nature des roches aquifères en distinguant les contextes silicatés d'une part des contextes carbonatés et mixtes d'autre part (Figure 27).

Dans le cas des aquifères carbonatés, l'IRC est composé d'un seul indice représenté dans un diagramme d'évolution hydrochimique (DEH) mettant en relation les bilans massiques (Na-Cl) et (Ca+Mg-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>) (Figure 22). Le DEH permet de prendre en compte l'impact combiné des 4 processus dominants ((i) à (iv)) sur le faciès chimique de l'eau dans les milieux carbonatés ou les cinétiques chimiques sont rapides.

Dans le cas des aquifères silicatés, le DEH a également été utilisé. Les cinétiques de minéralisation issues des processus d'altération des minéraux étant plus lentes, il a été choisi d'améliorer l'IRC en ajoutant deux sous-indices complémentaires. Ces sous-indices, toujours issus de la lecture des interactions eau-roche, incluent l'évolution de l'alcalinité, de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite et des teneurs en silice dissoute (Figure 26). L'IRC des milieux silicatés correspond à une moyenne arithmétique de l'indice basé sur le DEH ( $ind_{DEH}$ ), celui basé sur le couplage  $IS_{calcite}$  versus TAC ( $ind_{TAC}$ ) et celui basé sur le couplage  $IS_{calcite}$  versus Si dissous ( $ind_{Si}$ ).

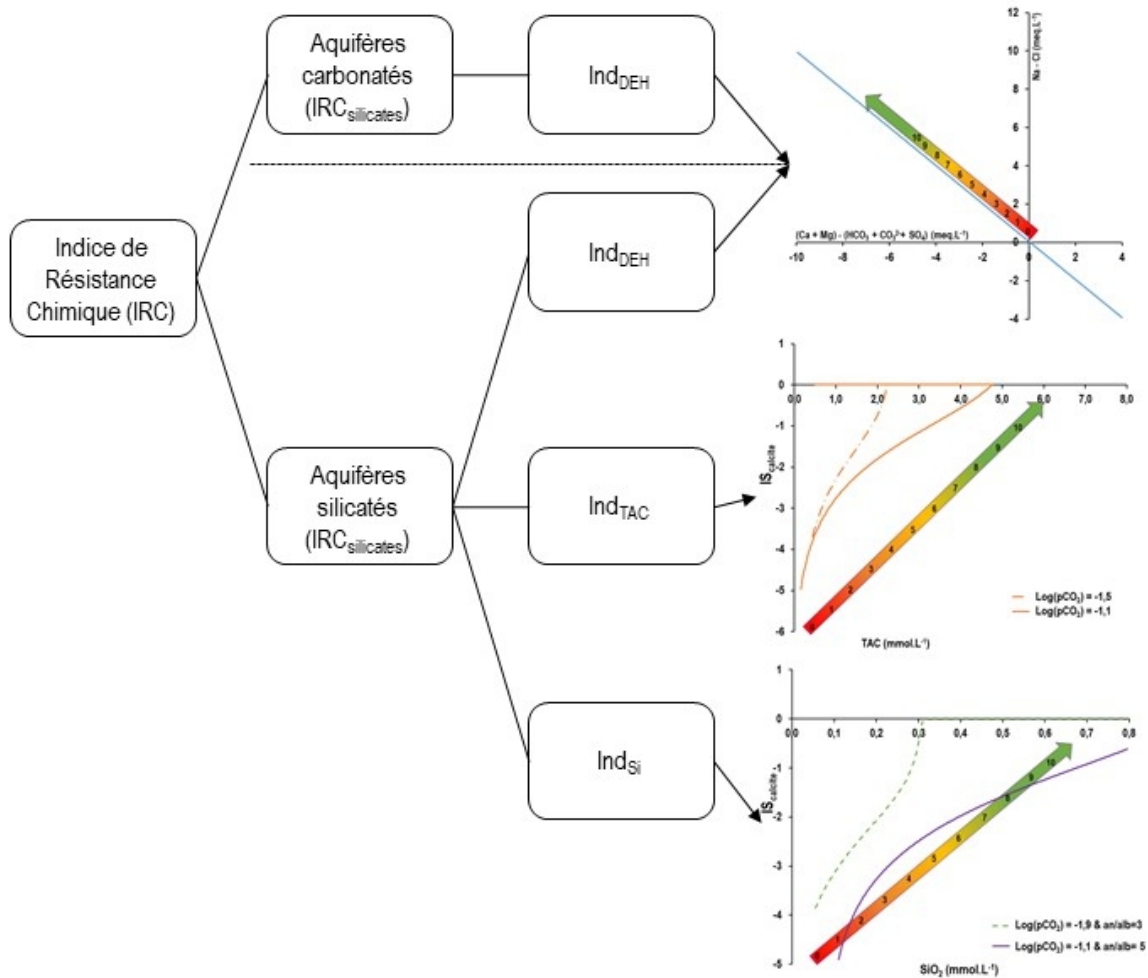


Figure 27 : Composition de l'indice de résistance chimique en fonction du contexte minéralogique des aquifères

### 2.3.2 Synthèse version étendue

La vulnérabilité des ressources en eau souterraine peut être définie par trois composantes :

- (i) la probabilité de transfert des polluants de surface vers la nappe,
- (ii) la capacité de résistance chimique de la ressource face à une pollution et
- (iii) la résilience de la ressource (Figure 3).

Des outils tels que l'indice DRASTIC permettent une caractérisation satisfaisante de la probabilité de transfert des polluants vers la nappe en décrivant précisément les propriétés des couches géologiques situées entre la surface du sol et la nappe. Ces approches intègrent une assimilation 1D verticale du transfert comme analogue de la vulnérabilité sans tenir compte des capacités de résistance des nappes face aux polluants. Ils ne permettent donc pas d'appréhender dans son ensemble l'impact réel d'un transfert de polluants vers et au sein des nappes. L'objectif de cette étude est de développer une méthode robuste de caractérisation de la composante de résistance des ressources en eau, afin d'enrichir les outils de protection de la ressource par une approche complémentaire aux connaissances déjà acquises sur les régions PACES.

La résistance d'une masse d'eau souterraine peut être définie par l'association de deux propriétés: la taille de l'aquifère (porosité efficace, géométrie/dimensions) et par son taux de renouvellement. Une résistance maximale correspond aux grands aquifères régionaux dont les taux de renouvellement sont faibles. À l'inverse, les petits aquifères locaux aux forts taux de renouvellement vont posséder une résistance très faible. Si l'on considère la masse d'eau souterraine étudiée comme homogène, la résistance pourrait être décrite par la distribution des temps de séjour de l'eau. Ils sont très faibles au niveau des aires de recharges, et augmentent au fur et à mesure de l'éloignement de la masse d'eau de ces secteurs à risque (Figure 5). Dans le cas d'aquifères régionaux possédant plusieurs zones de recharges, le long d'une même ligne d'écoulement, la résistance va évoluer en fonction des mélanges entre les eaux de recharge récentes et les eaux de nappe plus anciennes. Les outils de datation des eaux seraient pertinents pour étudier la résistance de la ressource, mais leur coût et la rareté des données ne permettent pas d'obtenir une caractérisation suffisamment précise en vue de la protection des ressources. L'alternative choisie dans le cadre de cette étude est basée sur la chimie des eaux avec une approche descriptive des processus contrôlant la distribution des éléments majeurs dans l'eau souterraine depuis la recharge jusqu'aux lignes d'écoulements les plus profondes.

Les processus chimiques majeurs intervenant dans les aquifères sont :

- (i) l'altération chimique des roches;
- (ii) la précipitation de minéraux secondaires;
- (iii) l'échange cationique avec les argiles;
- (iv) les mélanges de masses d'eau.

Les trois premiers processus sont issus des interactions eau – roche et vont dépendre en premier lieu du contexte géologique. Au Québec, les deux principaux contextes géologiques rencontrés sont les aquifères silicatés et les aquifères carbonatés (Meyzonnat *et al.*, 2018a). Les dynamiques d'altération des roches et de précipitation des minéraux secondaires étant beaucoup plus rapides dans les milieux carbonatés que dans les milieux silicatés (Langmuir, 1997), ces deux contextes ont été traités séparément.

Dans le cas des aquifères silicatés, la dynamique de l'évolution des faciès chimiques est contrôlée par l'altération des feldspaths plagioclases. Présents dans la quasi-totalité des aquifères étudiés, ils font partie des minéraux dont l'altération est continue en conditions supergènes propres aux aquifères peu profonds (Figure 15). L'agressivité de l'eau, proportionnelle à la  $p\text{CO}_2$  qui lui est imposée, va jouer un rôle essentiel sur le processus d'altération des roches. À l'échelle régionale, pour chaque PACES, les variations de contexte géologique et de  $p\text{CO}_2$  ont été prises en compte par des modélisations sous Phreeqc de l'altération des plagioclases en différentes proportions sous différentes  $p\text{CO}_2$  initiales. Pour cela, dans chaque région, plusieurs puits ont été sélectionnés comme les plus représentatifs de la recharge récente et ont servis pour établir les conditions initiales des modélisations. La précipitation des minéraux secondaires tels que la calcite a aussi été considérée dans les modélisations afin de reproduire au mieux l'évolution chimique des eaux souterraines issue de ces deux processus. La calcite, stable dans les conditions de surface, est le minéral secondaire le plus répandu. Le suivi de l'indice de saturation de l'eau souterraine vis-à-vis de ce minéral ( $IS_{\text{calcite}}$ ) est apparu comme un excellent traceur du temps de parcours de l'eau dans l'aquifère. La mise en relation de ce paramètre avec la silice dissoute d'un côté et l'alcalinité de l'autre, a permis d'illustrer les dynamiques hydrochimiques modélisées et de les comparer aux données des puits prélevés (Figure 24 et Figure 25). L'échange cationique a pu être également identifié. Il se fait principalement par interaction avec les argiles reconnues dans les dépôts marins, riches en sodium. Ce processus se traduit par un enrichissement progressif des eaux souterraines en sodium au détriment des cations bivalents présents, dès lors que l'aquifère est en contact avec ces argiles. La prise en compte de ce processus se fait grâce

au diagramme d'évolution hydrochimique (DEH) qui relie le bilan Na – Cl avec le bilan (Ca + Mg) – (HCO<sub>3</sub> + CO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>). S'appuyant sur les méthodes déployées dans les études antérieures (Blanchette *et al.*, 2010; Cloutier *et al.*, 2006; Meyzonnat *et al.*, 2016) le DEH permet d'inclure l'ensemble des processus chimiques dans une seule représentation graphique où :

- les eaux de recharge se placent à l'origine des axes du graphique
- l'évolution progressive du faciès chimique le long des lignes d'écoulement suit la droite de pente -1 (Figure 21).

Le mélange de masses d'eaux n'est pas quantifiable directement, mais son impact est bien identifié dans le DEH car il s'agit généralement d'une contribution de recharge récente dont le faciès est bien connu. En combinant les approches du DEH (Figure 22) et de l'IS<sub>calcite</sub> (Figure 26), un indice de résistance global a été calculé pour toutes les eaux échantillonnées dans les puits situés en milieu silicaté.

Dans le cas des aquifères carbonatés, les processus de dissolution et de précipitation des carbonates sont beaucoup plus rapides, ce qui rend impossible la traduction de l'évolution temporelle de la chimie de l'eau avec l'IS<sub>calcite</sub>. À ce stade, le seul outil de suivi utilisable pour calculer un indice de résistance des ressources en eau de ces milieux est le DEH, malgré une sensibilité moins forte pour décrire l'impact de la dissolution des carbonates sur la chimie de l'eau.



### 3 Résultats

Les données de la base BD-V1 ont été inspectées et triées sur les critères suivants :

- 1) Analyse complète des ions majeurs ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}$  et  $\text{K}$ ) ;
- 2) Mesures de pH et alcalinité (TAC) disponibles ;
- 3) Balance ionique (BI) comprise dans  $\pm 10 \%$  pour tous les échantillons ayant une minéralisation totale (TDS) supérieure à  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ .

À partir de ces trois critères, 244 ont été exclus des 2608 puits contenus dans la BD-V1. La nouvelle version de la base de données, BD-V2 a été utilisée pour définir les contextes hydrogéologiques des secteurs étudiés ainsi que pour décrire les faciès chimiques présents. Puis en fonction des caractéristiques chimiques des eaux, de nouveaux critères de sélection ont été appliqués pour le calcul des indices de résistance. Cette nouvelle sélection s'appuie sur les critères suivants :

- $\text{TDS} < 1500 \text{ mg.L}^{-1}$
- $\text{IS}_{\text{calcite}} \leq 1$
- $\text{Na-Cl} > -0.5 \text{ meq.L}^{-1}$  ou  $(\text{Ca}+\text{Mg})-(\text{HCO}_3+\text{CO}_3+\text{SO}_4) < 0.5 \text{ meq.L}^{-1}$

Le nombre de puits conservés à chaque étape est reporté dans la fiche descriptive de chaque région PACES étudiée. Grâce à l'ensemble des informations collectées sur les puits échantillonnés, une classification des sites prélevés a été mise en place afin de disposer d'une base de traitement commune pour tous les jeux de données. Cette classification s'articule autour de deux volets : le contexte hydrogéologique de l'aquifère au droit du puits et le type de minéralisation contrôlant la chimie des eaux. Pour le contexte hydrogéologique, 4 classes ont été définies :

- i. Granulaire libre et semi-captif (GL),
- ii. Granulaire captif (GC),
- iii. Roc libre et semi-captif (RL)
- iv. Roc captif (RC).

Lorsque l'information sur la captivité de la nappe manquait, le puits a été classé par défaut comme libre (critère le plus pénalisant en termes de vulnérabilité).

Pour le type de minéralisation, 3 classes ont été définies :

- i. Milieux silicatés,
- ii. Milieux carbonatés et mixtes carbo-silicatés et
- iii. Indéterminés.

Les puits classés dans la catégorie indéterminés correspondent à des dépôts meubles (tills, dépôts fluvio-glaciaires) issus de l'érosion des roches affleurantes, majoritairement silicatées. Cette catégorie a donc été traitée de la même manière que les aquifères silicatés pour le calcul des indices de résistance.

Dans cette partie, les principales caractéristiques hydrogéologiques et géochimiques des régions PACES et pré-PACES sont présentées individuellement. On retrouve pour chaque site PACES :

- La synthèse géologique et hydrogéologique,
- Une caractérisation géochimique des eaux souterraines,
- Une caractérisation des processus à l'origine de la minéralisation des eaux,
- La comparaison des IRC obtenus en fonction des indices DRASTIC.

Concernant le fonctionnement hydrogéologique des différentes régions, le fleuve Saint-Laurent représente une limite entre les régions situées au nord d'une part et les régions situées au sud du fleuve d'autre part, chaque rive présentant ses propres modes de fonctionnement. Ces deux ensembles de région sont présentés séparément, avec une évolution géographique de l'ouest vers l'est.

### 3.1 Régions situées au Nord du fleuve Saint-Laurent

Sur les 15 régions étudiées, 9 se situent au nord du fleuve : Abitibi-Témiscamingue, Outaouais, Vaudreuil-Soulanges, Basses-Laurentides, Mauricie, Communauté Métropolitaine de Québec, Portneuf, Saguenay-Lac Saint Jean, Charlevoix-Haute-Côte-Nord. Les résultats de ces neufs secteurs sont présentés ci-après.

#### 3.1.1 Abitibi-Témiscamingue (PACES ABTE 1 & 2)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 424**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 417**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour les calculs d'indice de résistance : 401**

La partie de la région d'Abitibi-Témiscamingue étudiée dans les PACES couvre une superficie totale de 19 549 km<sup>2</sup> et a été divisée en deux parties pour ces études : 9 187 km<sup>2</sup> pour le PACES ABTE1 et 10 362 km<sup>2</sup> pour le PACES ABTE2. Le contexte hydrogéologique étant similaire sur ces deux secteurs, il a été choisi ici de regrouper les deux études en une seule synthèse.

Située le plus au nord de tous les secteurs étudiés, la région se déploie uniquement sur la Province géologique Supérieure, constituée de roches cristallines archéennes du bouclier canadien. La partie nord de la région (sous-province de l'Abitibi) est dominée par des roches volcaniques et métamorphiques recoupées par des intrusions granitoïdes (Bondu *et al.*, 2020). La partie sud de la région (sous-province du Pontiac) est principalement caractérisée par des roches métamorphiques recoupées par des granitoïdes et des gneiss. L'ensemble forme des aquifères de roc régionaux exclusivement silicatés, recouverts de manière discontinue par des formations meubles quaternaires. Ces formations meubles datant de la dernière période glaciaire et postglaciaire sont de différents types : les tills, les sédiments fluvioglaciaires, les sédiments d'eau profonde lacustre, les alluvions et les milieux organiques. Parmi ces formations, ce sont les dépôts peu perméables glaciolacustres dont l'épaisseur moyenne de 10 m peut atteindre jusqu'à 50 m par endroit qui couvrent la plus grande portion de territoire (40 %) et qui sont à l'origine du confinement des aquifères sous-jacents.

Les aquifères silicatés au roc sont d'extension régionale et les flux d'eau transitent de l'amont vers l'aval du territoire principalement grâce à un réseau de fractures (Figure 28). Leur alimentation se fait par deux modes principaux : la recharge directe sur les secteurs d'affleurement du roc, et la recharge indirecte par le transit vertical des eaux des aquifères granulaires sus-jacents. Concernant les aquifères granulaires, ces derniers sont d'extension locale à régionale, souvent présents à l'affleurement, mais certains se retrouvent aussi entre le roc sous-jacent et les argiles quaternaires sus-jacentes. Leur alimentation peut se faire directement par l'infiltration de la pluie sur les secteurs affleurant, mais aussi de manière indirecte par le transit dans l'aquifère rocheux en amont hydraulique, ou par l'intermédiaire de flux transitant dans d'autres couches aquifères granulaires sus-jacentes.

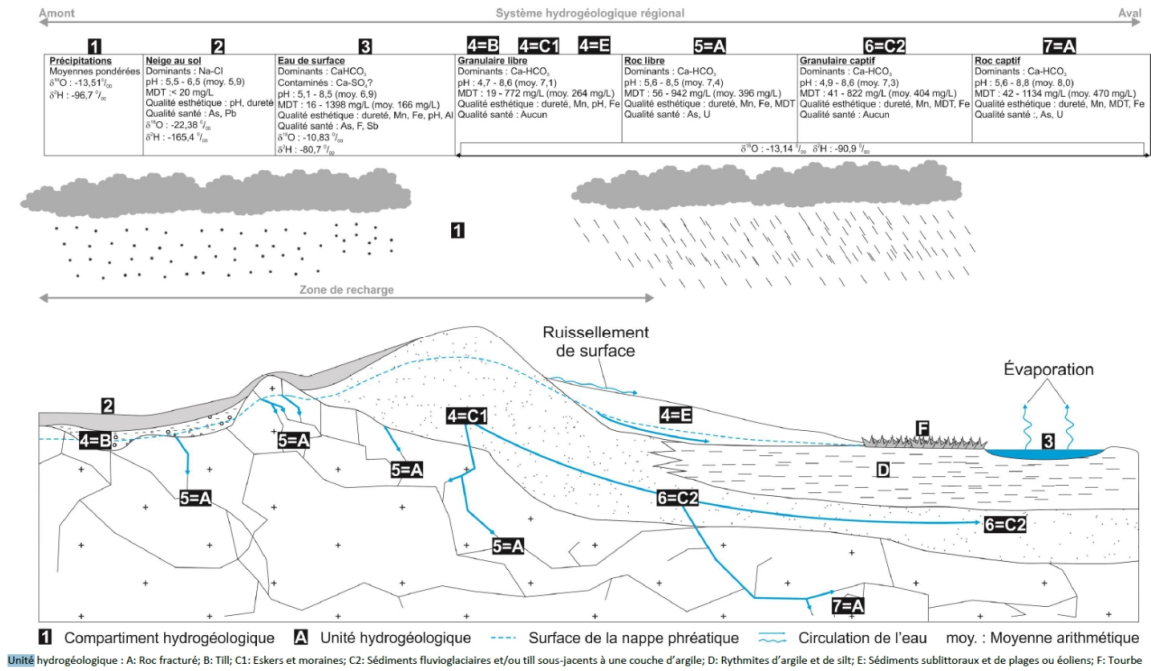


Figure 28 : Synthèse du contexte hydrogéologique des PACES ABTE1 et 2 (Cloutier *et al.*, 2015)

Sur l'ensemble des deux PACES, 61% des puits échantillonnés se situent dans des aquifères rocheux tandis que 39 % se situent dans des aquifères granulaires (Figure 29). La majorité des puits présentent des conditions de nappe libre (63 %), et 37 % des conditions de nappe captive. D'un point de vue minéralogique, les roches et les sédiments meubles sont tous d'origine silicatée. Cette région est la seule à ne présenter que des puits en milieux silicatés.

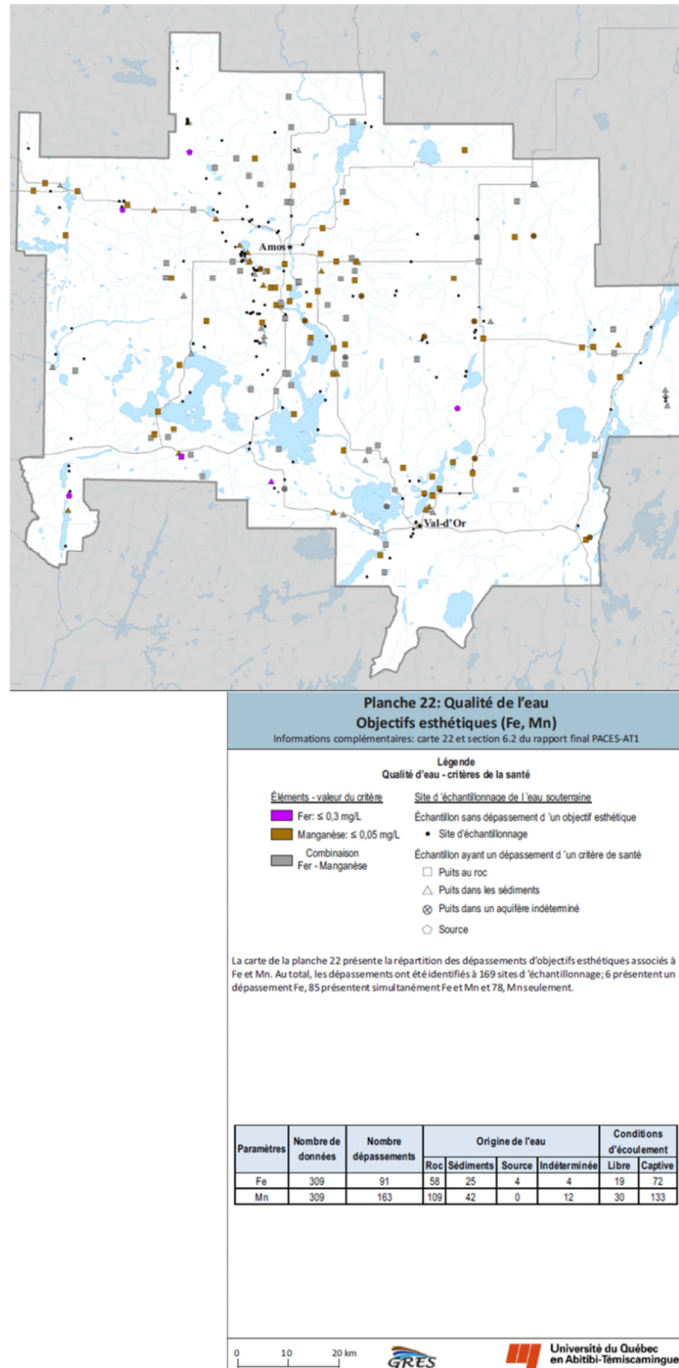
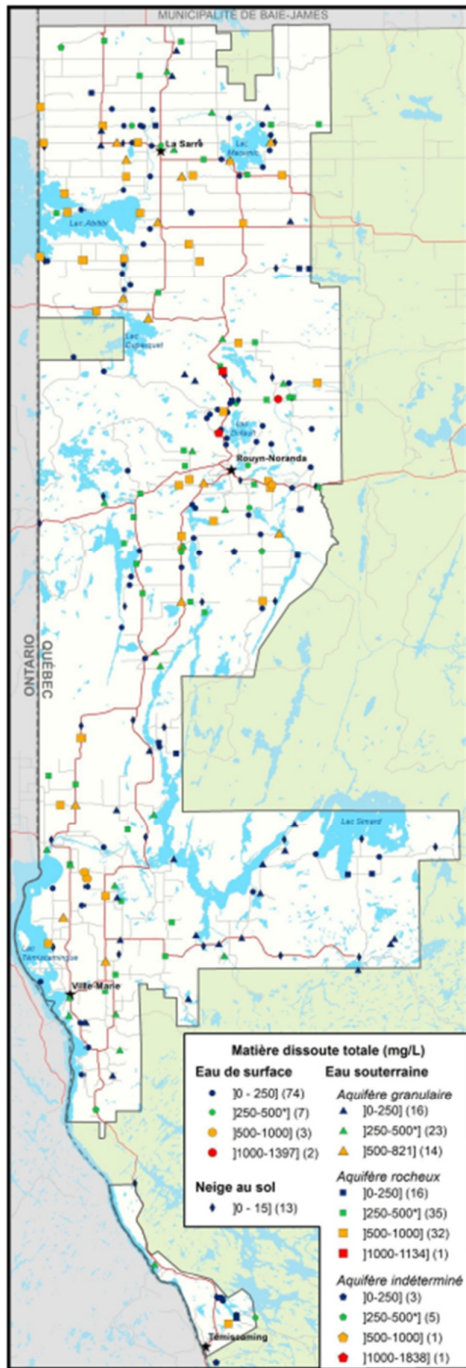


Figure 29 : Localisation des puits échantillonnés avec leur minéralisation totale dans la partie Ouest (ABTE 2 à gauche, Cloutier *et al.* (2015)) et leur qualité en fer et manganèse pour la partie Est (ABTE1 à droite, Cloutier *et al.* (2013))

Majoritairement de type bicarbonaté-calcique, les faciès chimiques reconnus dans ces aquifères sont très homogènes (Figure 30a). La chimie ne permet pas de distinguer les eaux issues du roc ou des aquifères granulaires. Ceci n'est pas surprenant puisque la nature pétrographique des aquifères granulaires se rapproche du roc dont les matériaux sont principalement issus. En l'absence de carbonates, la minéralisation calcique dominante implique une altération de silicates calciques comme les feldspaths (plagioclases). L'altération des silicates conduit généralement à une saturation progressive des eaux vis-à-vis de la calcite du fait de l'augmentation du pH et de la libération de

calcium en solution. C'est ce qui explique par exemple le remplissage de fractures par de la calcite ou de l'aragonite en milieu purement silicaté. Les eaux de recharge sont les plus sous-saturées vis-à-vis de la calcite ( $IS_{calcite}$  inférieur à 0), puis par interaction eau-roche, l'altération des silicates contribue à élever la valeur de cet indice et ceci d'autant plus que les surfaces et temps de contacts sont grands. La distribution de l' $IS_{calcite}$  en fonction du contexte hydrogéologique (Figure 30b) vient confirmer cette relation. Les parties libres des aquifères sont plus sous-saturées vis-à-vis de la calcite. L' $IS_{calcite}$  tend vers 0, soit la saturation vis-à-vis des carbonates, pour les parties captives où le temps de séjour de l'eau est généralement plus important. Enfin, les indices sont relativement plus élevés dans le roc où la porosité efficace (volume d'eau circulant rapporté au volume de roche) est généralement plus basse. Néanmoins, très localement, des minéraux carbonatés contenus dans les sédiments glaciolacustres peuvent accélérer l'équilibration des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite.

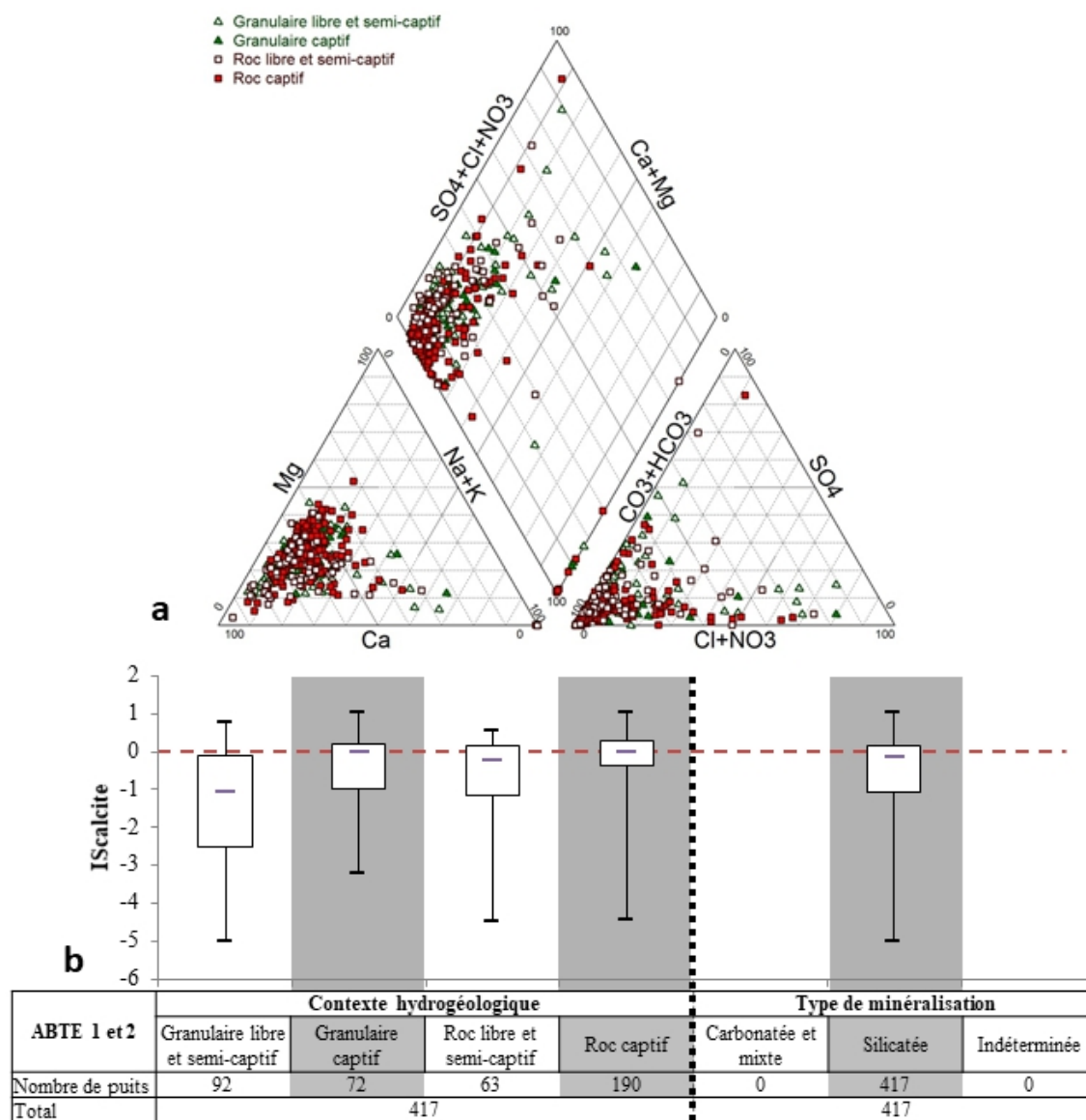


Figure 30: Faciès géochimique des eaux de la région ABTE représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite ( $IS_{calcite}$ ) en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

En concordance avec le diagramme de PIPER, le DEH met en évidence la faible évolution du faciès chimique des ressources en eau prélevées dans la majorité des puits de la région, indépendamment de leur contexte hydrogéologique (Figure 31). La représentation des  $IS_{calcite}$  en fonction des teneurs en silice dissoute et en alcalinité permet d'affiner les observations faites sur le DEH. Les eaux issues des aquifères granulaires libres sont pour la plupart moins évoluées que le reste des sites (Figure 32). La distribution des points dans ces graphiques s'accorde avec la distribution de la recharge (aquifère libre versus captif). En milieu captif, aucune différence significative n'apparaît entre les eaux des aquifères granulaires et du roc : la saturation vis-à-vis de la calcite est atteinte et la variation des teneurs en alcalinité et en silice dissoute pourrait dériver de conditions de minéralisation différentes. Ces conditions sont encadrées par les courbes de modélisation des interactions eau – roche et plus précisément de l'altération des minéraux pour différentes proportions de plagioclases calciques et différentes  $pCO_2$  initiales (Figure 32).

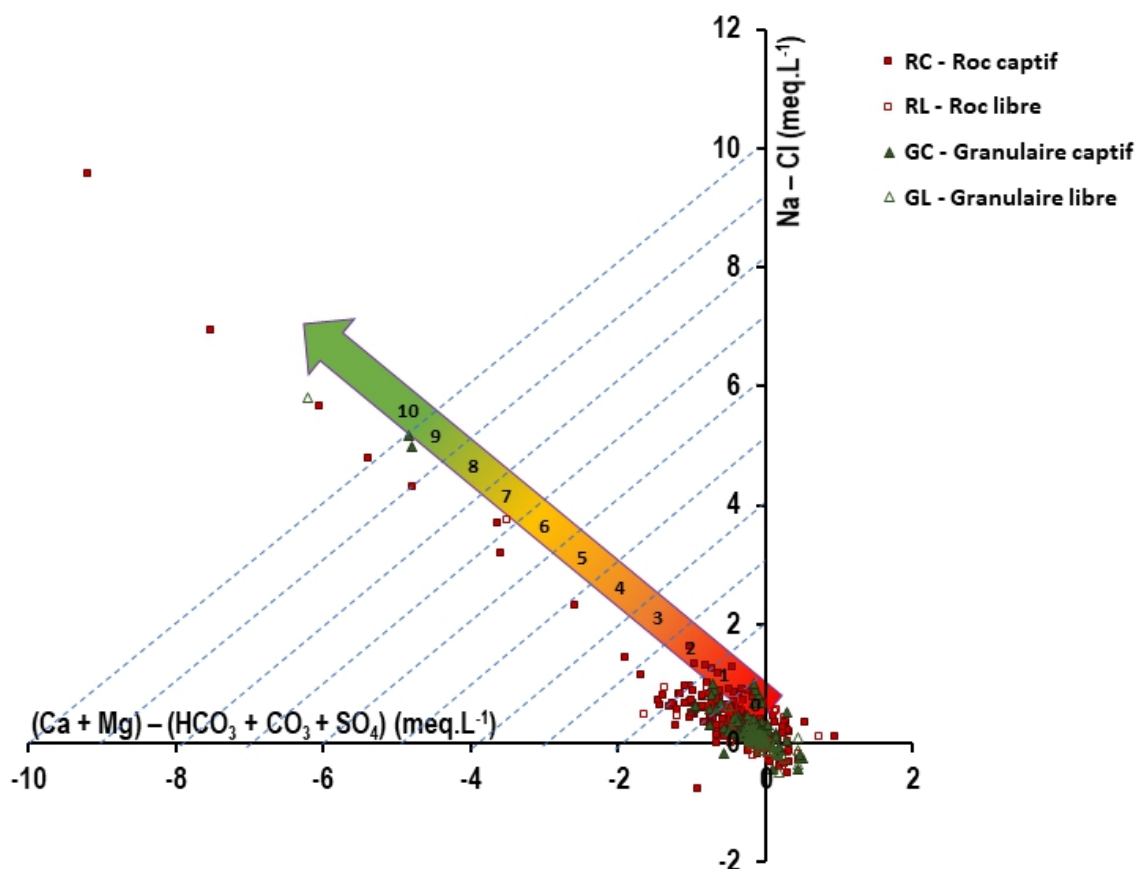


Figure 31 : Faciès chimique des puits des PACES ABTE 1 et ABTE 2 représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

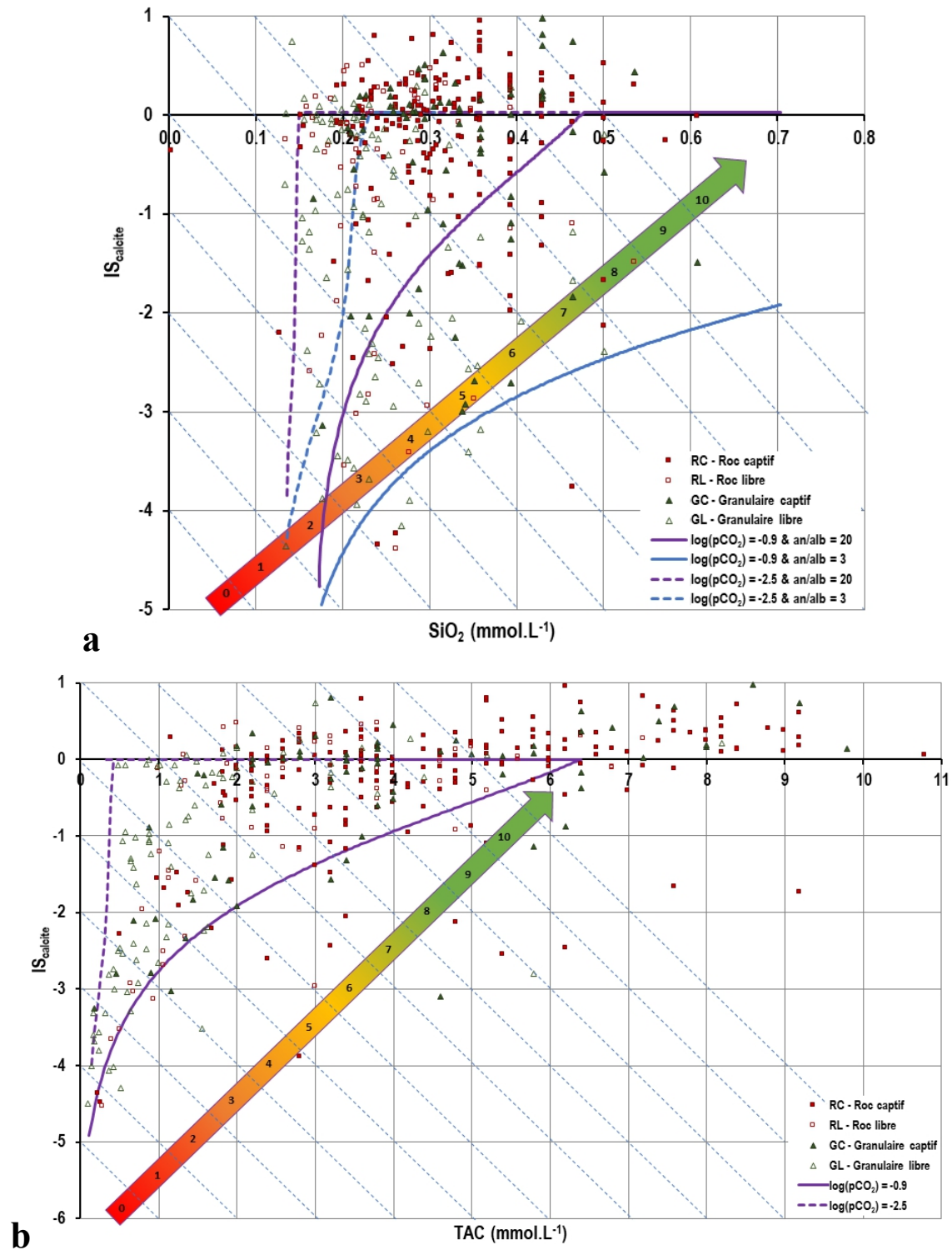


Figure 32 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observée dans les régions PACES ABTE 1 et 2 (points) et modélisée pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

Les indices de résistance chimique ont été calculés selon les deux formules présentées précédemment : la méthode basée uniquement sur le DEH (Ind<sub>DEH</sub>), et la méthode couplée (IRC, Paragraphe 2.2.3.3). Les aquifères granulaires dont la faible extension limite leur capacité d'endiguement des pollutions



contiennent les nappes aux résistances les plus faibles. La comparaison des résultats d'indices de résistance obtenus par les deux méthodes met en évidence que l'IRC décrit de manière beaucoup plus fine l'évolution de la résistance de la ressource en eau dans ces aquifères (Figure 33). En effet, pour les ressources en eau jugées les moins résistantes avec le DEH ( $Ind_{DEH}$  variant de 0 à 2), l'IRC couvre une gamme de résistance plus importante allant de 0 à 8 (Figure 33b). Cet apport permet d'augmenter la sensibilité de la méthode pour l'interprétation des données chimiques en créant une échelle de résistance plus graduelle pour ces eaux évoluant dans le faciès bicarbonaté-calcique. Sur l'ensemble des régions, cette méthode de calcul sert donc de base pour les discussions dans les milieux silicatés.

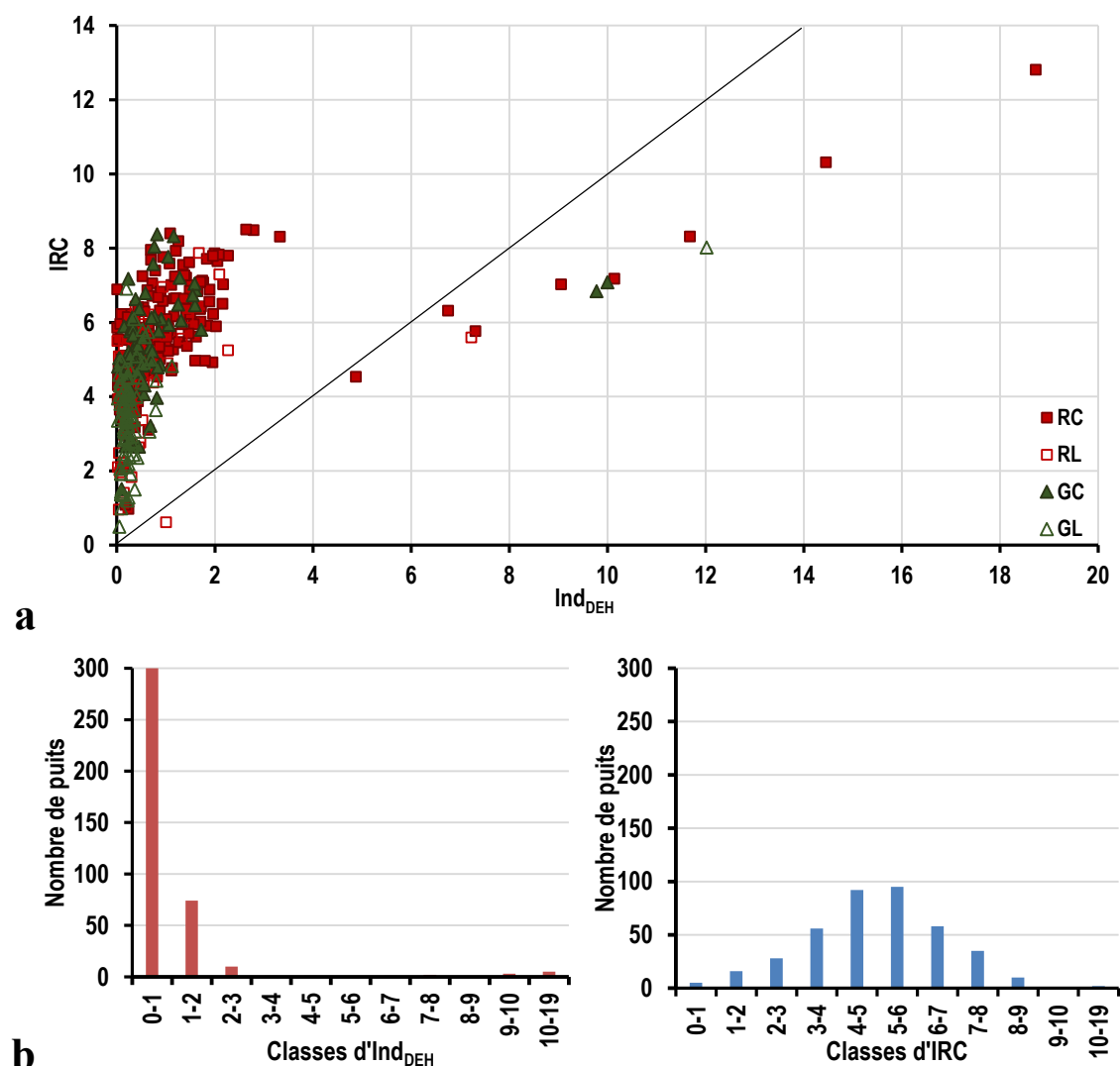


Figure 33 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ ) (a) et distribution des puits selon les gammes de valeur d'IRC et d' $Ind_{DEH}$  (b)

Rappelons que l'indice de résistance des nappes obtenu ici est la seconde composante de la vulnérabilité telle qu'elle a été définie en première partie. À ce titre, cet indice est complémentaire à la méthode DRASTIC et il est intéressant de voir qu'une certaine concordance dans les échelles de valeur de l'IRC et de l'indice DRASTIC est présente (Figure 34, Figure 35 et Figure 36). Les ressources en eau possédant une grande résistance (points verts) sont éloignées des secteurs jugés vulnérables par DRASTIC ainsi que des plans d'eau superficiels. Elles sont donc éloignées des aires

de recharge, et correspondent à des masses d'eaux plus évoluées, ce qui est cohérent avec le schéma d'évolution conceptuel décrit au chapitre 2 (Figure 5 et Figure 7). Ces masses d'eau sont cependant peu représentées dans cette région. Les ressources de résistance moyenne (points jaunes/oranges), qui constituent la majorité des puits étudiés, se répartissent sur des secteurs couverts par des indices DRASTIC moyens. Enfin, les ressources les moins résistantes (points rouges) se retrouvent dans les secteurs de recharge (fonds de vallées...) caractérisés par des indices DRASTIC élevés. Aux abords du réseau hydrographique, bien que les indices DRASTIC de ces secteurs ne soient pas très élevés, un certain nombre de points illustrent des résistances des masses d'eau faibles (i.e. puits encerclés de pointillés noirs). Il est fort probable que des interactions eau de surface – eau souterraine puissent contribuer à ces résultats.

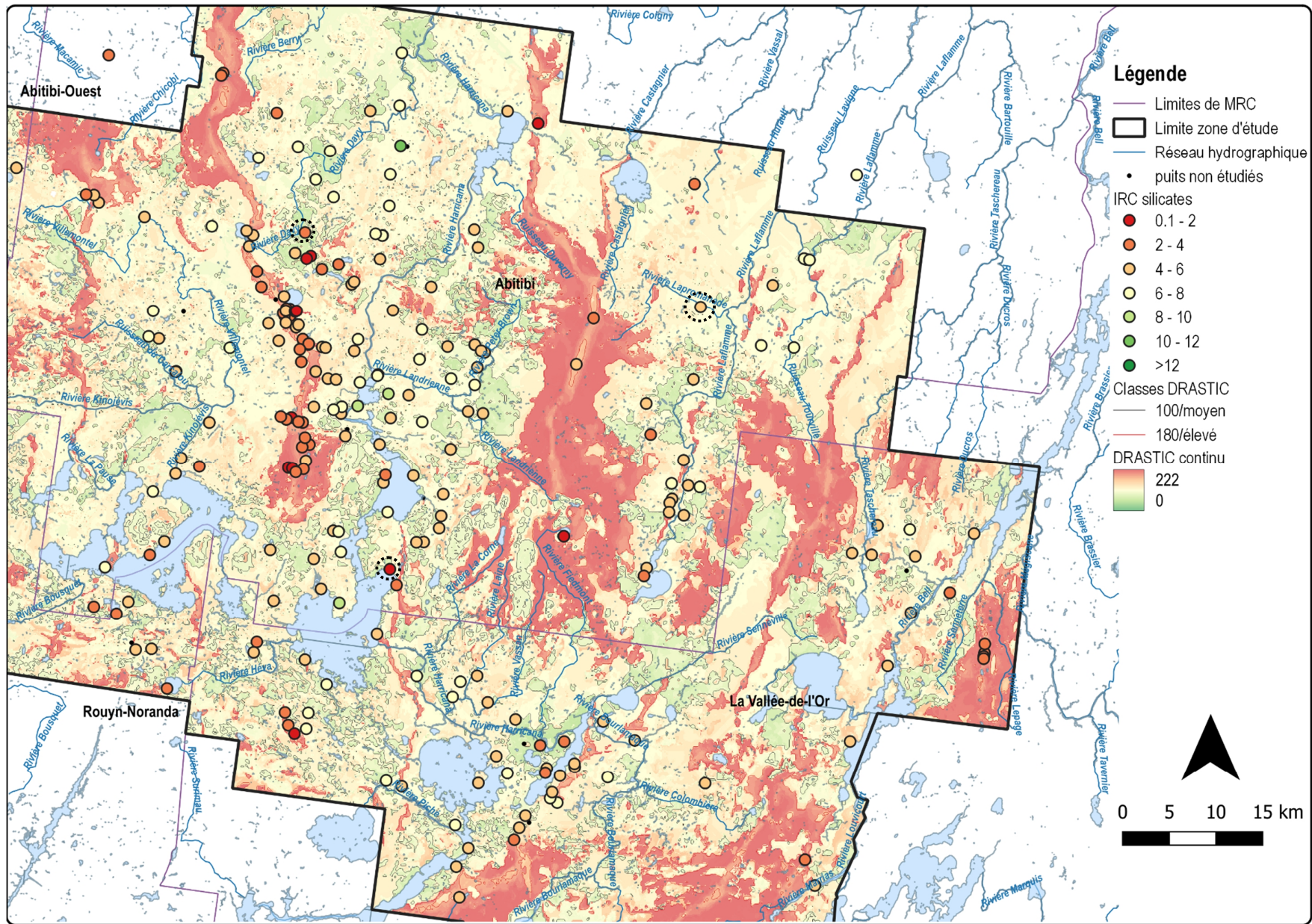


Figure 34 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie nord-est

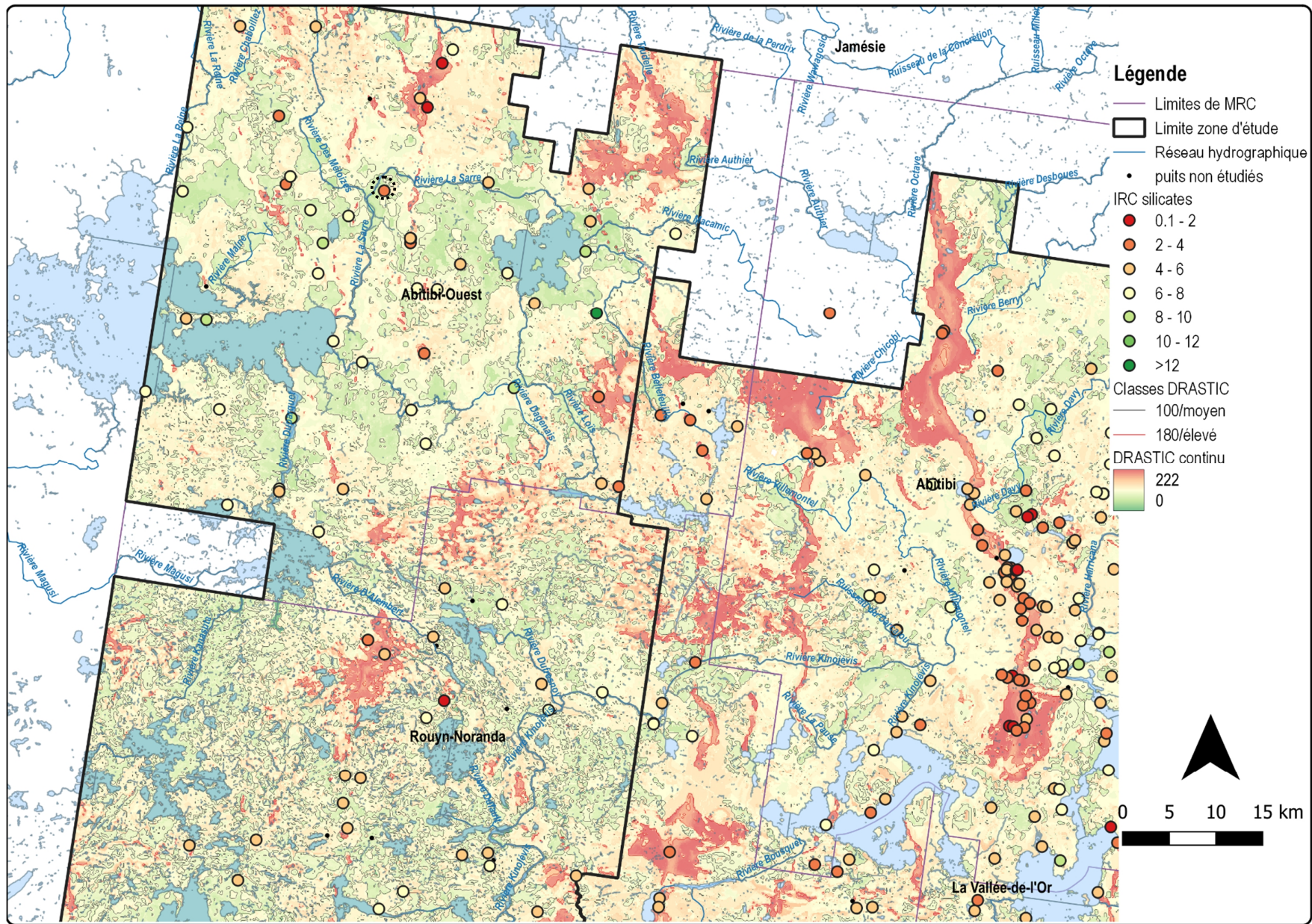


Figure 35 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie nord-ouest

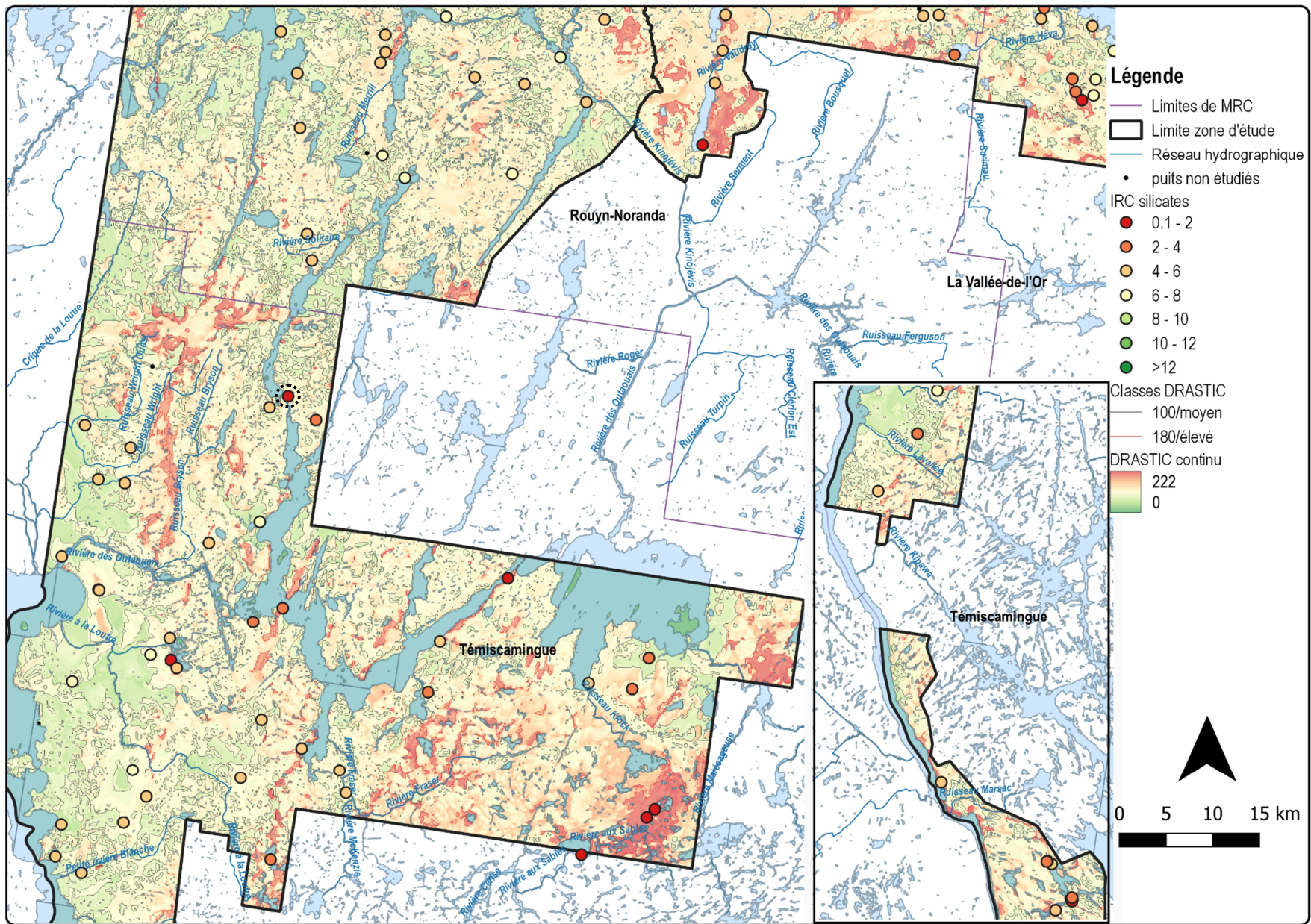


Figure 36 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC pour les PACES ABTE 1 et 2 – Partie sud

### 3.1.2 Outaouais (PACES OUT)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 139

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 128

Nombre de puits échantillonnés conservés pour les calculs d'indice de résistance : 102

Le PACES de l'Outaouais couvre une superficie de 13 762 km<sup>2</sup> et s'étend sur deux provinces géologiques : la Province de Grenville au nord, qui recouvre près de 90 % du territoire d'étude et la Plate-forme du Saint-Laurent au sud, principalement le long de la rivière des Outaouais. Les roches calcaires ordoviciennes de la Plate-forme du Saint-Laurent reposent en discordance sur le socle cristallin précambrien. Recouvrant le roc de manière discontinue, on retrouve des formations meubles d'origine glaciaire (tills, dépôts fluvio-glaciaires), qui se retrouvent elles-mêmes recouvertes par les argiles de la mer de Champlain dans sa zone d'extension. Les dépôts meubles les plus récents sont composés de sables et graviers (alluvions anciens et récents).

D'un point de vue hydrogéologique, les aquifères au roc (silicaté ou carbonaté) sont interconnectés entre eux (Figure 37). Les roches carbonatées sont majoritairement confinées, tandis que le roc précambrien se retrouve à l'affleurement sur les Hautes-Terres. La recharge se fait donc préférentiellement sur les hauteurs où le roc précambrien affleure, puis alimente le roc carbonaté par des écoulements souterrains profonds. Les aquifères granulaires ont une extension très locale et sont donc souvent déconnectés les uns des autres. En revanche, ils se retrouvent parfois en connexion avec les aquifères au roc, permettant des échanges entre les deux milieux.

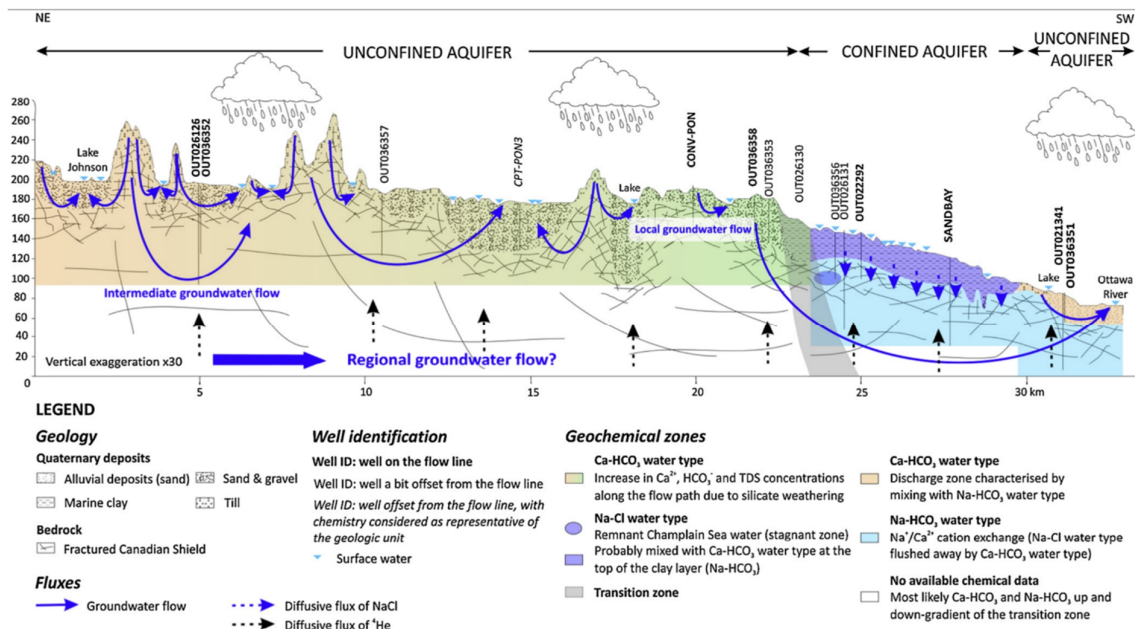
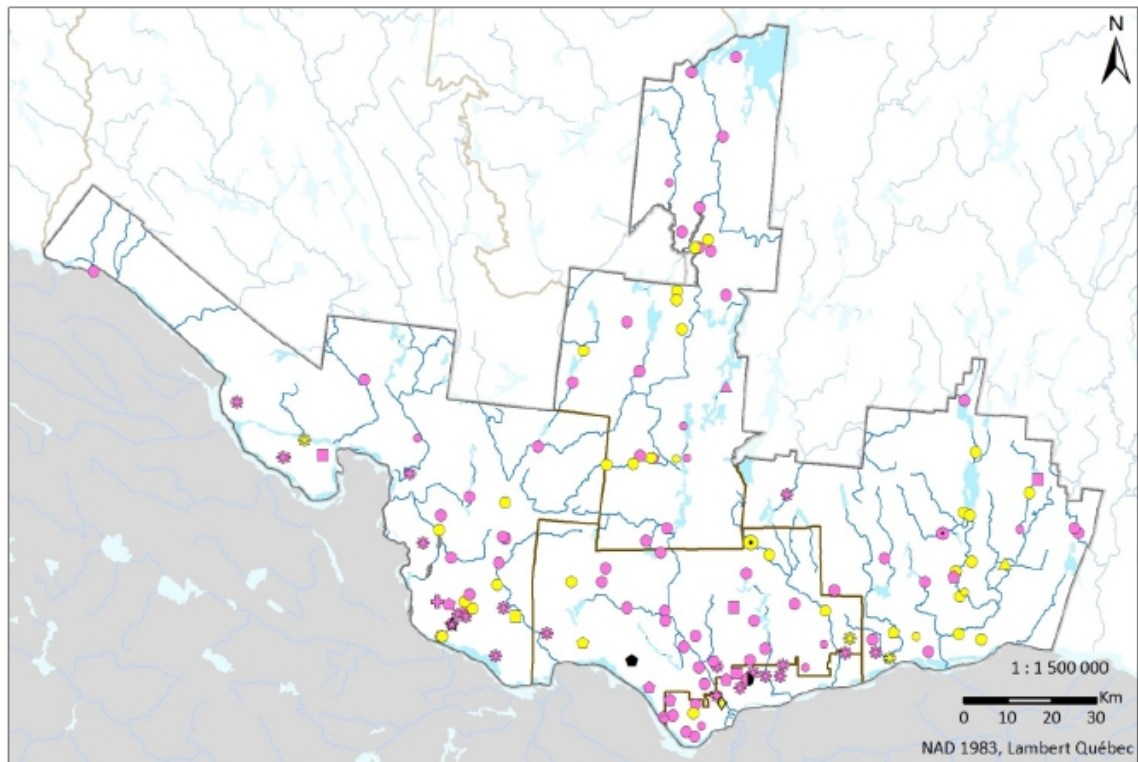


Figure 37: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Outaouais avec les faciès chimiques des ressources en eau et les principales lignes d'écoulement schématisées (Montcoudiol *et al.*, 2015)

Les puits échantillonnés pour caractériser les eaux souterraines sont dans 70 % des cas des puits au roc et dans 30 % des cas des puits granulaires (Figure 38). 45 % des puits prélèvent des nappes libres, 15 % des nappes semi-captives et 40 % des nappes captives. En termes de minéralogie majoritaire, 60 % des puits sont en milieu silicaté, 4 % sont en milieu carbonaté, 9 % bénéficient d'un mélange de roches silicatées et carbonatées et 27 % sont indéterminés.



### Types d'eau

#### Puits dans les aquifères fracturés

- Ca-Cl
- Ca-HCO<sub>3</sub>
- Ca-Mixte
- ▲ Ca-SO<sub>4</sub>
- Mixte-Cl
- ★ Mixte-HCO<sub>3</sub>
- Na-Cl
- ✱ Na-HCO<sub>3</sub>
- ✱ Na-SO<sub>4</sub>
- Non calculable

#### Puits dans les dépôts du Quaternaire

- Ca-Cl
- Ca-HCO<sub>3</sub>
- ▲ Ca-SO<sub>4</sub>
- Ca-Mixte
- ◆ Mg-HCO<sub>3</sub>
- Na-Cl
- ✱ Na-HCO<sub>3</sub>
- Non calculable

#### Type d'aquifère inconnu

- Na-Cl

Figure 38: Spatialisation des types d'eau des puits prélevés en fonction du type d'aquifère rencontré (Comeau et al., 2013)

À l'exception de quelques puits, l'ensemble des eaux souterraines prélevées dans ce PACES sont saturées vis-à-vis de la calcite (Figure 39b). Cette observation tend à démontrer la prédominance de l'altération des minéraux calciques, qu'ils soient silicatés ou carbonatés dans la totalité des aquifères échantillonnés. Seuls les aquifères granulaires libres et silicatés renferment par endroits des eaux suffisamment jeunes pour ne pas avoir eu le temps de s'équilibrer avec la calcite.

D'un autre côté, les eaux des aquifères au roc captifs de la Plate-forme du Saint-Laurent, présentent des faciès chimiques variés passant du bicarbonaté-calcique au bicarbonaté-sodique puis au chloruré-sodique (Figure 39a). Sur ce secteur où la dernière transgression marine a laissé beaucoup d'indices géochimiques, le passage au faciès chloruré-sodique peut s'expliquer par un mélange avec des eaux de mer anciennes piégées dans les sédiments profonds. Les eaux prélevées possédant ce faciès sont trop minéralisées pour être potables, elles ont donc été exclues des calculs d'indice.

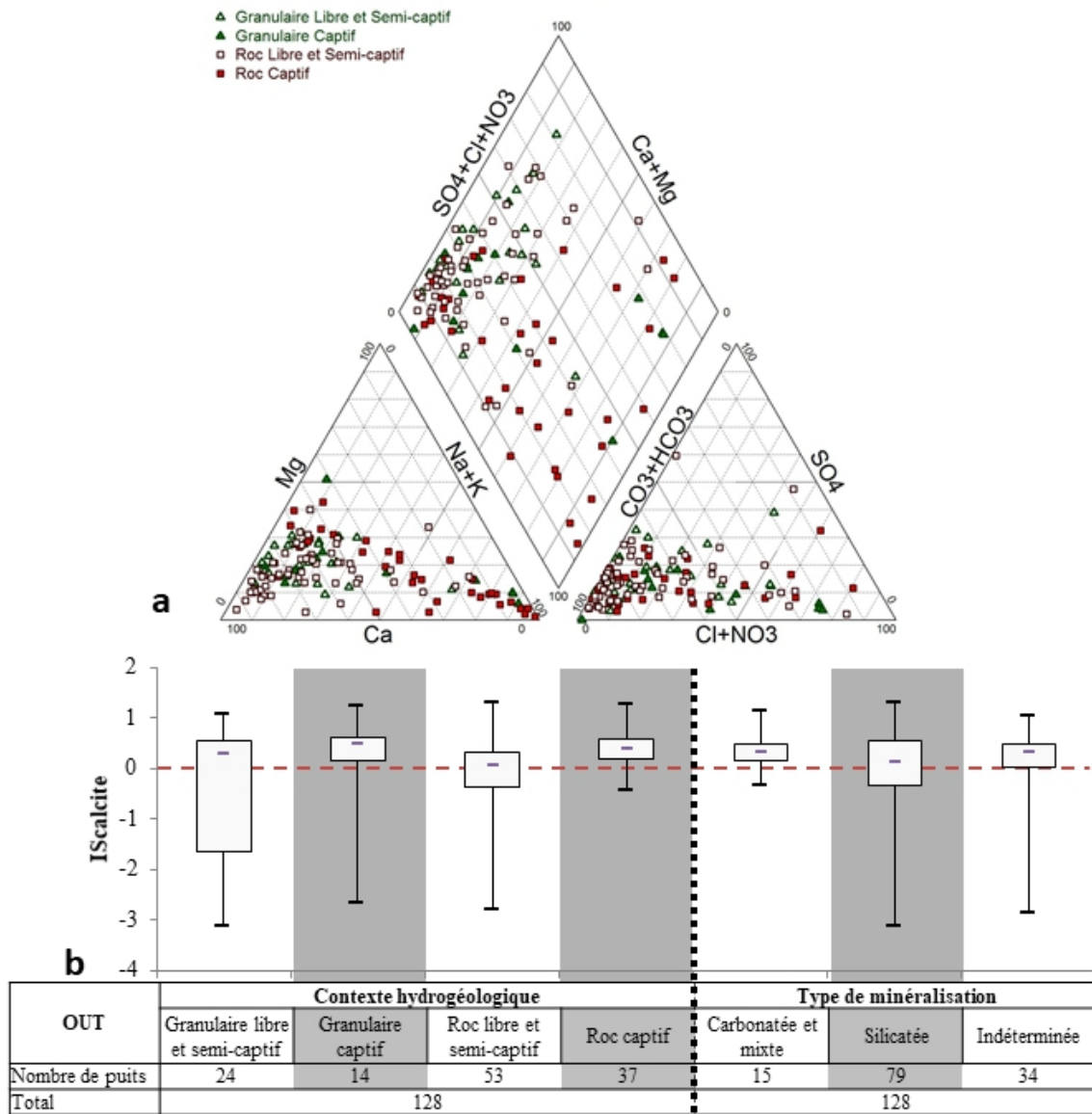


Figure 39 : Faciès géochimique des eaux de la région OUT représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $I_{\text{scalcite}}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Les puits échantillonnés donnent accès à des eaux dont le temps de séjour moyen est assez long pour permettre aux premiers équilibres chimiques de se faire, même en milieu silicaté. Cette hypothèse est confortée par le DEH, sur lequel les points se répartissent majoritairement sur une gamme d'indice de 0 à 7 (Figure 40). Les eaux les plus évoluées se retrouvent dans les aquifères rocheux captifs, ce qui est cohérent avec la position de ce contexte hydrogéologique souvent à l'aval des lignes d'écoulement, renfermant ainsi les masses d'eau ayant séjourné le plus longtemps.



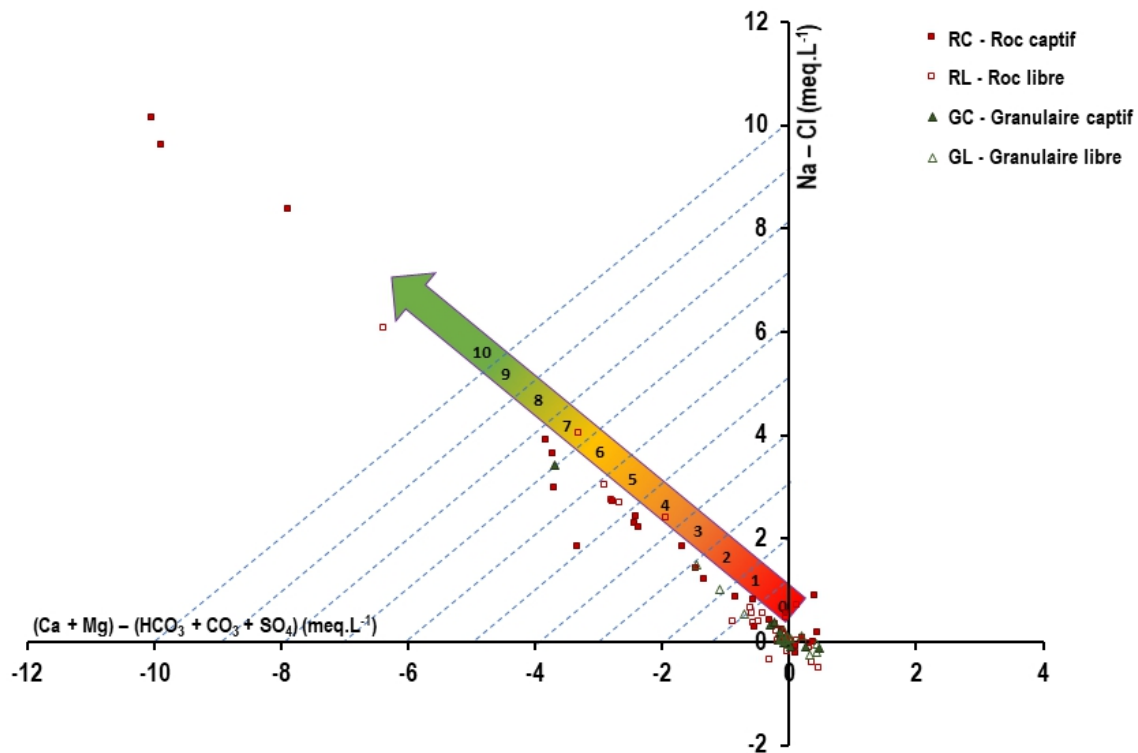


Figure 40 : Faciès chimique des puits du PACES OUT représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

Malgré le regroupement des points autour d'un  $IS_{\text{calcite}}$  de 0, les gammes des teneurs en silice et en alcalinité permettent d'identifier différents stades d'évolution des eaux souterraines, notamment pour les eaux des secteurs libres des aquifères au roc (Figure 41). Dans ce contexte hydrogéologique, la prédominance de l'altération des silicates calciques sans présence significative d'échange cationique avec les argiles marines, tend à regrouper les points à l'origine des axes du DEH, tandis que les teneurs en silice et en alcalinité montrent une progression dans la minéralisation des eaux. Ici encore l'IRC apparaît mieux adapté pour décrire l'évolution géochimique des eaux et la distribution de la résistance des nappes (Figure 42). Dans le cas particulier des aquifères carbonatés, le faciès chimique dominant des nappes est bicarbonaté-calcique, à l'exception de deux points plus évolués en raison des échanges cationiques possibles. L'IRC calculé pour ces nappes carbonatées ne se basant que sur le DEH, il n'a pas la même sensibilité que l'IRC calculé dans les milieux silicatés.

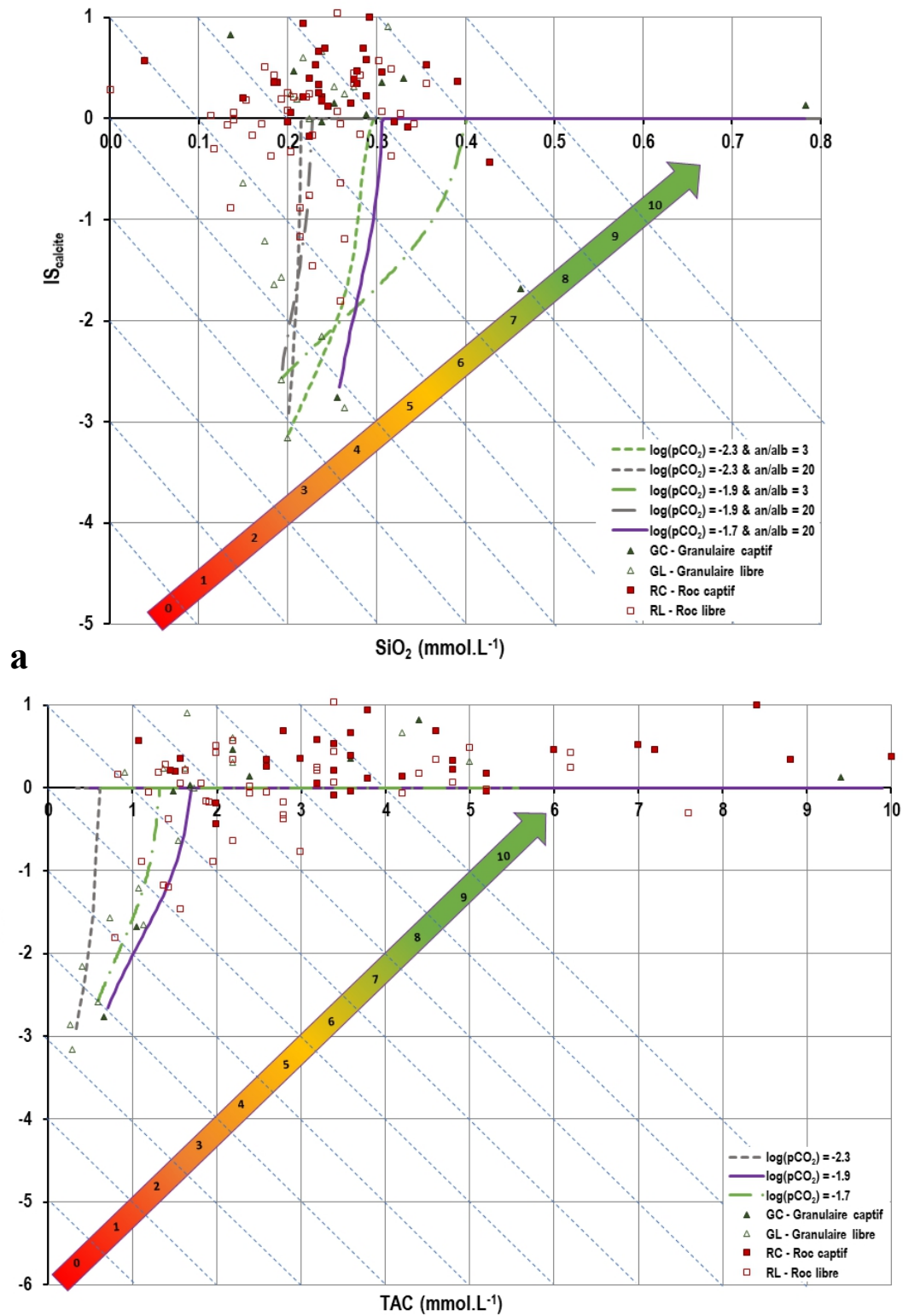


Figure 41 : Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES OUT (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

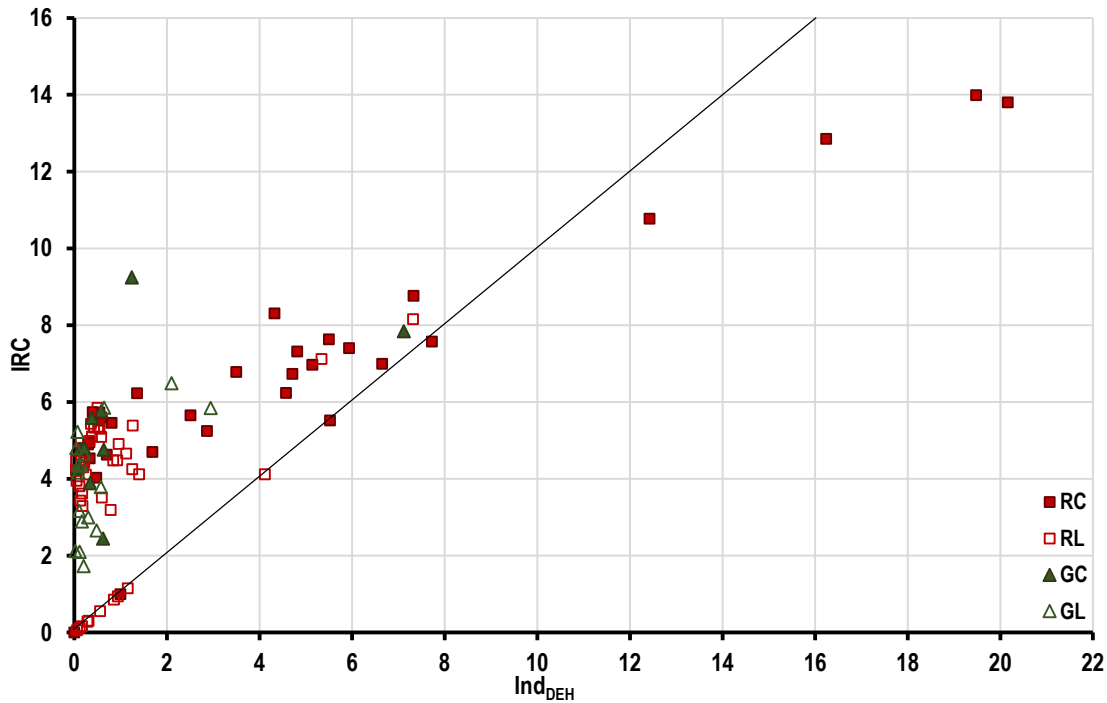


Figure 42 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La répartition spatiale des IRC est cohérente avec le contexte géologique. Les ressources en eaux les moins résistantes (points rouges et oranges) sont situées principalement sur les Hautes-Terres de la Province de Grenville au droit des zones de recharge caractérisées par des indices DRASTIC élevés (Figure 43). Dans le secteur de la plaine des Outaouais, les dépôts argileux offrent une protection des ressources en eaux sous-jacentes et sont caractérisées par des indices DRASTIC faibles. La recharge est majoritairement située en amont des lignes d'écoulement régionales. Les aquifères traversés par ces eaux avant d'atteindre la plaine sont d'extension régionale, ce qui permet aux ressources d'avoir une bonne résistance par leur capacité de dilution d'une pollution présente ponctuellement dans l'espace. Les IRC associés à ces secteurs aval sont élevés (points verts et jaunes). Dans le secteur sud des MRC Papineau et Gatineau, quelques puits des aquifères granulaires ont une faible résistance tandis que les indices DRASTIC indiquent une faible vulnérabilité (Figure 44). Ceci pourrait traduire un échange avec les eaux de surface du réseau hydrographique à proximité. Un grand nombre de puits est suspecté d'être en situation de filtration sur berge au Québec (Patenaude *et al.*, 2020), cette hypothèse paraît donc pertinente. Dans les autres secteurs, l'IRC évolue de manière similaire avec l'indice DRASTIC. Ces deux indices représentant deux volets de la vulnérabilité des ressources, il est intéressant de constater qu'ils sont cohérents tout en étant indépendants quant à leur méthode de calcul.

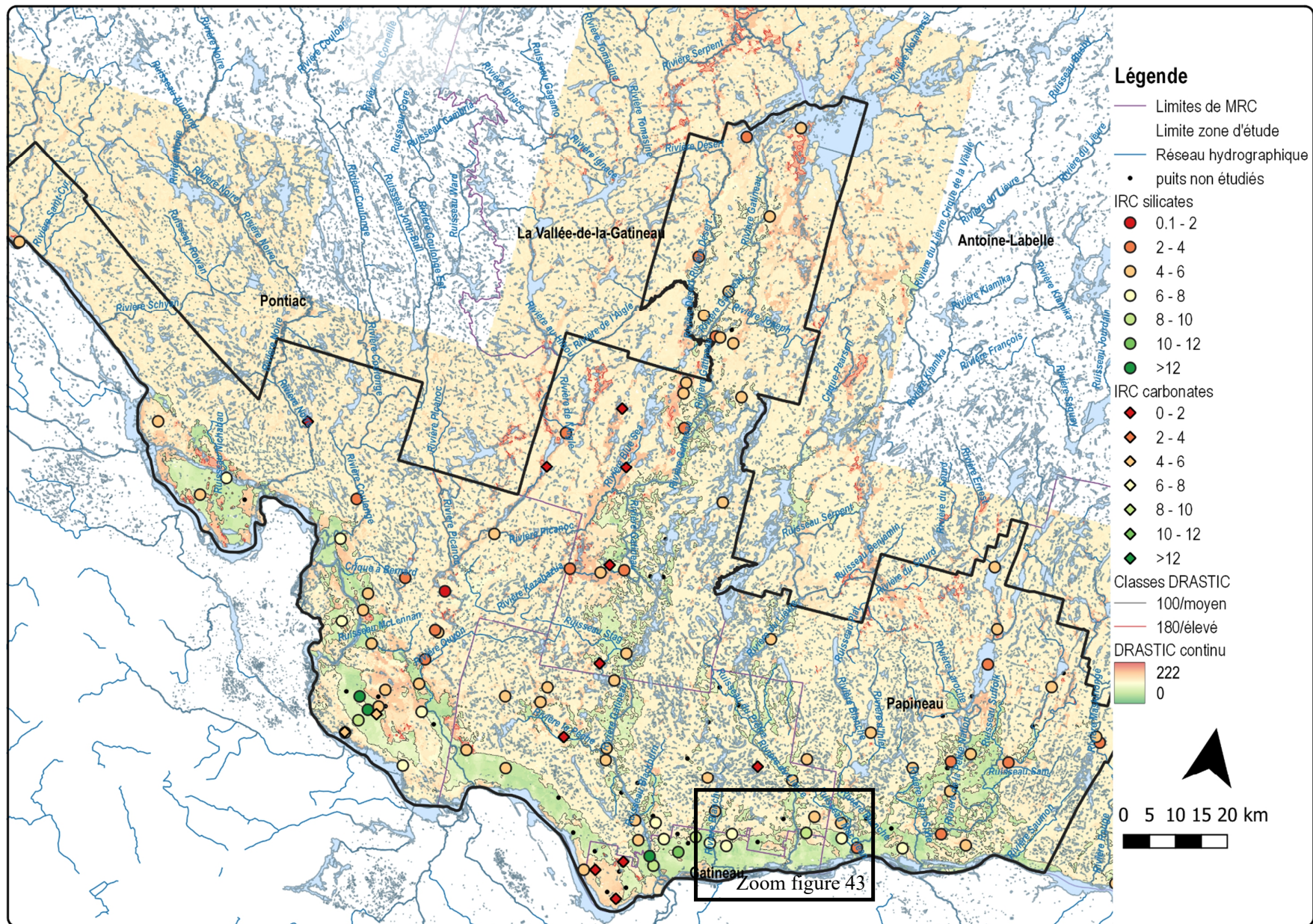


Figure 43 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PAVES OUT

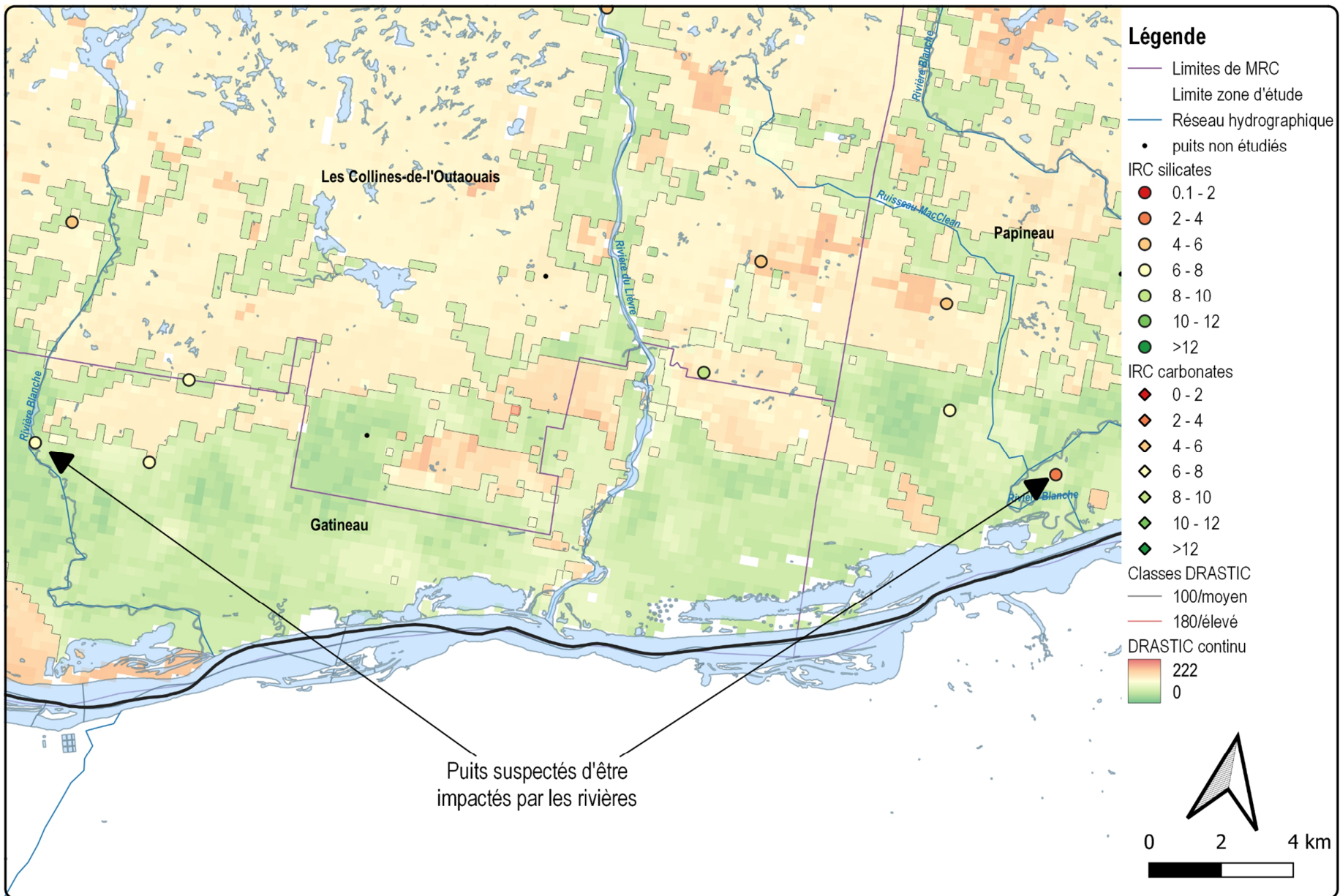


Figure 44 : Connexion entre les puits et les eaux de surface sur le secteur sud des MRC Papineau et Gatineau – PACES OUT

### 3.1.3 Vaudreuil-Soulanges (PACES VS)

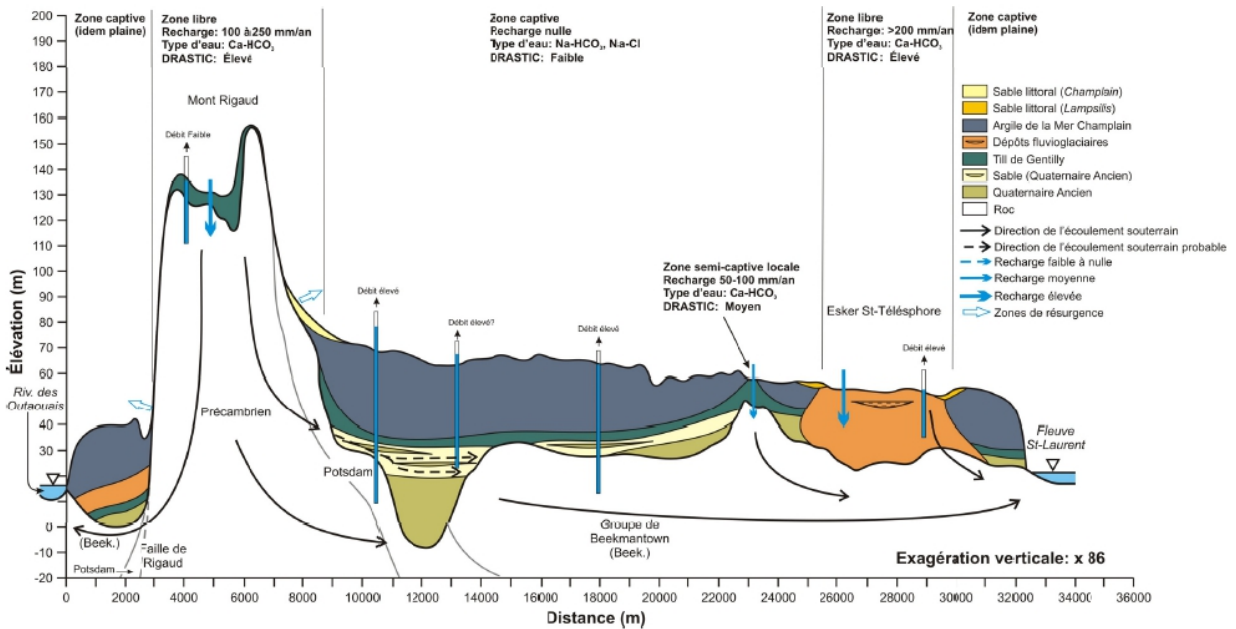
**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 48**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 46**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 40**

La région de Vaudreuil-Soulanges est un secteur de 814 km<sup>2</sup>, situé dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. De ce fait, sa géologie est caractérisée par des couches sédimentaires ordoviciennes, gréseuses ou calcaires qui se sont déposées en discordance du socle silicaté précambrien présent à de fortes profondeurs. Quelques intrusions silicatées plus récentes sont présentes au niveau des rares reliefs existants. Par-dessus les couches sédimentaires se trouvent de nombreux dépôts quaternaires d'épaisseur et de types variés (tills, sables, graviers...) avec une large dominance des argiles de la mer de Champlain. Ces argiles se retrouvent sur l'ensemble de la plaine avec des épaisseurs très variables pouvant atteindre 30 m. Ces argiles sont la principale cause de confinement des aquifères rocheux et granulaires sous-jacents sur une superficie de l'ordre de 64% du territoire. Les parties libres des aquifères se limitent ainsi aux zones de topographie élevées ou aux eskers présents en surface (Figure 45).

Les zones de recharge par infiltration directe des précipitations dans les aquifères au roc se situent donc uniquement sur les Hautes-Terres, mais une recharge indirecte peut avoir lieu au niveau des eskers par des flux souterrains verticaux. Pour les aquifères granulaires présents en surface, la recharge est directe, mais pour les aquifères granulaires captifs, situés entre le roc et les argiles de la mer de Champlain, les sources d'alimentation proviennent soit du socle précambrien amont, soit des aquifères granulaires sus-jacents.



**Figure 45: Coupe N-S synthétique du contexte hydrogéologique du secteur Vaudreuil-Soulanges (Larocque *et al.*, 2015b)**

La majorité des puits échantillonnés sont aménagés dans les aquifères au roc peu profonds, c'est-à-dire dans les intrusions silicatées que l'on retrouve sur les hauteurs (83 %). Cependant, de nombreux puits se retrouvent dans des situations de nappe captive ou semi-captives (74 % et 11 % respectivement, Figure 46). D'un point de vue minéralogique, la moitié des puits sont aménagés dans des aquifères silicatés, un quart dans des aquifères carbonatés et 15 % dans des unités mixtes carbo-silicatées, les 7 % restants étant encore indéterminés à ce stade.

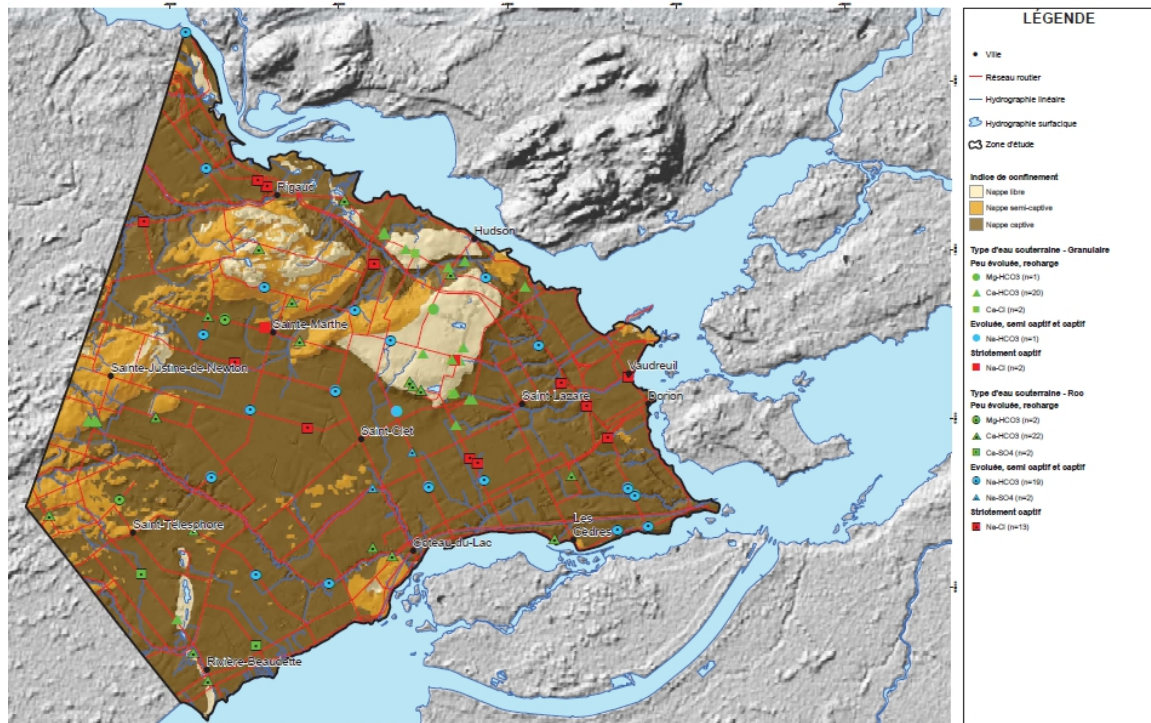


Figure 46: Faciès géochimique des puits échantillonnés en fonction du contexte hydrogéologique (Larocque *et al.*, 2015b)

Les nappes d'eau souterraine du territoire de Vaudreuil-Soulanges sont caractérisées par des faciès chimiques variés (Figure 46 et Figure 47). Pour les cations, il semble que les eaux acquièrent un faciès calcique et magnésien dans les aquifères libres avant d'évoluer vers un faciès sodique dans les aires captives (Figure 47a). Cette évolution concorde avec les processus d'altération des roches présentes (dolomies, calcaires et grès feldspathiques) dominant au début du parcours de l'eau souterraine suivis par les échanges cationiques Ca-Na avec les argiles de la mer de Champlain. En revanche, concernant les anions, aucune tendance ne se démarque : les eaux des nappes libres sont bicarbonatées, tandis que les eaux des nappes captives se répartissent sur l'ensemble du domaine des anions. Cette répartition illustre la grande variabilité à petite échelle des contextes géologiques mais aussi probablement des intrants de surface liés notamment aux pratiques agricoles présentes sur la majeure partie du territoire (engrais, traitements...).

Les eaux souterraines des aquifères granulaires sont toutes sous-saturées vis-à-vis de la calcite ( $IS_{calcite} << 0$ ), justifiant le fait que l'enrichissement en calcium et magnésium n'est pas dû à la dissolution de carbonates, mais plutôt à l'altération des silicates calciques et magnésiens présents (Figure 47b). Les eaux séjournant dans les aquifères au roc sont quant à elles saturées voir sursaturées dès les aires de recharge (roc libre), mettant en évidence la présence des roches carbonatées de la Plate-forme du Saint-Laurent. La dissolution des carbonates impacte donc significativement la chimie des eaux du roc tandis que l'altération des minéraux silicatés domine la chimie des eaux des aquifères granulaires.

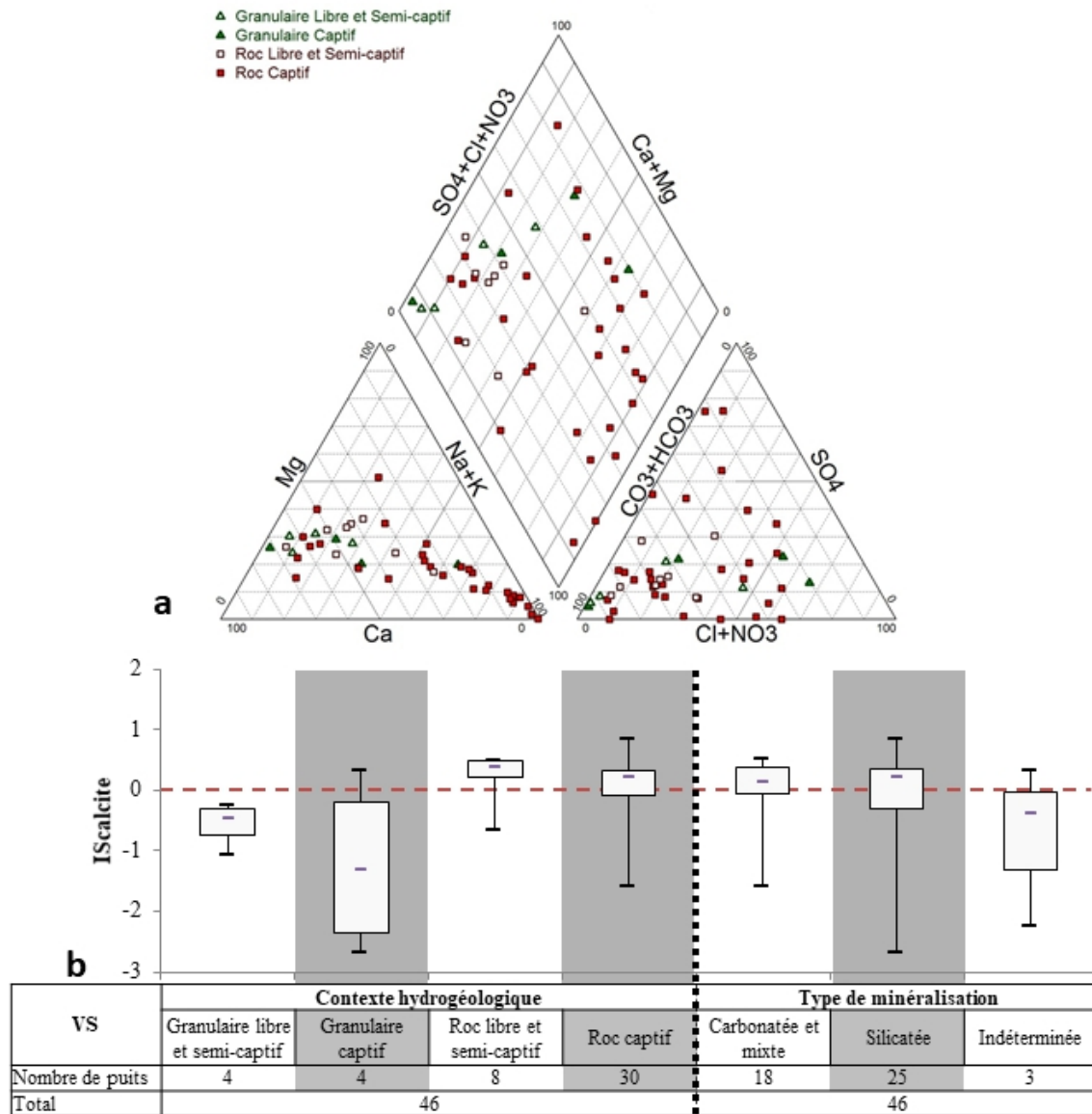


Figure 47: Faciès géochimique des eaux de la région VS représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Dans cette région, la résistance des aquifères granulaires n'a pu être que partiellement estimée car seuls 5 puits ont pu être conservés pour les calculs. Les points représentatifs de ces nappes au faciès bicarbonaté-calcique sont situés au début de l'échelle d'indice DEH (indices entre 0 et 1), comme toutes les eaux dominées par l'altération de minéraux calciques ou magnésiens (Figure 48). Plusieurs puits des aquifères au roc sont aussi situés à l'origine de l'échelle d'indice du DEH. Leur  $IS_{calcite}$  autour de 0 suggère que soit la dissolution des carbonates domine la minéralisation (pour les aquifères carbonatés), soit l'eau souterraine a déjà fait un parcours suffisant pour atteindre l'équilibre vis-à-vis de la calcite avec l'altération des silicates. Pour les milieux silicatés, cette hypothèse est confirmée par les teneurs en silice qui témoignent d'un niveau d'altération des silicates suffisant pour atteindre l'équilibre avec la calcite (Figure 49a). La minéralisation des eaux prélevées dans les aquifères au roc captifs évolue avec les échanges cationiques des argiles de la mer de Champlain recouvrant le roc dans la plaine.



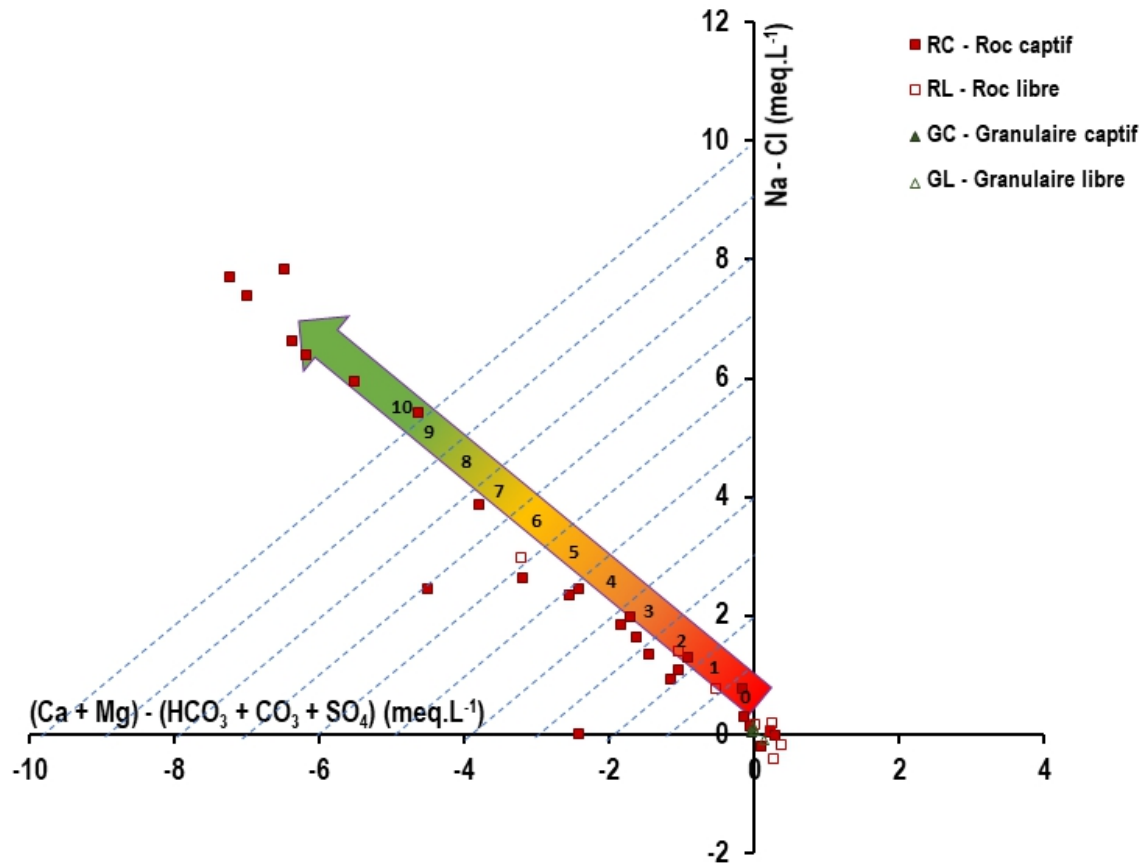


Figure 48: Faciès chimique des puits du PACES VS représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

À l'exception d'un puits situé dans un aquifère granulaire, les points échantillonnés dans les aquifères silicatés sont trop évolués pour caractériser les conditions de recharge et permettre de contraindre de manière satisfaisante la modélisation sous PHREEQC de l'altération des minéraux (Figure 49). Cependant, les nuages de points se trouvant dans des gammes de teneurs en silice, en alcalinité et d' $IS_{calcite}$  similaires à ceux des autres régions situées dans les mêmes contextes géologiques, les calculs d'indice de résistance chimique ont été réalisés suivant la méthode globale (IRC). La représentation de l' $IS_{calcite}$  en fonction de l'alcalinité permet de séparer les eaux des aquifères granulaires, plus récentes, et les eaux des aquifères au roc ayant séjourné en moyenne plus longtemps dans l'aquifère. Cette différenciation se retrouve également avec l'IRC : les aquifères granulaires sont moins résistants que les aquifères au roc (Figure 50). Dans le cas des aquifères carbonatés, seul le DEH sert de base au calcul de la résistance, ce qui explique que les points s'alignent sur la droite 1/1. Les deux méthodes de calcul des indices de résistance s'équivalent pour des indices ( $Ind_{DEH}$ ) compris entre 6 et 8.

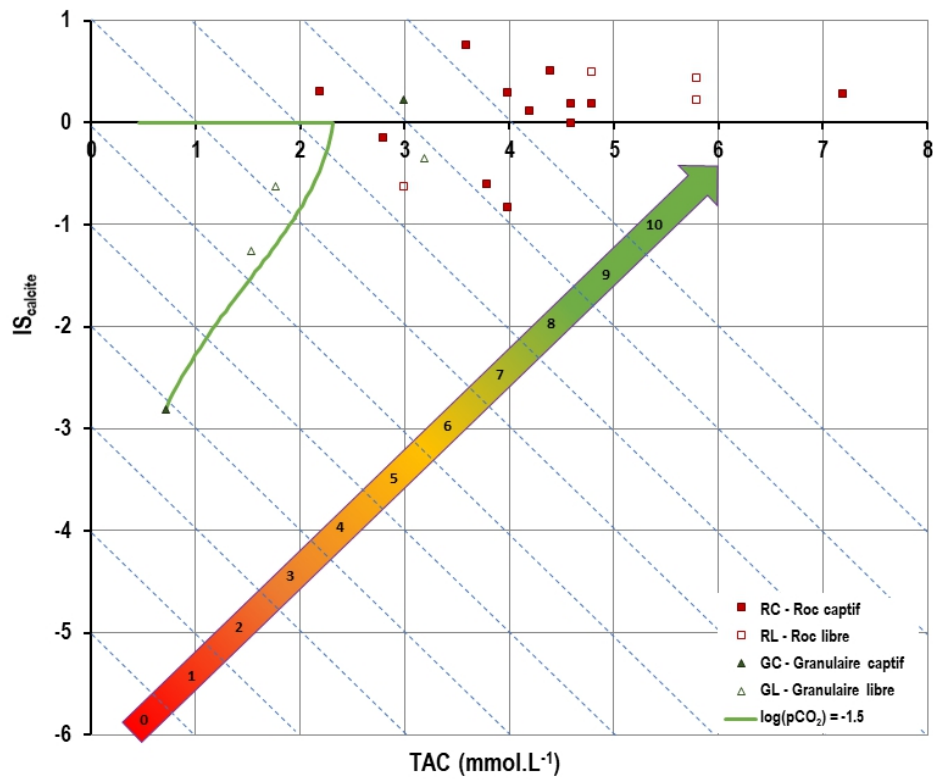
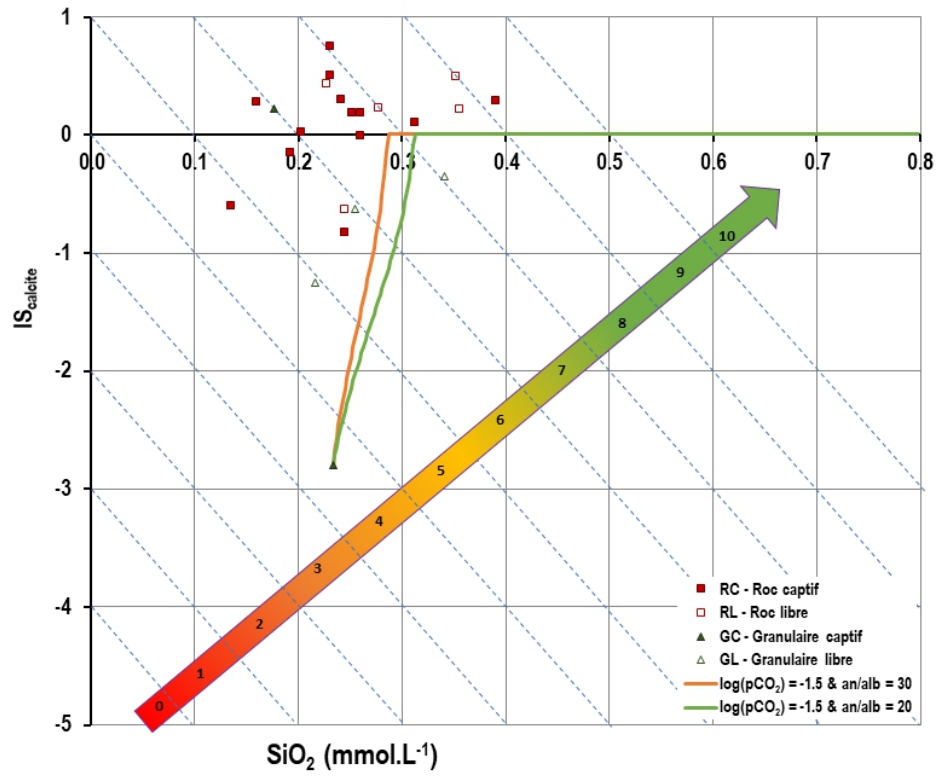


Figure 49: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES VS (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

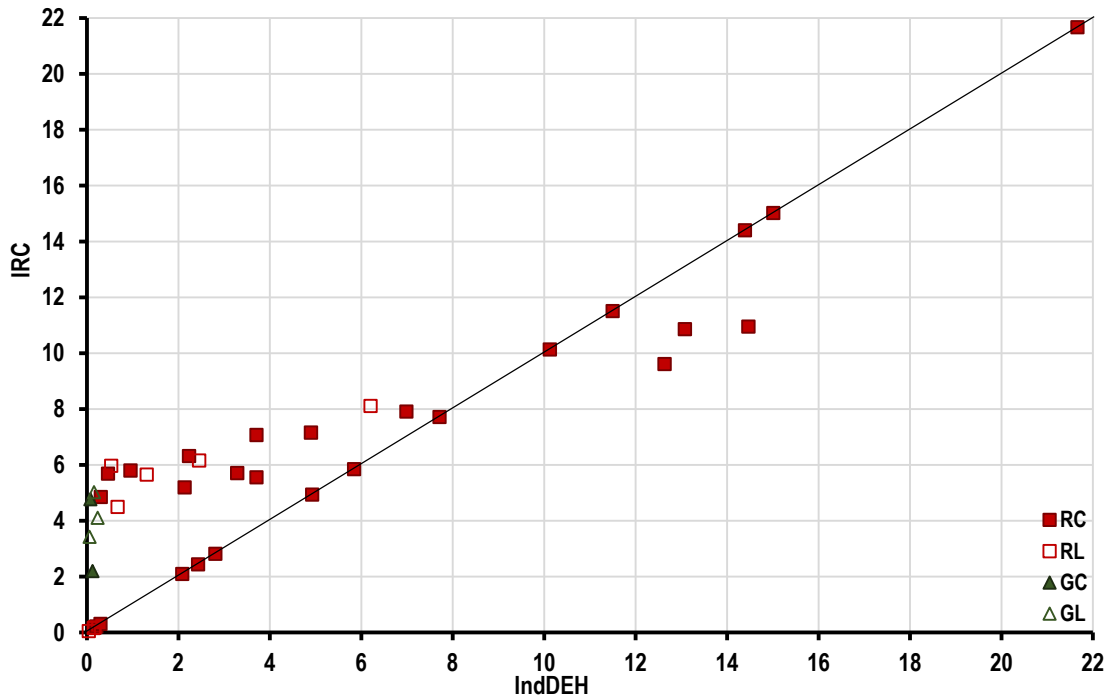


Figure 50: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH} = IRC_{carbonates}$ )

Par comparaison à la carte d'indice DRASTIC, la plupart des IRC montrent une corrélation avec les indices DRASTIC. Deux cas particuliers échappent à cette tendance :

- 1) Certains puits en milieu carbonaté ont des résistances minimales au milieu de la plaine argileuse (losanges rouges, Figure 51). Les faibles résistances obtenues pour ces puits montrent que de la recharge pourrait exister même au milieu de cette plaine. S'agissant d'aquifères au roc, le contexte hydrogéologique laisserait supposer des fortes résistances, mais il faut garder à l'esprit que ces puits utilisés à des fins d'irrigation agricoles pourraient entraîner une recharge locale (par drainance descendante au travers des argiles due au travail de la terre et à l'augmentation artificielle d'apports d'eau dans le sol).
- 2) Certains puits en milieu silicaté situés sur les bords de plaine et en aval hydraulique des aires de recharges caractérisées par des indices DRASTIC élevés possèdent des résistances faibles (points oranges entourés de pointillés noirs, Figure 51). Au droit de ces puits, un décalage significatif est observé entre le DRASTIC et l'IRC. Cependant, la proximité des aires de recharge met en évidence que l'IRC prend en compte cette recharge de proximité dans la résistance de la masse d'eau au droit du puits, apportant un complément pertinent à l'approche DRASTIC. Dans ce cas particulier DRASTIC informe que le puits est peu vulnérable à une pollution qui viendrait de la surface et s'infiltrerait verticalement, tandis que l'IRC met en garde sur le rôle majeur joué par les secteurs situés en amont hydraulique sur les risques de pollution de la masse d'eau prélevée dans le puits.

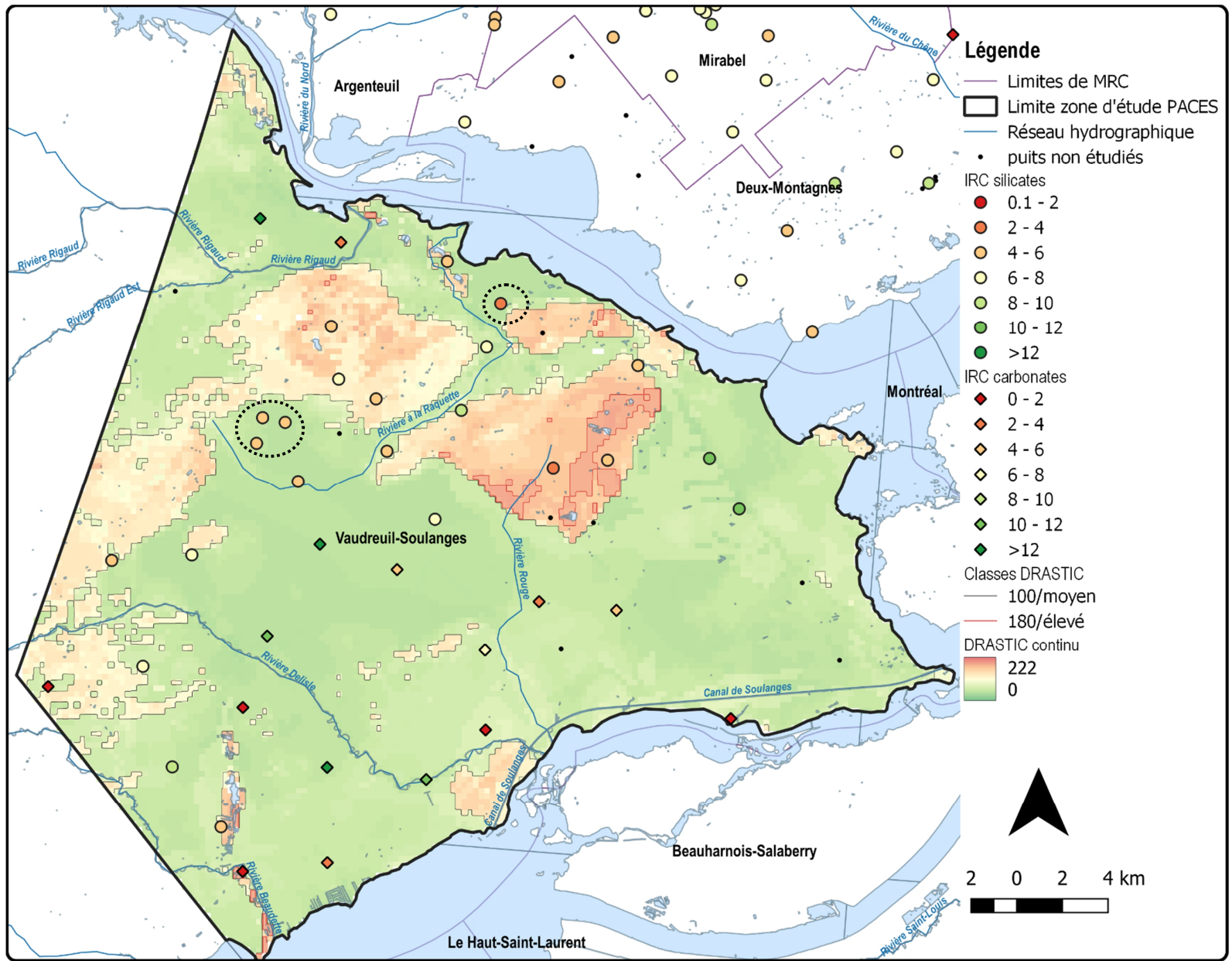


Figure 51: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES VS

### 3.1.4 Basses-Laurentides (PRE-PACES BL)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 146**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 142**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 122**

La région des Basses-Laurentides a été explorée au début des années 2000, et toutes les informations collectées sont issues de la thèse du Prof. V. Cloutier (2004). Cette région couvre une superficie d'environ 1 500 km<sup>2</sup> et appartient à la Province de la Plate-forme du Saint-Laurent. Des roches ordoviciennes majoritairement calcaires se retrouvent en discordance sur le socle précambrien de la Province de Grenville. Ces roches ordoviciennes très fracturées sur les premiers mètres d'épaisseur sont généralement recouvertes par des sédiments meubles plus ou moins perméables datant de la dernière période glaciaire et de l'intrusion marine de la mer de Champlain (Figure 52). Ces dépôts d'épaisseur variable confinent une large partie du socle rocheux sur le territoire. Les zones de recharge principales des aquifères rocheux se situent soit sur les secteurs où le roc affleure, soit où il est en contact direct avec des dépôts meubles perméables affleurant. On retrouve des zones d'échanges entre aquifères rocheux et dépôts meubles sur l'ensemble du territoire étudié.

Sur ce secteur, 78 % des puits échantillonnés prélèvent de l'eau dans le roc, 14 % dans les aquifères granulaires, et 8 % prélèvent dans des unités mixtes (Figure 53). En termes de conditions de confinement, 38 % des puits puisent des nappes libres, 60 % puisent des nappes captives et seulement 2 % des nappes semi-captives. Du point de vue minéralogique, la répartition des puits prélevés illustre la proportion significative de roches carbonatées dans le socle rocheux avec 34 % des puits situés dans des aquifères carbonatés et 14 % dans des unités mixtes carbo-silicatées. 37 % puisent dans les milieux purement silicatés, tandis que 15 % prélèvent dans des milieux indéterminés à ce stade.

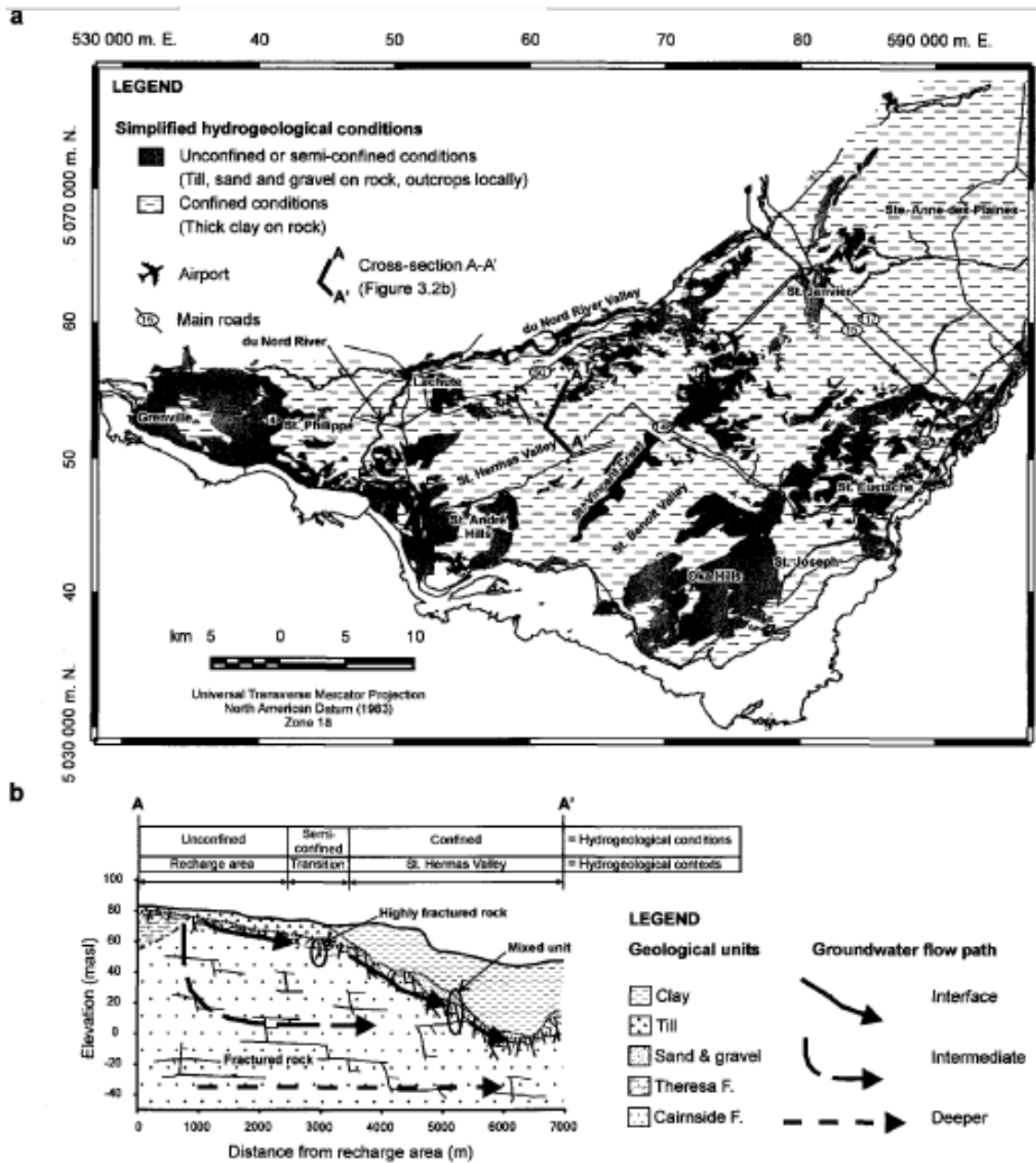


Figure 52 : Contexte hydrogéologique simplifié (a) et coupe transversale illustrant le modèle conceptuel des flux d'eau souterraine dans les unités hydrostratigraphiques principales (b) (Cloutier, 2004)

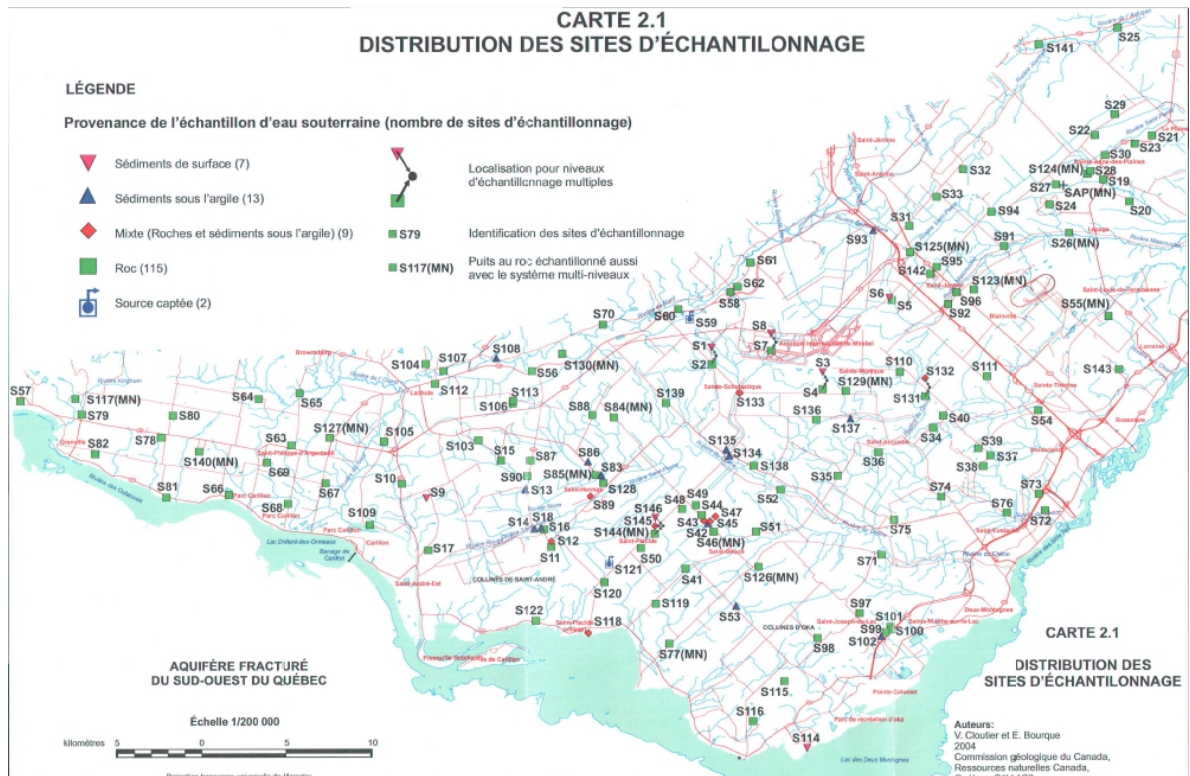


Figure 53 : Répartition des puits échantillonnés dans le cadre du Pré-PACES Basses-Laurentides

Le faciès chimique des eaux des aquifères libres est bicarbonaté-calcique et magnésien, propriété typique des zones dominées par la dissolution de carbonates (dolomite ou calcite magnésienne), tandis que les eaux des aquifères captifs acquièrent un faciès de plus en plus sodique, illustrant certainement un processus d'échange cationique ou de mélange avec des solutions plus salées (formations de la mer de Champlain, Figure 54a). Pour ce site la grande majorité des eaux est à saturation vis-à-vis de la calcite (Figure 54b). Seules quelques eaux issues des aquifères silicatés montrent un  $IS_{calcite}$  suffisamment négatif pour être représentatif des eaux de recharge. Globalement, la dissolution de carbonates domine la minéralisation des eaux souterraines dès la recharge dans les parties libres des aquifères granulaires et au roc, et les échanges cationiques avec les argiles deviennent significatifs le long des lignes d'écoulement dans les zones saturées des aquifères captifs.

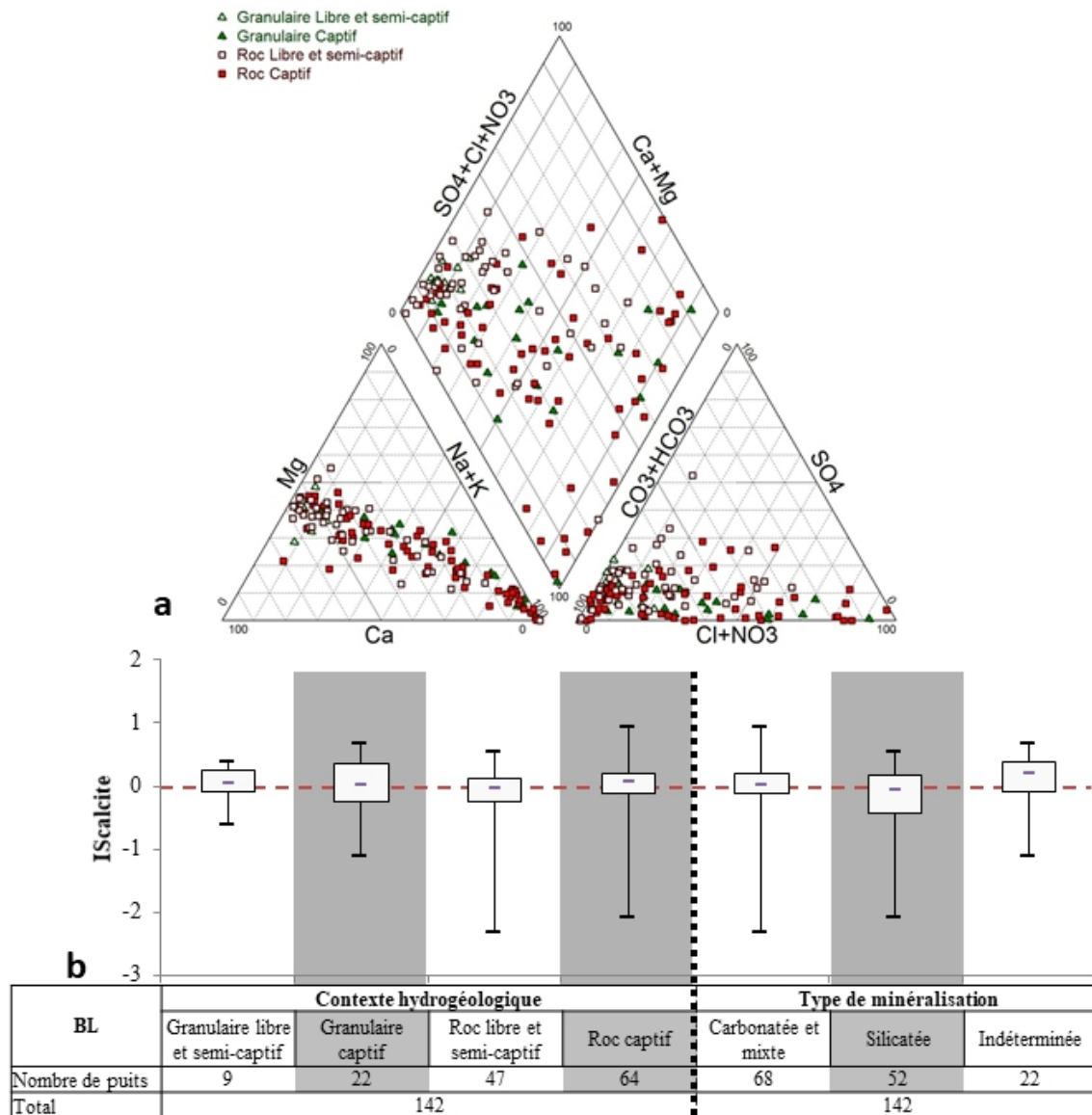


Figure 54: Faciès géochimique des eaux de la région Pré-PACES BL représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

En milieu captif, la chimie des eaux évolue jusqu'à des stades avancés d'interaction eau – roche, ce qui se traduit par des  $ind_{DEH}$  qui peuvent être très élevés (Figure 55). Les eaux ayant un  $ind_{DEH}$  proche de 0 représentent les ressources où la dissolution des carbonates domine. Les teneurs en silice et en alcalinité de ces eaux sont trop importantes pour que la recharge soit dominante, à l'image de la minéralisation totale des eaux (Figure 56). L'absence de points typiques de la recharge n'a pas permis de contraindre correctement les modélisations sur PHREEQC pour caractériser les conditions de recharge encadrant les points des milieux silicatés. Cependant, les gammes de teneurs en silice et en TAC étant similaires à celles trouvées dans les régions proches, il est raisonnable de considérer que la méthode de calcul d'indice développée dans ce projet reste pertinente et adaptée pour cette région.

La comparaison des deux méthodes de calcul d'indice est limitée car la majorité des puits sont situés dans les aquifères carbonatés de la Plate-forme du Saint-Laurent. Une augmentation de la résistance des eaux des milieux silicatés avec la méthode globale est notable, en raison de la composition chimique des eaux qui témoigne d'un temps de séjour moyen significatif (Figure 57). Les eaux des



puits en milieu silicaté ont des IRC compris entre 3 et 14 tandis que pour les eaux des puits en milieu carbonaté ils s'étendent de 0 à 18. Dans cette région aucune distinction n'est marquée entre les contextes hydrogéologiques, les aquifères granulaires ayant des IRC médians compris entre 5 et 8.

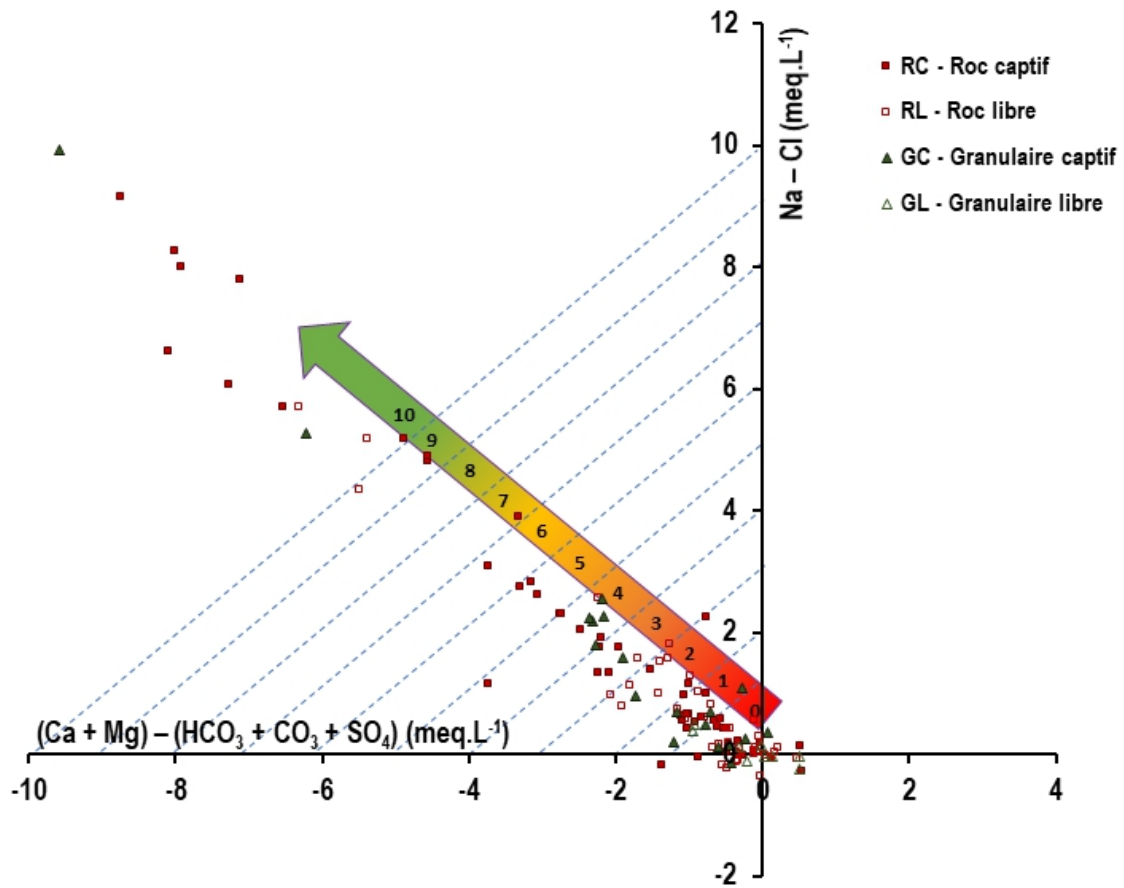


Figure 55: Faciès chimique des puits du Pré-PACES BL représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

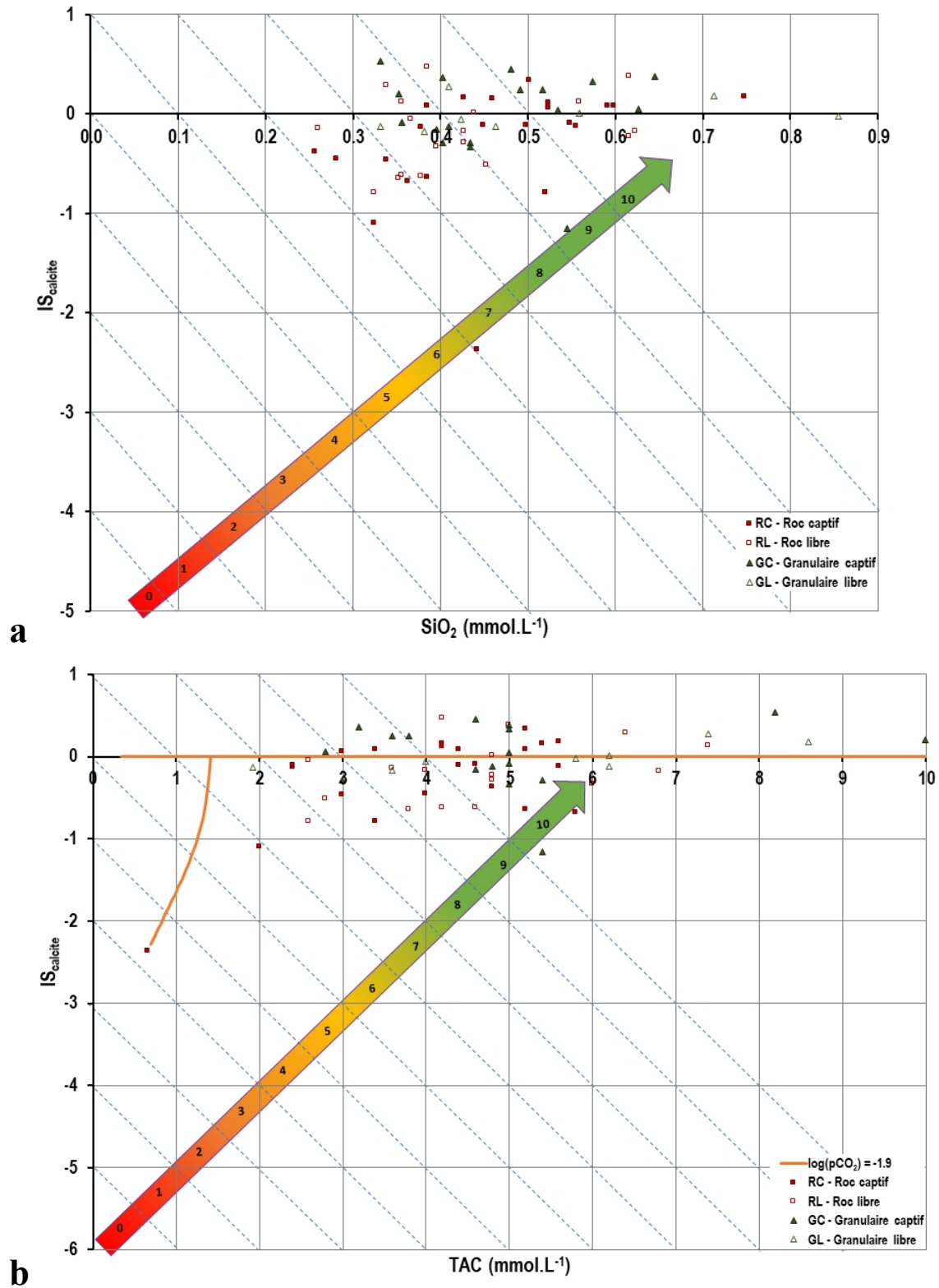


Figure 56: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES BL (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

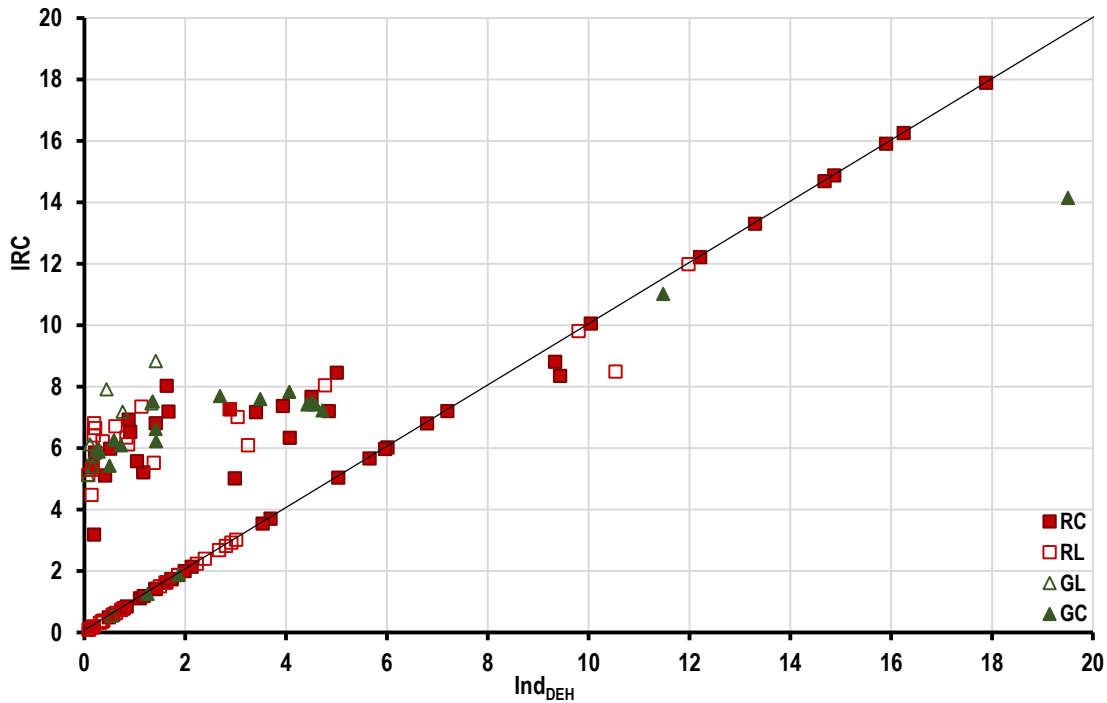


Figure 57: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

Sur le secteur des Basses-Laurentides, la couverture de l'indice DRASTIC disponible n'est que partielle, et ne permet pas de comparer l'ensemble des IRC avec les indices DRASTIC entourant chacun des puits. Cependant, une certaine corrélation est visible entre la position des masses d'eaux les moins résistantes (points rouges) et les secteurs aux fortes vulnérabilités DRASTIC (Figure 58). Elles correspondent aux zones d'affleurement des aquifères au roc sur la partie centre-nord à la limite entre les MRC de Mirabel, et Thérèse-De-Blainville ainsi que sur le côté ouest dans la MRC d'Argenteuil (puits entourés en pointillés noirs, Figure 58). Les ressources des secteurs de nappe libre du sud de la région (MRC Deux-Montagnes et sud de la MRC Mirabel) paraissent quant à elles moyennement résistantes de même que celles des aquifères captifs du centre de la région, laissant ainsi penser que la recharge doit être trop faible pour avoir un impact significatif sur les ressources en eau prélevées à ces puits. Les ressources les plus résistantes (losanges verts) se trouvent à l'extrémité nord-est sur la MRC Thérèse-De-Blainville, où les puits atteignent tous le roc carbonaté captif. Pourtant des niveaux de résistance plus faibles sont observés à proximité pour le même aquifère. Les puits ne puisant pas tous à la même profondeur, il est possible que les indices les plus faibles correspondent à des lignes d'eau plus superficielles ou bien que la recharge liée aux interactions avec les eaux de surface soit plus importante sur certains puits.

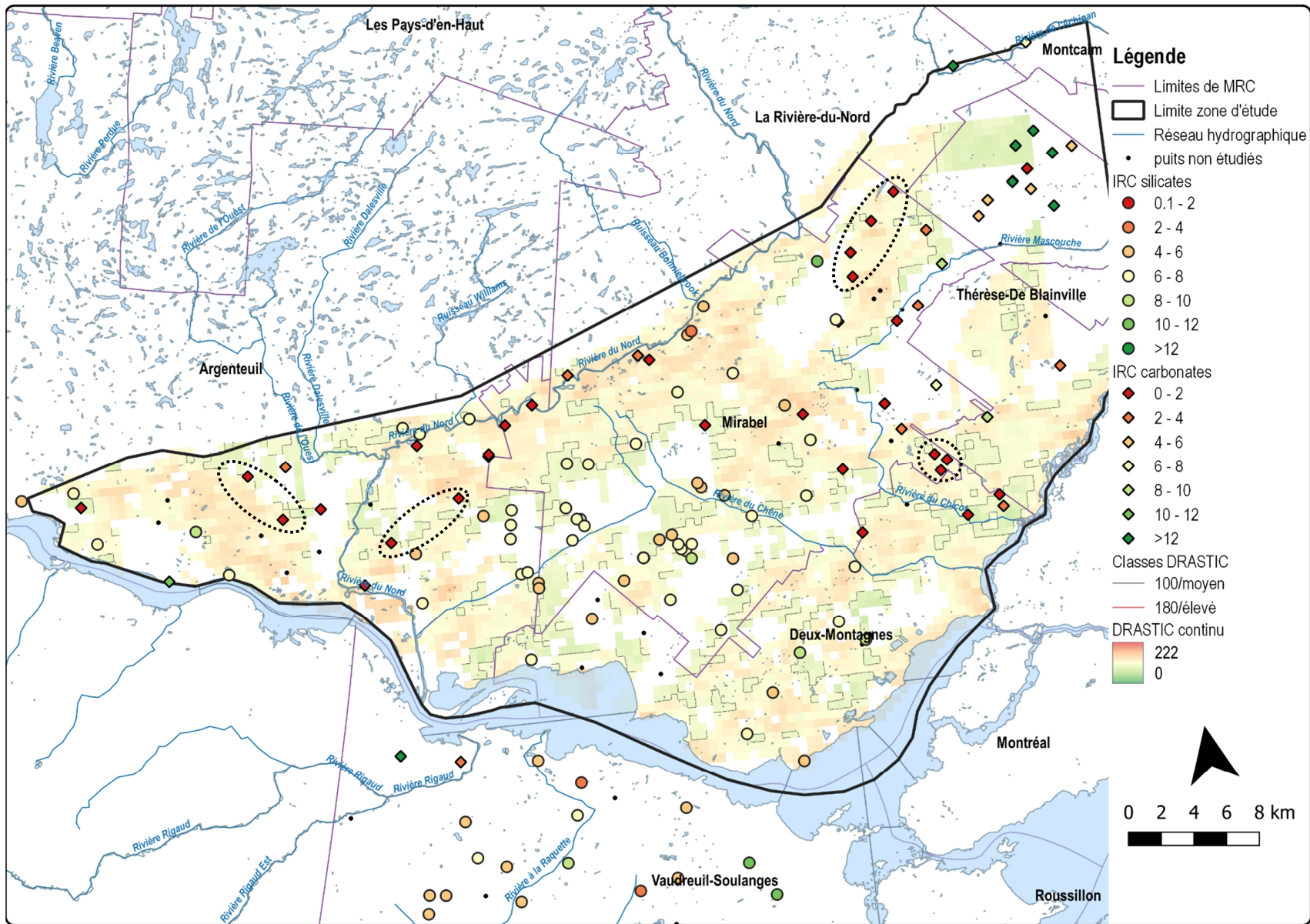


Figure 58: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) de la région Pré-PACES BL

### 3.1.5 Mauricie (PACES MAU)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 243

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 153

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 128

La région du PACES de la Mauricie couvre une superficie de 3 915 km<sup>2</sup> au nord du Fleuve Saint-Laurent. Les Provinces de Grenville au nord et de la Plate-forme du Saint-Laurent au sud constituent le socle rocheux de la région. La Province de Grenville est constituée en majorité de roches métamorphiques (gneiss, orthogneiss...) et de quelques roches ignées (Figure 59a). La Plate-forme du Saint-Laurent comporte des niveaux de roches calcaires ordoviciennes localement surmontées par des lits de shales. Une faille régionale (faille de Saint-Cuthbert) sépare le socle Grenvillien de la Plate-forme du Saint-Laurent. En recouvrement de ce socle, se trouve la série de dépôts meubles quaternaires (sédiments glaciaires, fluvio-glaciaires, marins et alluviaux) dont chaque unité s'étend de manière discontinue sur certaines portions du territoire (tills sur les Hautes-Terres, sédiments fluvio-glaciaires dans les vallées, argiles marines dans les Basses-Terres). Les ressources en eau souterraines de la partie nord des Hautes-Terres sont généralement en condition de nappe libre, avec les aquifères au roc affleurant très localement. En revanche dans la partie des Basses-Terres, le roc est captif et les nappes libres se situent uniquement dans les dépôts quaternaires superficiels (Figure 59b). Des flux de nappe des aquifères granulaires vers les aquifères au roc sont observés dans tous les secteurs où ces couches géologiques sont en contact, constituant ainsi un moyen de recharge des masses d'eaux profondes. Les aquifères au roc grenvillien alimentent aussi en partie les aquifères des Basses-Terres.

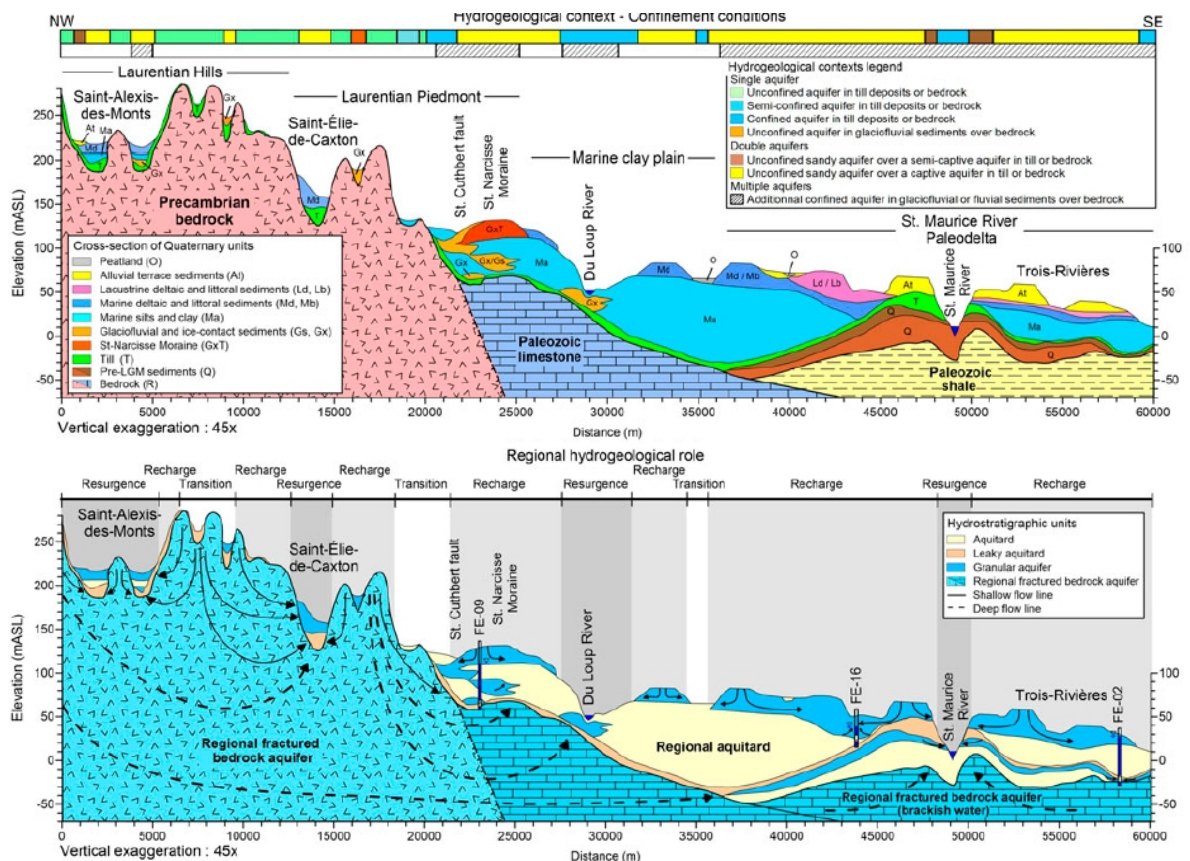


Figure 59: Coupe de synthèse du contexte hydrogéologique du PACES de la Mauricie (a) et des écoulements souterrains (b) (Légaré-Couture *et al.*, 2017)

La particularité de ce territoire est que les aquifères les plus sollicités (79% des puits) sont les aquifères granulaires contre 21 % pour les aquifères au roc (Figure 60). Les nappes libres sont plus nombreuses : 81 % des puits sont en condition libres et 19 % en condition captive. Les aquifères carbonatés sont très peu présents sur ce PACES (5 % des puits), au profit du contexte silicaté largement dominant (92 % des aquifères sollicités), les 3 % restants étant classés comme indéterminés.

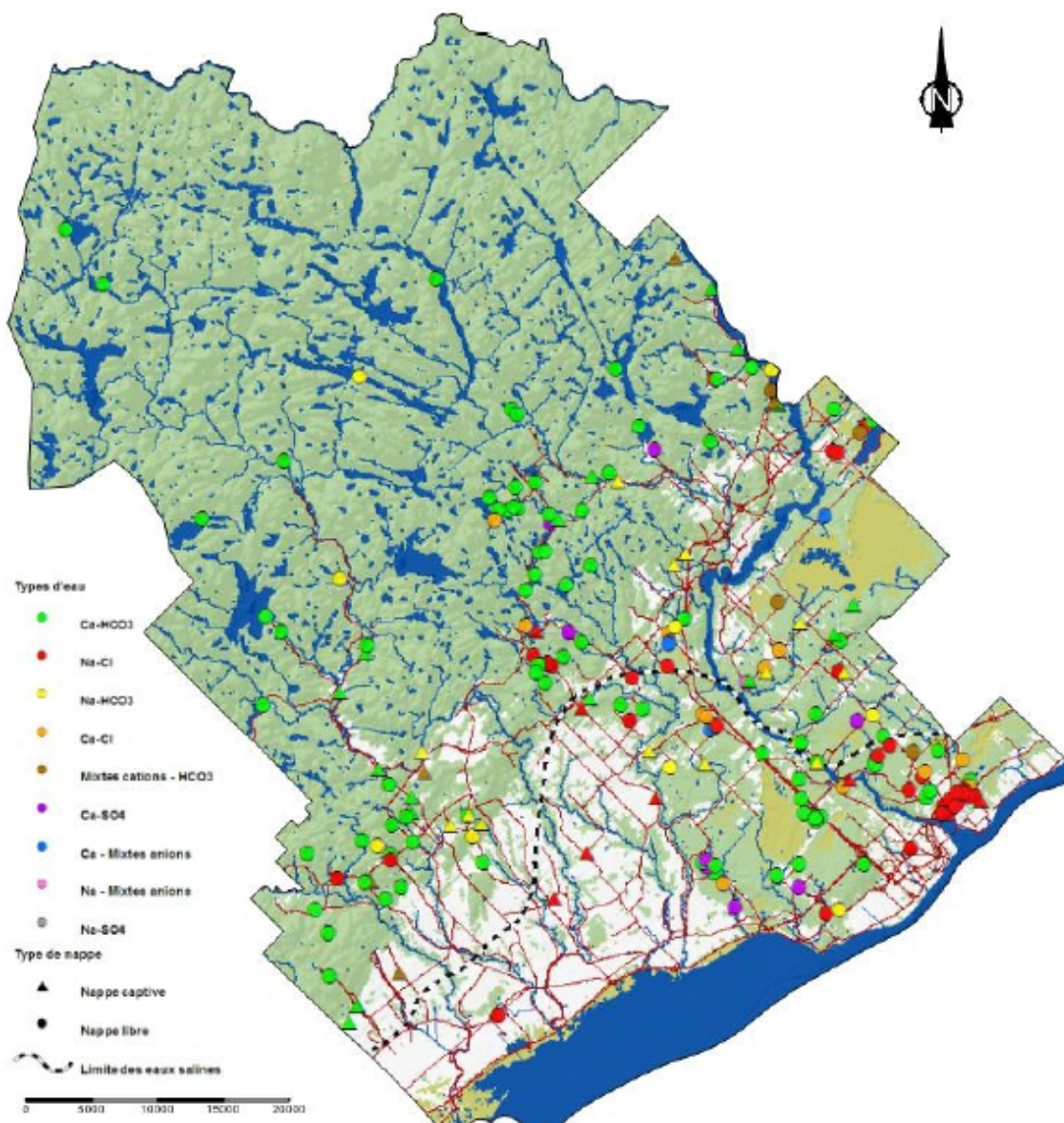


Figure 60: Faciès géochimiques des eaux de nappes en fonction du type de confinement rencontré (Leblanc *et al.*, 2013)

Le faciès chimique des eaux souterraines dans les aquifères au roc évolue selon la séquence bicarbonatée-calcique → bicarbonatée-sodique → chlorurée-sodique depuis les zones libres des aires de recharge jusqu'aux secteurs captifs profonds (Figure 61a). Cette séquence correspond à la succession des processus décrits dans le chapitre précédent : l'altération des minéraux calciques, puis l'altération des minéraux sodiques et échange cationique avec les argiles et/ou mélange avec les eaux saumâtres issues de la dernière transgression marine (Figure 20). Les faibles valeurs d' $IS_{calcite}$  observées pour ces puits au roc peuvent représenter soit un contexte géologique local particulier

présentant trop peu de minéraux calciques pour que les eaux régionales atteignent l'équilibre, soit des temps de séjours moyens trop faibles pour que l'équilibre puisse être atteint. En effet, les seuls points dans le roc présentant un  $IS_{\text{calcite}}$  positif ou nul sont ceux des aquifères carbonatés (Figure 61b). Dans le cas des aquifères granulaires, les  $IS_{\text{calcite}}$  sont encore plus faibles. Ici, l'hypothèse des temps de séjours très courts est privilégiée car les aquifères granulaires sont de faible extension et contiennent généralement des eaux jeunes. Le faciès chimique des eaux de ces aquifères s'étend du pôle bicarbonaté-calcique au pôle chloruré-sodique en passant par un stade intermédiaire chloruré-nitraté-calcique. Ces faciès étant associés à des minéralisations très faibles (TDS moyen sur les eaux dans aquifères granulaires de  $115 \text{ mg.L}^{-1}$ ), ils rendent compte d'une recharge importante et sous l'influence des activités anthropiques (agriculture, réseau routier).

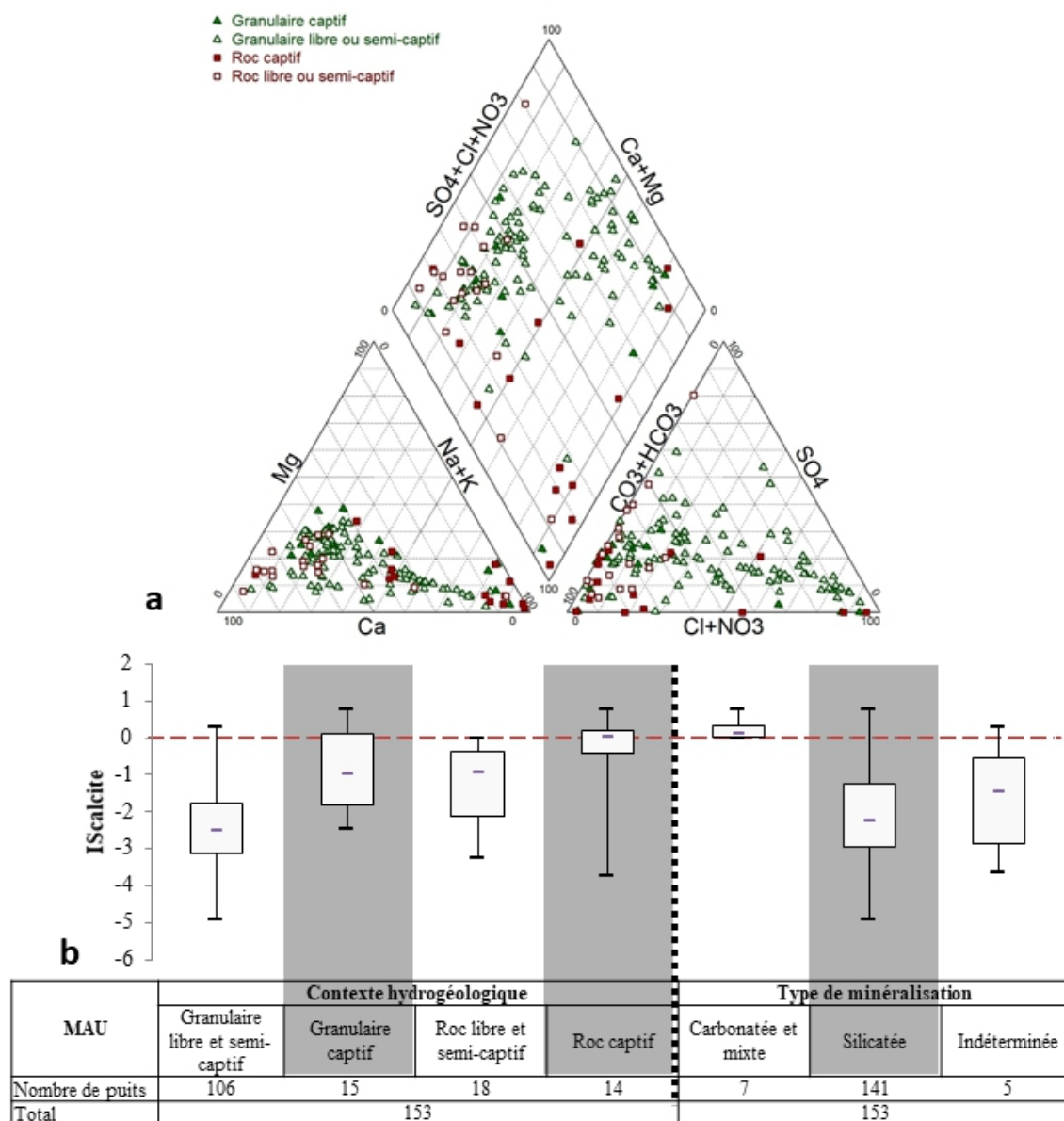


Figure 61 : Faciès géochimique des eaux de la région MAU représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{\text{calcite}}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

La faible résistance des ressources en eau du secteur se confirme avec les représentations du DEH et de l'IS<sub>calcite</sub> en fonction des teneurs en silice dissoute et en alcalinité (Figure 62 et Figure 63). Les courts temps de séjours moyen des eaux sont identifiables par la concentration des points à l'origine des axes du DEH et par la répartition des nuages de points sur des gammes d'IS<sub>calcite</sub> et d'alcalinité très faibles. Bien que l'interprétation de l'évolution de l'IS<sub>calcite</sub> permette d'affiner l'échelle d'indice de résistance (IRC), ce dernier reste inférieur à 4 pour plus de 80 % des points (Figure 64). Les ressources en eau utilisées dans cette région sont donc très peu résistantes, ce qui est cohérent avec le caractère très local et superficiel de la plupart des aquifères concernés.

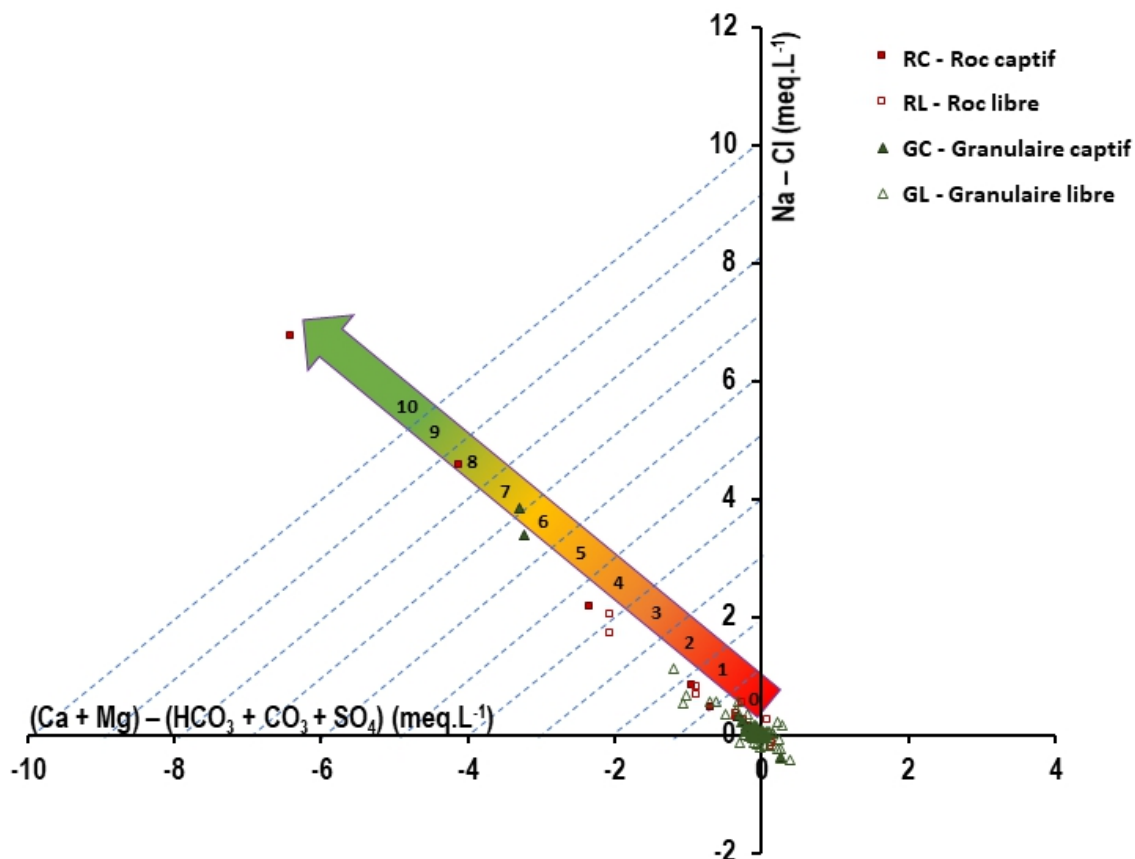


Figure 62 : Faciès chimique des puits du PACES MAU représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée



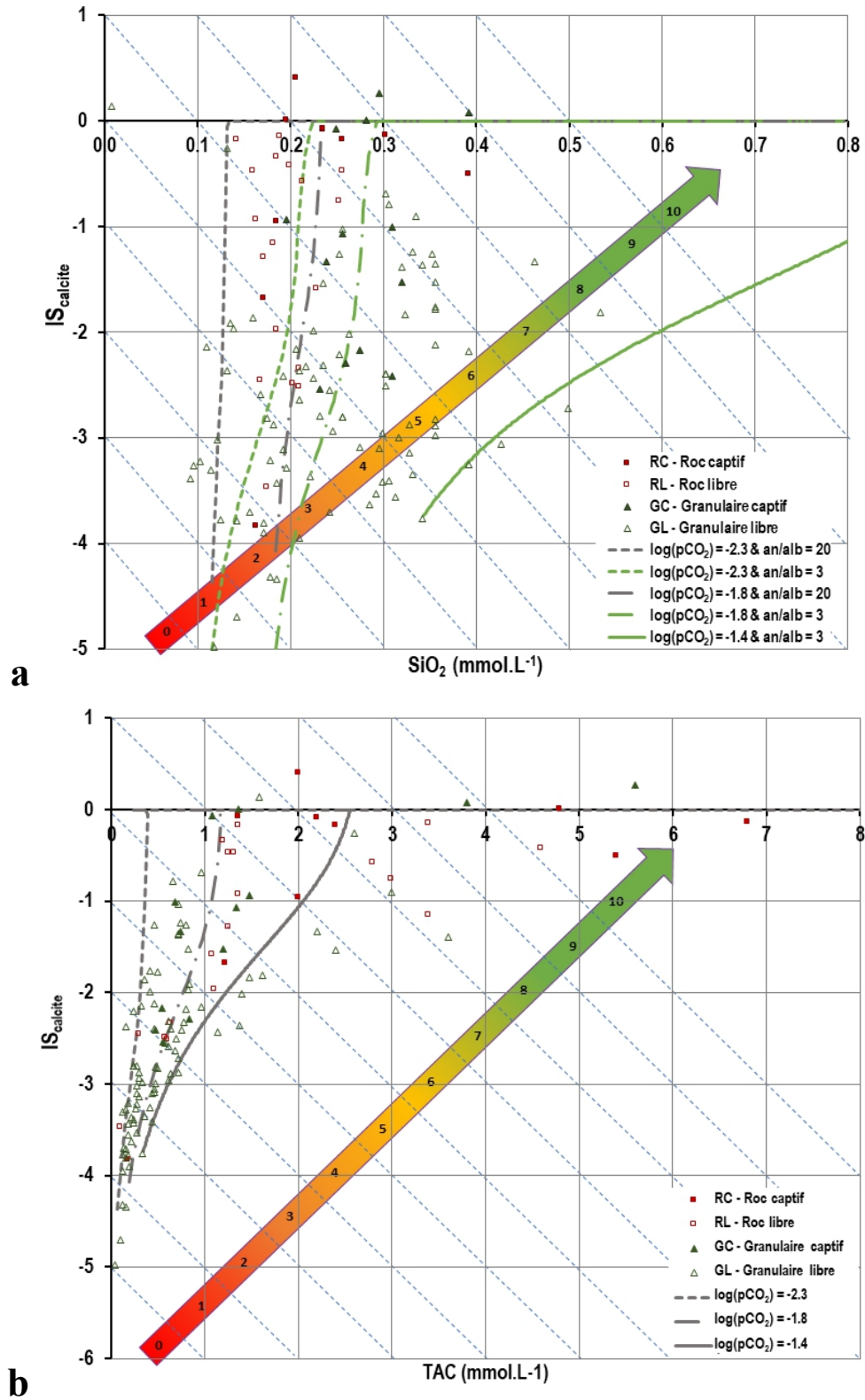


Figure 63 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES MAU (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

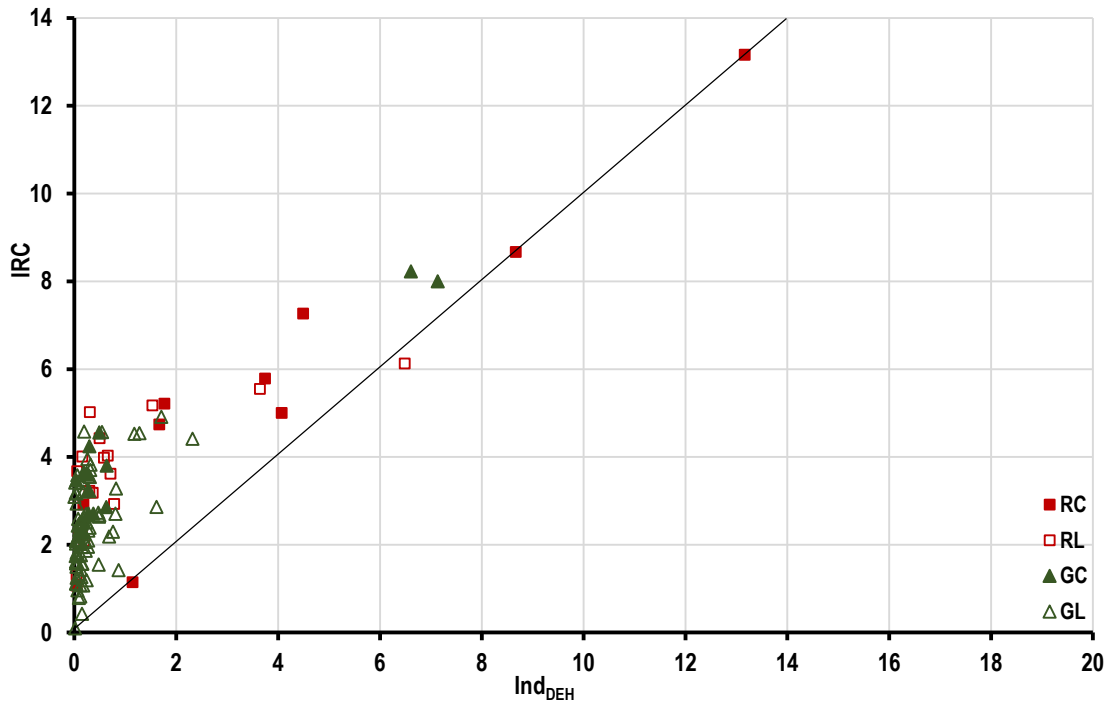


Figure 64 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

Des teneurs significatives en nitrates sont observées dans la plupart des masses d'eaux caractérisées par des IRC inférieurs à 5 (Figure 65). Le recoupement des IRC obtenus dans cette région et les teneurs en nitrates observées pour ces puits rend compte de l'impact réel des activités anthropiques sur les ressources exploitées. Les faibles valeurs d'IRC démontrent des capacités minimales des ressources à endiguer les pollutions et cela transparaît dans la répartition des teneurs en nitrates.

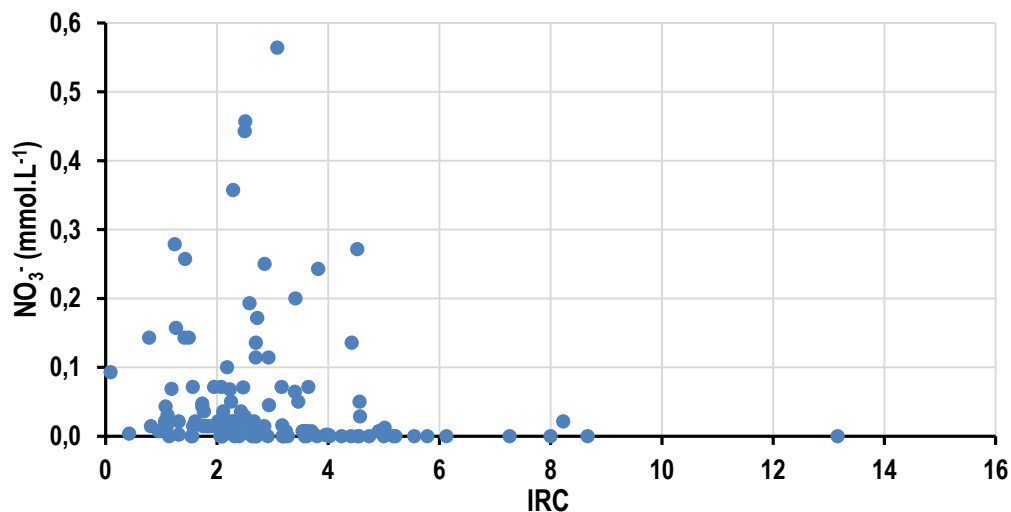


Figure 65: Évolution des teneurs en nitrates en fonction des indices de résistance chimique (IRC) calculés pour les masses d'eau de la région PACES de la Mauricie

Sur le PACES de la Mauricie, deux cartes DRASTIC ont été réalisées : une pour les nappes libres, et une autre pour les nappes captives. Les résultats obtenus dans la présente étude ont donc été triés selon

ce critère hydrogéologique afin de comparer les IRC avec les indices DRASTIC correspondants (Figure 66 et Figure 67).

Pour les nappes libres, les IRC montrent une bonne cohérence spatiale avec les indices DRASTIC sur l'ensemble des secteurs caractérisés par les deux approches (Figure 67). Les puits échantillonnés présentent tous de faibles résistances (points rouges et orange) et se répartissent en majorité sur les secteurs jugés vulnérables par DRASTIC, telles que les aires de recharge dans les Basses-Terres, ou les aquifères présentant des niveaux de nappe proches de la surface dans les fonds de vallée des Hautes-Terres.

Pour les nappes captives, les IRC sont très variables allant de faiblement résistant dans les fonds de vallée des rivières du territoire (rivière du Loup, rivière Shawinigan) à très résistant au milieu de la plaine argileuse des Basses-Terres (Figure 67). Les indices DRASTIC présentent majoritairement une faible vulnérabilité des masses d'eau à l'exception des secteurs situés en bordure de plaine le long de la limite entre les deux provinces géologiques. La faible résistance des masses d'eau captives des fonds de vallées qui semblent protégées des apports verticaux peut illustrer une contribution significative des rivières à proximité.

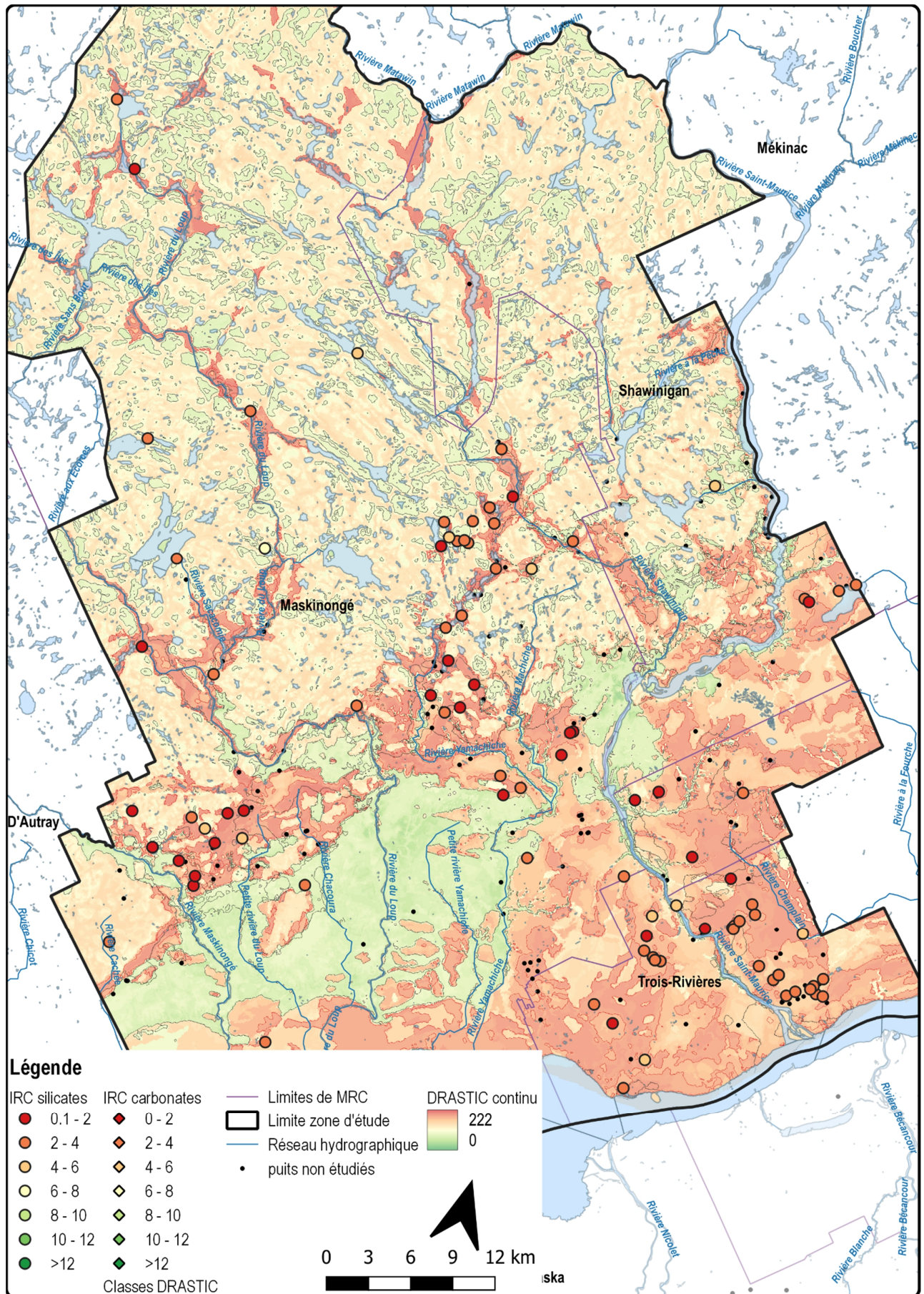


Figure 66: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC des nappes libres – PACES MAU

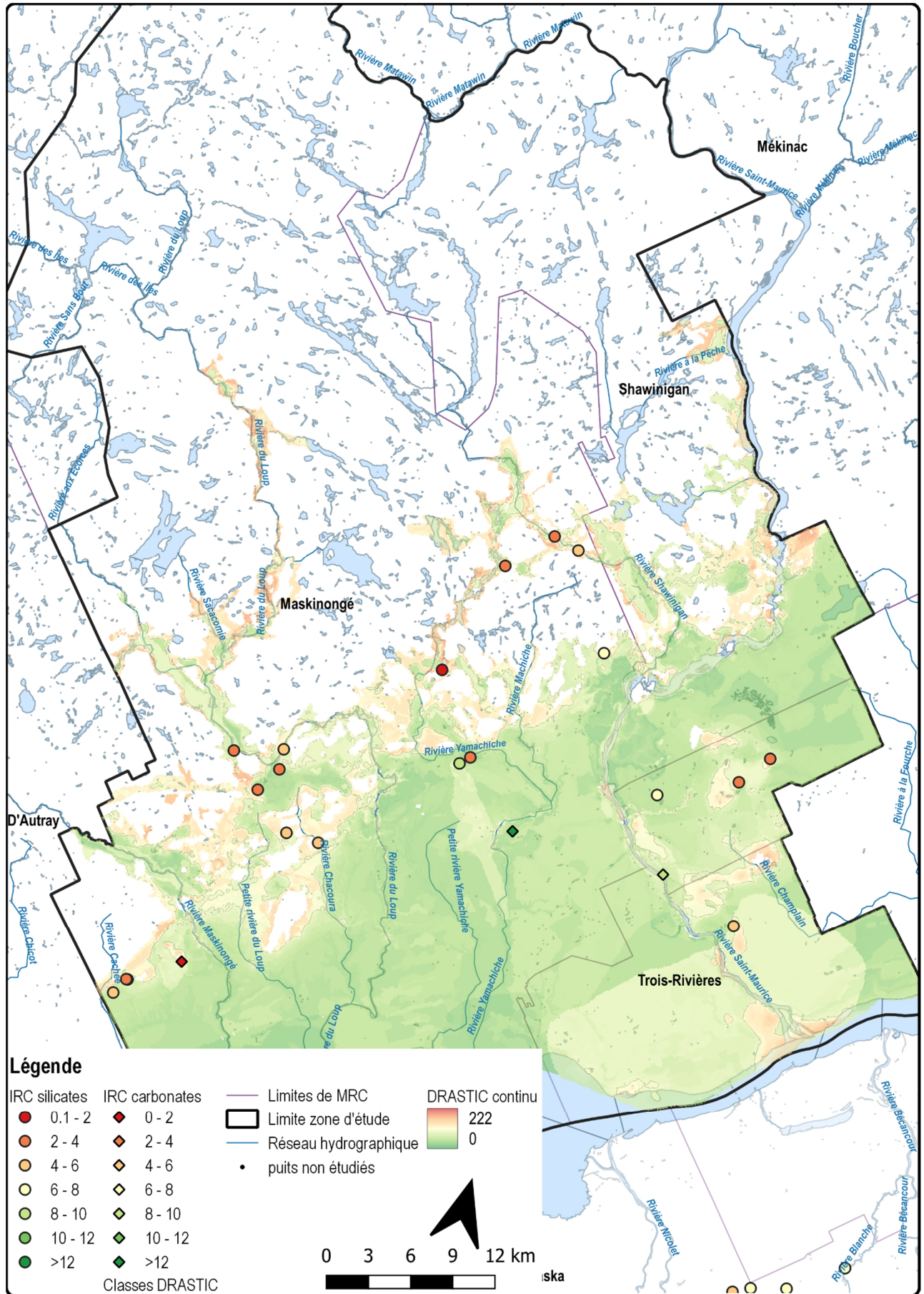


Figure 67 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC des nappes captives – PACES MAU

### 3.1.6 Portneuf (PRE-PACES PO)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 100

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 94

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 79

L'étude hydrogéologique du Piémont Laurentien sur la MRC de Portneuf date de la fin des années 1990. Les seules informations recueillies à ce stade proviennent de 3 publications de congrès réalisées entre 1998 et 2000. Le secteur d'étude est situé sur la rive nord du Saint-Laurent en limite du territoire couvert par le projet PACES de la Communauté Métropolitaine de Québec. Ce territoire est caractérisé par de grandes plaines deltaïques quaternaires déposées en discordance sur le socle rocheux de la Province Grenvillienne au nord du territoire et de la Province de la Plate-forme du Saint-Laurent (calcaires et shales) au sud (Figure 68). Grâce aux grandes capacités aquifères des dépôts deltaïques, les aquifères rocheux sont moins sollicités sur ce secteur, et par conséquent moins étudiés aussi. Dans la continuité des contextes des PACES de la Mauricie et de la Communauté Métropolitaine de Québec, on peut émettre l'hypothèse que les aquifères au roc silicatés et carbonatés soient probablement en connexion. Le socle grenvillien se retrouve à l'affleurement au nord du secteur, et reçoit ainsi une recharge directe par l'infiltration des précipitations dans le réseau de fractures. Le socle des Basses-Terres en revanche est complètement captif et alimenté soit par les écoulements souterrains du socle grenvillien, soit par les écoulements verticaux des aquifères granulaires sus-jacents. Il est important de noter que parmi les dépôts quaternaires se retrouvent les argiles de la mer de Champlain dont l'épaisseur peut être très importante localement.

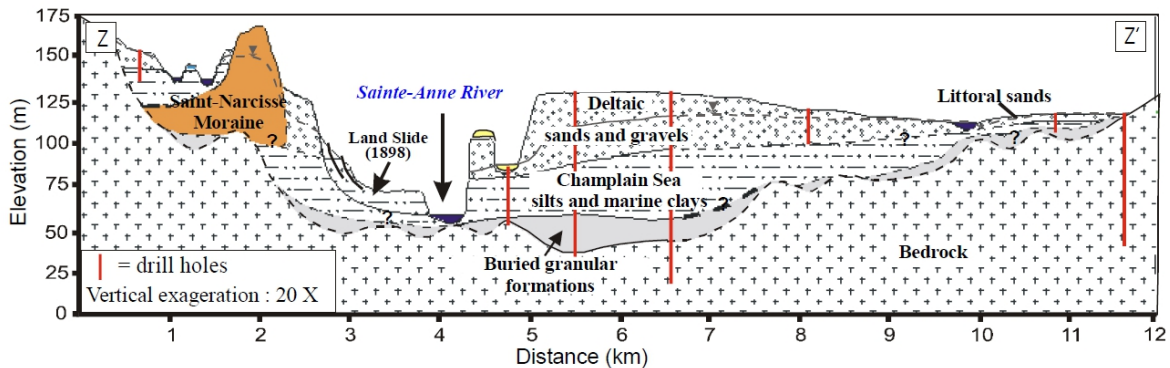


Figure 68: Coupe synthétique du contexte géologique du bassin versant de la rivière Sainte Anne traversant la MRC de Portneuf (Larose-Charette *et al.*, 2000)

Sur ce territoire, 2/3 des puits échantillonnés exploitent les aquifères granulaires, et 1/3 les aquifères au roc (Figure 69). Les aquifères granulaires exploités étant principalement libres et le roc affleurant dans de nombreux secteurs au nord, 80 % des puits prélèvent des nappes en condition libres, et 20 % seulement sont en condition de nappe captive. D'un point de vue minéralogie, 73 % des puits sont situés dans des aquifères silicatés, 13 % dans des aquifères carbonatés et 9 % dans des aquifères mixtes. Les 5 % restants sont classés comme indéterminés à ce stade.

La particularité de ce secteur est de contenir de grands aquifères granulaires issus de dépôts deltaïques. Contrairement aux autres régions où il est souvent difficile de distinguer la chimie des eaux souterraines des aquifères granulaires par rapport à celles du roc, le secteur de Portneuf le permet très bien. Les eaux des aquifères granulaires sont très enrichies en nitrates et en sulfates et sont caractérisées par un faciès sulfaté-nitraté-calcique avant de tendre vers un faciès bicarbonaté-calcique, tandis que les eaux des aquifères au roc évoluent entre un faciès bicarbonaté-calcique et un faciès bicarbonaté-sodique (Figure 69a). La forte sous-saturation vis-à-vis de la calcite des eaux des

aquifères granulaires et silicatés indique que dans ce secteur la dissolution des carbonates n'intervient pas, sauf dans le contexte bien particulier des aquifères carbonatés de la Plate-forme du Saint-Laurent. Dans les autres contextes, altération des minéraux silicatés et échanges cationiques sont les deux processus dominant l'évolution naturelle de la chimie des eaux.

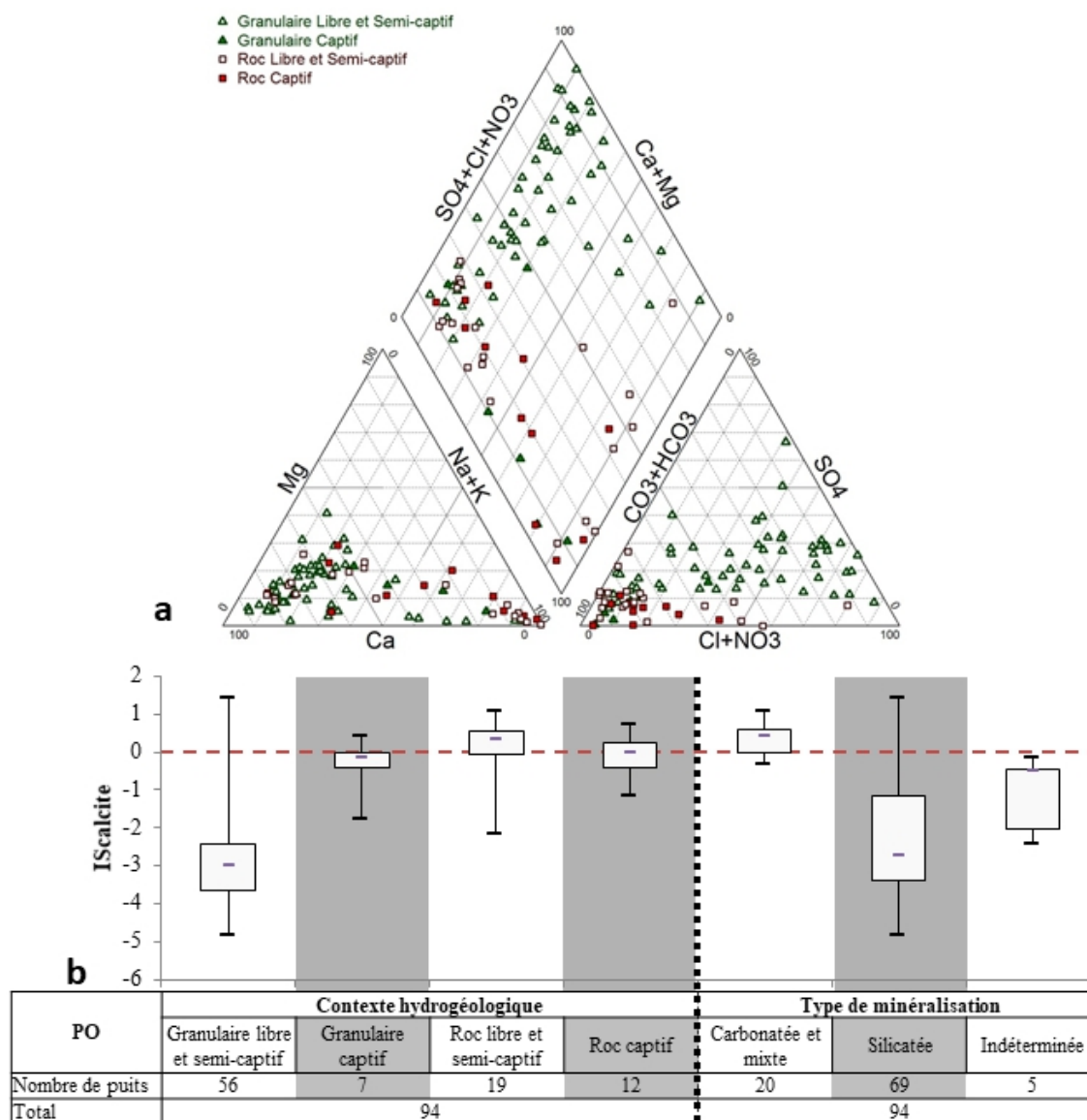


Figure 69 : Faciès géochimique des eaux de la région PO représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Les très faibles valeurs d' $IS_{calcite}$  des aquifères granulaires indiquent que les eaux qui y circulent sont très récentes. Cette caractéristique se confirme par la position de ces eaux dans le DEH, toutes groupées au début de l'échelle d'indices (Figure 70). Les teneurs élevées en nitrates et sulfates, traceurs de l'impact de l'activité anthropique sur les eaux de recharge, confirment également la contribution d'eau très récente dans les ressources exploitées par les puits. Toutes les masses d'eau prélevées dans ces aquifères ne témoignent cependant pas du même temps de séjour dans l'aquifère. La relation de l' $IS_{calcite}$  avec les teneurs en silice et en alcalinité indique une évolution significative de la chimie de certaines eaux (Figure 71). Les eaux des aquifères granulaires captifs sont plus évoluées que celles des parties libres.

Dans le cas des eaux séjournant dans les aquifères au roc, les points se répartissent sur l'ensemble du DEH, illustrant des temps de séjours généralement plus élevés (Figure 70). La plupart des puits au roc étant en milieu carbonaté, le complément d'information basé sur l' $IS_{calcite}$  n'est pas pertinent. Les quelques puits situés dans le roc silicaté captent des eaux dont la minéralisation est plus avancée que celle de la plupart des eaux des aquifères granulaires libres (Figure 71).

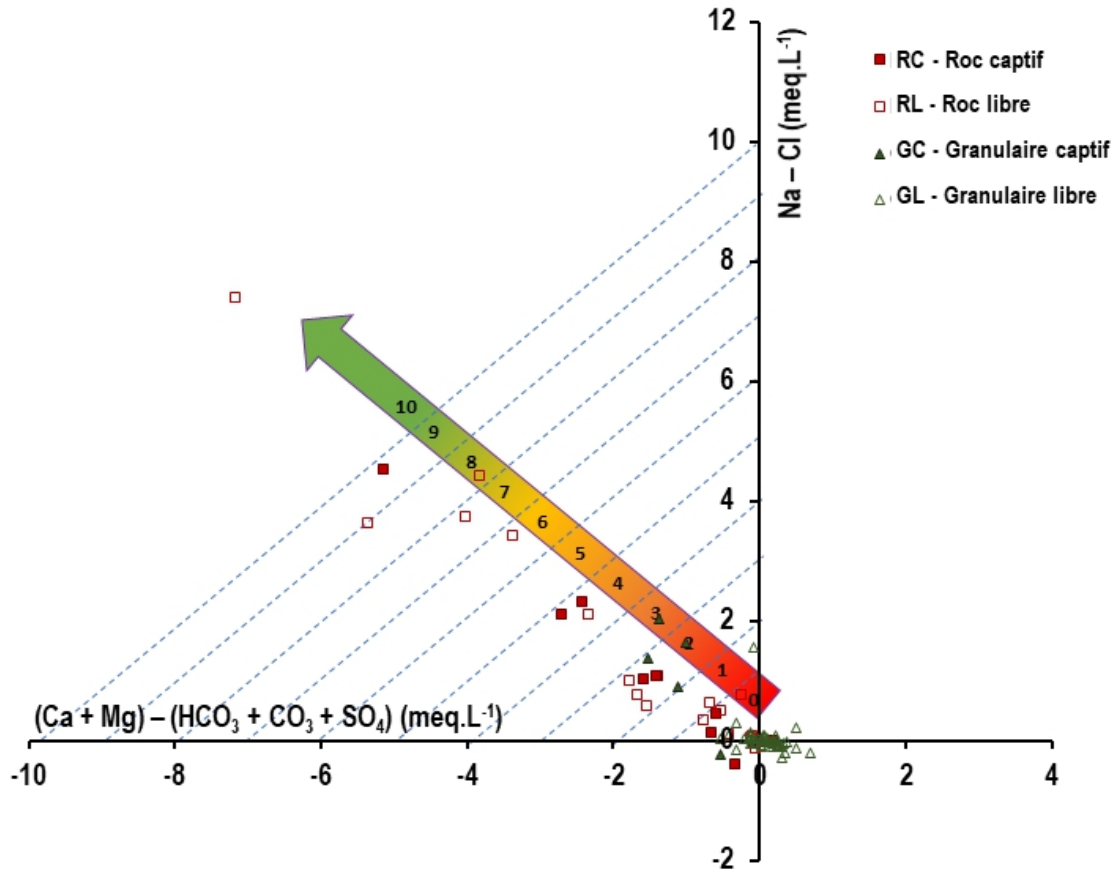
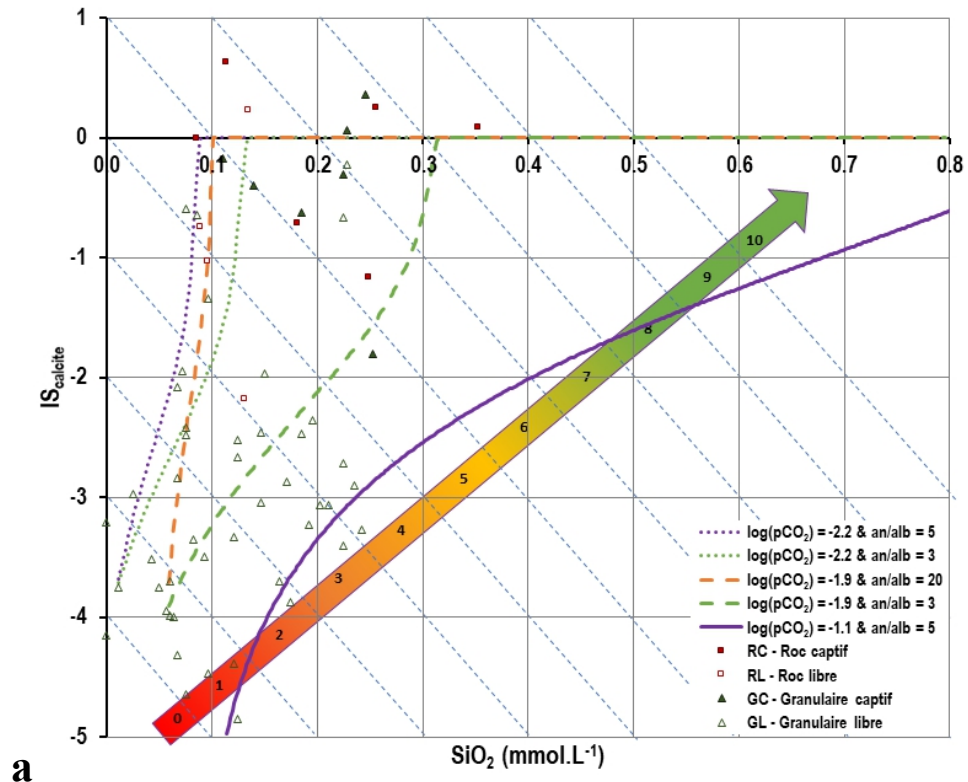
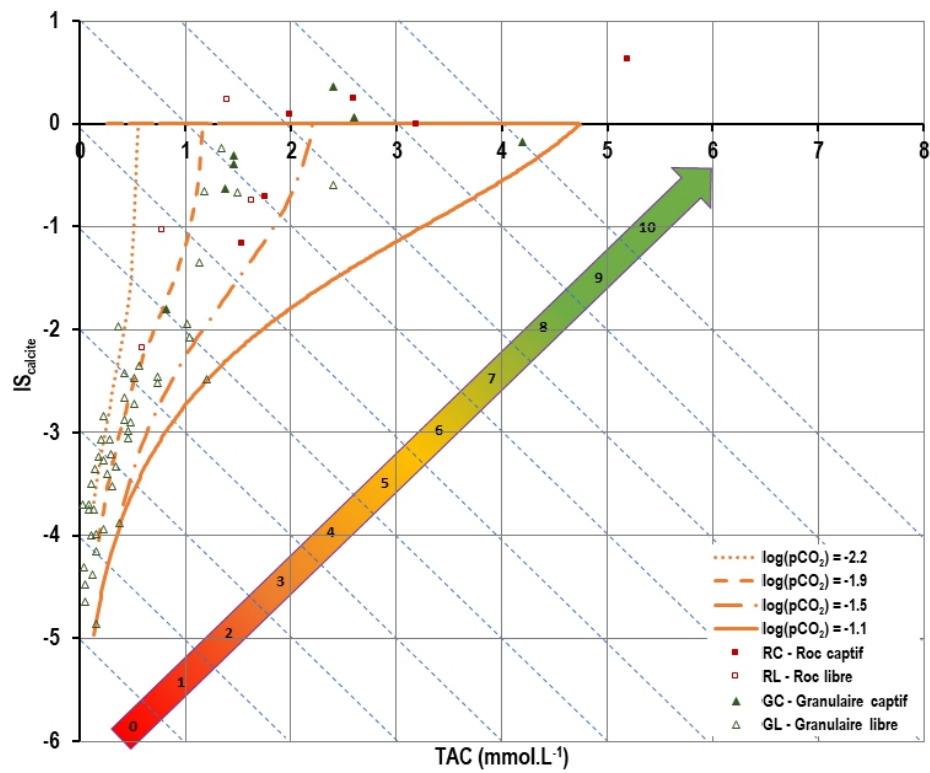


Figure 70: Faciès chimique des puits du Pré-PACES PO représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée





**a**



**b**

Figure 71: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES PO (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

Les IRC calculés pour les eaux des aquifères silicatés (granulaires et au roc) sont faibles, évoluant de 0 à 6 (Figure 72). Pour les eaux des aquifères au roc carbonatés, les indices s'étendent de 0 à 14 avec une majorité en dessous de 10. Dans les secteurs des aquifères libres granulaires, les IRC des ressources en eau dépassent rarement la valeur 3 tandis que dans les secteurs captifs ils atteignent des valeurs comprises entre 5 et 6. Pour les ressources des aquifères au roc, captifs ou libres, les valeurs d'IRC sont plus étendues, une distribution à associer soit à des lignes d'écoulements différentes, soit à différents stades d'évolution d'une même ligne d'écoulement. Les ressources possédant une bonne résistance (indices supérieurs à 8) témoignent d'une bonne capacité à endiguer les pollutions, typique des nappes séjournant longtemps dans des aquifères d'extension régionale.

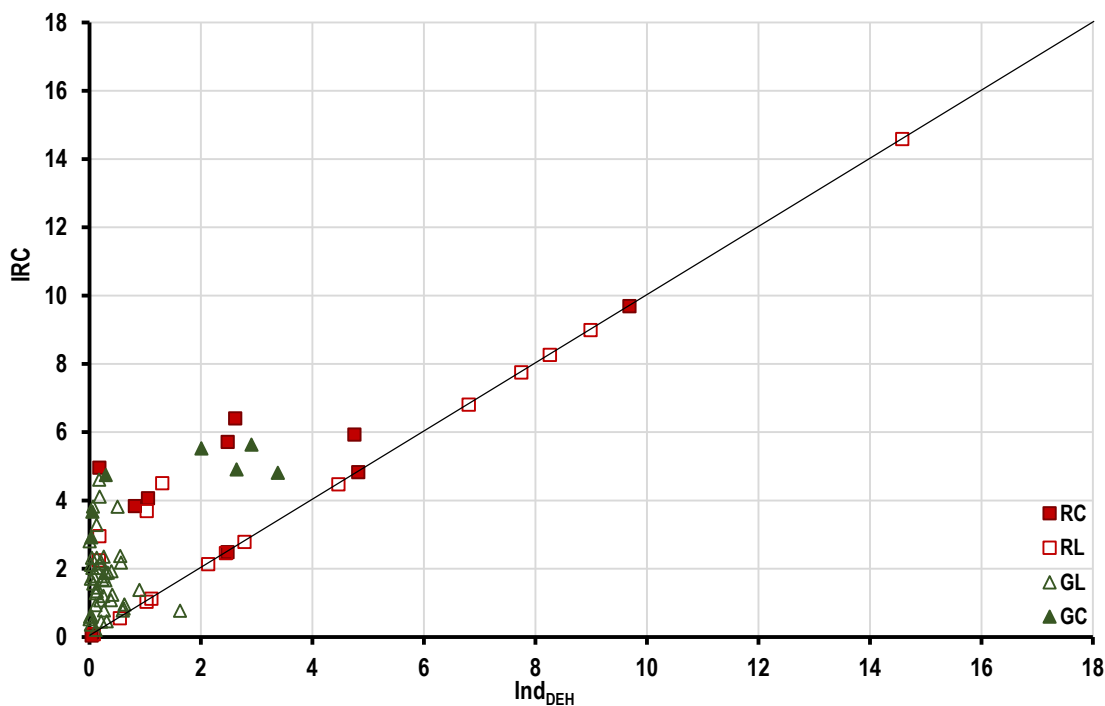


Figure 72: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

De grandes exploitations agricoles sont présentes dans la MRC de Portneuf, notamment sur les secteurs où les ressources en eau les plus superficielles sont exploitées. Une comparaison des IRC avec les teneurs en nitrates contenues dans les eaux prélevées est pertinente ici. Tout contexte géologique confondu, il apparaît que les nitrates se retrouvent significativement dans les masses d'eau aux résistances les plus faibles ( $IRC \leq 2$ ; Figure 73). Ponctuellement, il est possible de trouver des nitrates jusque dans les eaux aux IRC de 6 – 7, mais au-delà aucune présence n'est observée. Les ressources en eau possédant des IRC compris entre 0 et 7 sont vulnérables en cas de pollutions anthropiques car elles n'ont pas la résistance suffisante pour endiguer les polluants.

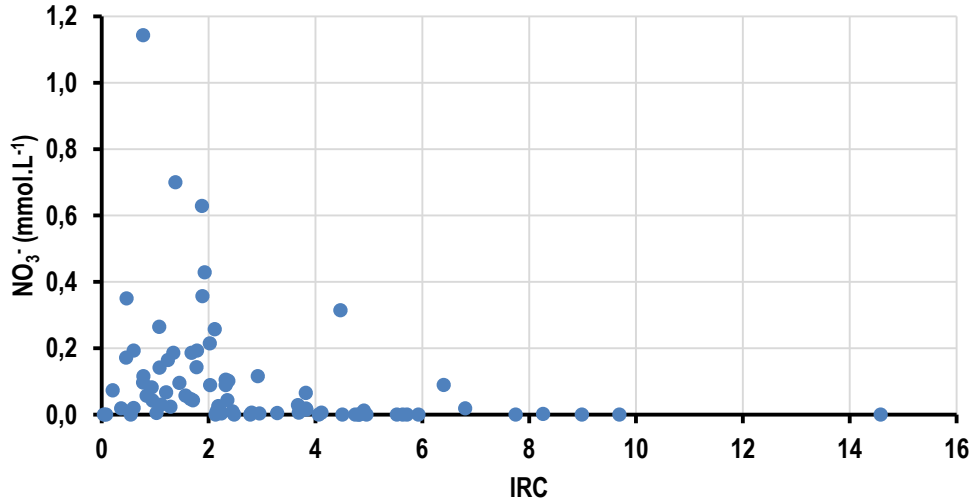


Figure 73: Évolution des teneurs en nitrates en fonction des indices de résistance chimique (IRC) calculés pour les masses d'eau de la région pré-PACES de Portneuf

La répartition spatiale des IRC concorde avec les indices DRASTIC (Figure 74). Les ressources les moins résistantes (points rouges et oranges foncés) sont situées sur des secteurs jugés très vulnérables par la méthode DRASTIC. S'agissant pour la plupart d'aquifères granulaires libres, cette concordance directe entre DRASTIC et l'IRC est pertinente. Pour la partie de la MRC la plus proche du fleuve (secteurs entourés en pointillés noirs, Figure 74), il existe un décalage entre les approches : l'indice DRASTIC indique systématiquement une ressource moins vulnérable que l'IRC. Dans le cas des puits situés au sud-est, les aires de recharges semblent suffisamment proches pour justifier que les eaux prélevées puissent être fortement impactées par la recharge récente. Les puits présents le long de la rivière Portneuf et au bord du fleuve peuvent être significativement rechargés par les eaux de surface. Enfin, les activités anthropiques, notamment l'irrigation des terres cultivées, peuvent également forcer localement la recharge sur ces secteurs, diminuant d'autant la capacité de résistance des nappes sous-jacentes.

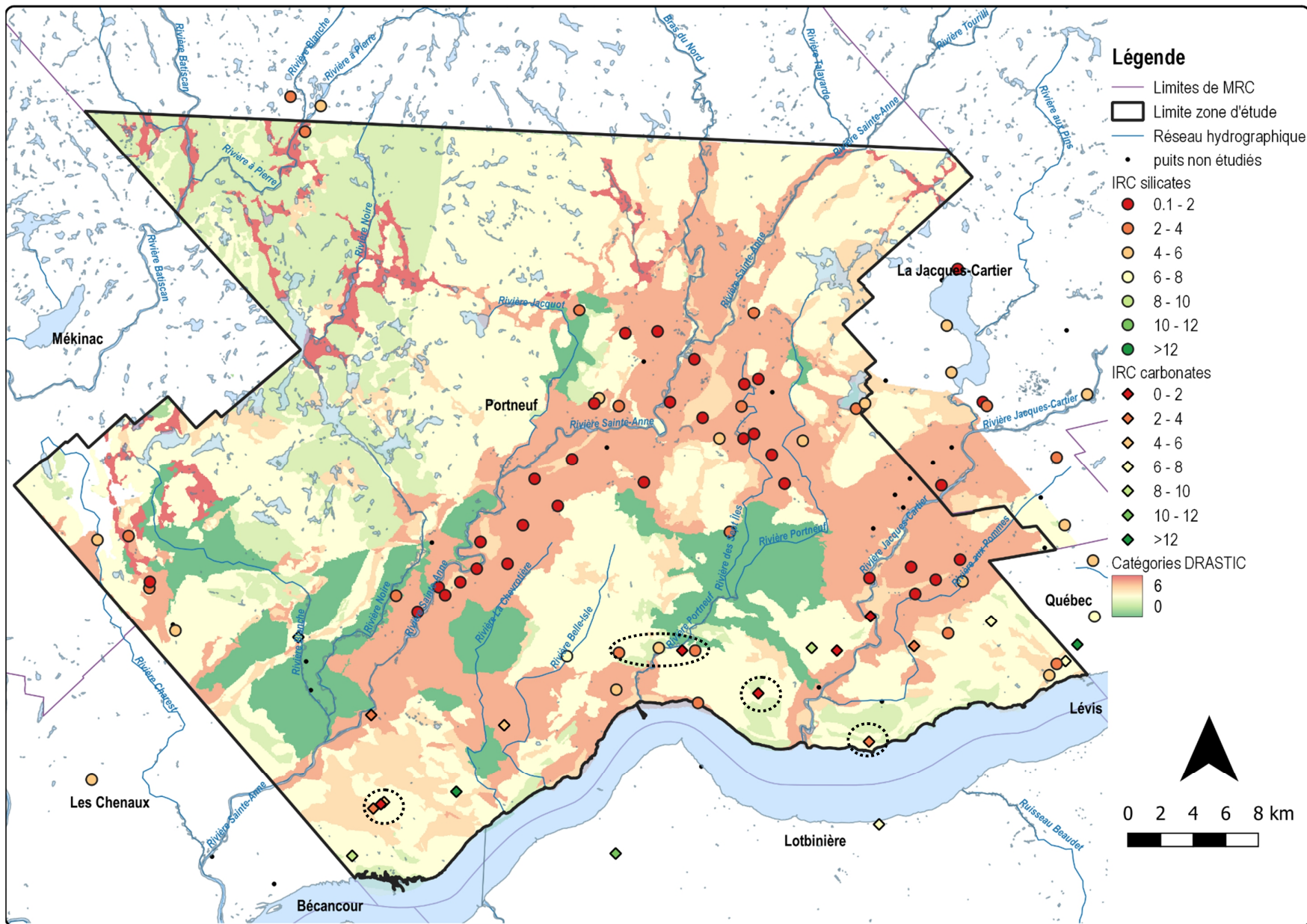


Figure 74: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et des indices DRASTIC - Pré-PACES PO

### 3.1.7 Communauté métropolitaine de Québec (PACES CMQ)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1: 129**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 105**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 90**

Le PACES Communauté Métropolitaine de Québec s'étend sur une superficie de 9 146 km<sup>2</sup> de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent. Il recoupe trois provinces géologiques : Grenville au nord, la Plate-forme du Saint-Laurent au centre et les Appalaches au sud du Fleuve. La Province de Grenville est constituée de roches métamorphiques tandis que la Plate-forme du Saint-Laurent est composée de roches sédimentaires carbonatées (calcaires, dolomies) et silicatées (shales, grès, ardoise). Les Appalaches sont constituées des mêmes types de roches sédimentaires mais déformées lors de la formation de la chaîne de montagne. Ces socles rocheux sont recouverts par divers dépôts meubles issus des dernières phases glaciaires et interglaciaires du Quaternaire. On retrouve principalement au nord des sédiments glaciaires peu épais (tills), tandis qu'au centre le long du fleuve, d'épais dépôts marins dus au retrait de la mer de Champlain sont observés. Enfin dans les vallées, on retrouve différents dépôts fluvio-glaciaires et glaciolacustres de granulométrie variée constituant des aquifères granulaires locaux. Sur la majeure partie du territoire, il existe des connexions hydrogéologiques entre aquifères au roc et les aquifères granulaires (Figure 75). Les zones de recharge sont principalement situées sur les Hautes-Terres où les aquifères affleurent. L'aquifère au roc des Basses-Terres est principalement en contexte captif, hormis quelques zones d'affleurement (par ex : chute Montmorency). Son alimentation vient certainement de flux souterrains plus profonds issus des aquifères rocheux grenvillien et appalachien. Les aquifères granulaires peuvent aussi être source d'alimentation des aquifères au roc sous-jacents (dans les Hautes-Terres grenvilliennes et appalachiennes) ou bien être alimentés par des apports souterrains régionaux (dans les Basses-Terres du Saint-Laurent).

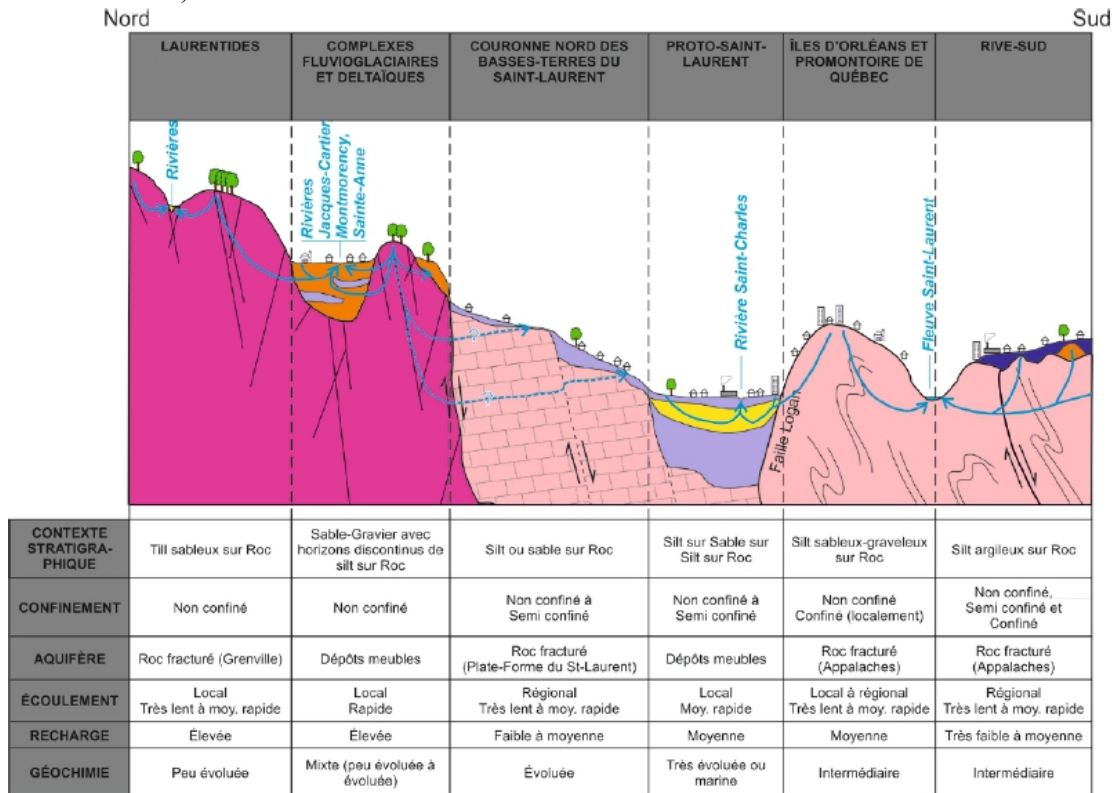


Figure 75: Coupe synthétique du contexte hydrogéologique de la région du PACES-CMQ (Talbot Poulin *et al.*, 2013)

Sur l'ensemble des puits prélevés dans ce PACES, 21 % prélèvent dans les aquifères granulaires et 79 % dans les aquifères au roc (Figure 76). Le contexte majoritairement libre des nappes se retrouve dans les puits sélectionnés, puisque 57 % sont en condition de nappe libre, 11 % en condition semi-captif et 16 % en condition captif (les 17 % notés comme indéterminés dans la base de données ont été classés par défaut dans la catégorie libre car jugée comme la plus vulnérable). Côté minéralogie, les roches silicatées dominent largement avec 76 % des puits qui se situent dans ces aquifères, contre seulement 1 % dans les roches carbonatées et 10 % dans des mélanges de roches silicatées et carbonatées. Les 13 % restants situés majoritairement dans des formations granulaires (tills, sédiments fluvioglaciaire), dont les compositions ne sont pas connues, sont considérés comme indéterminés.

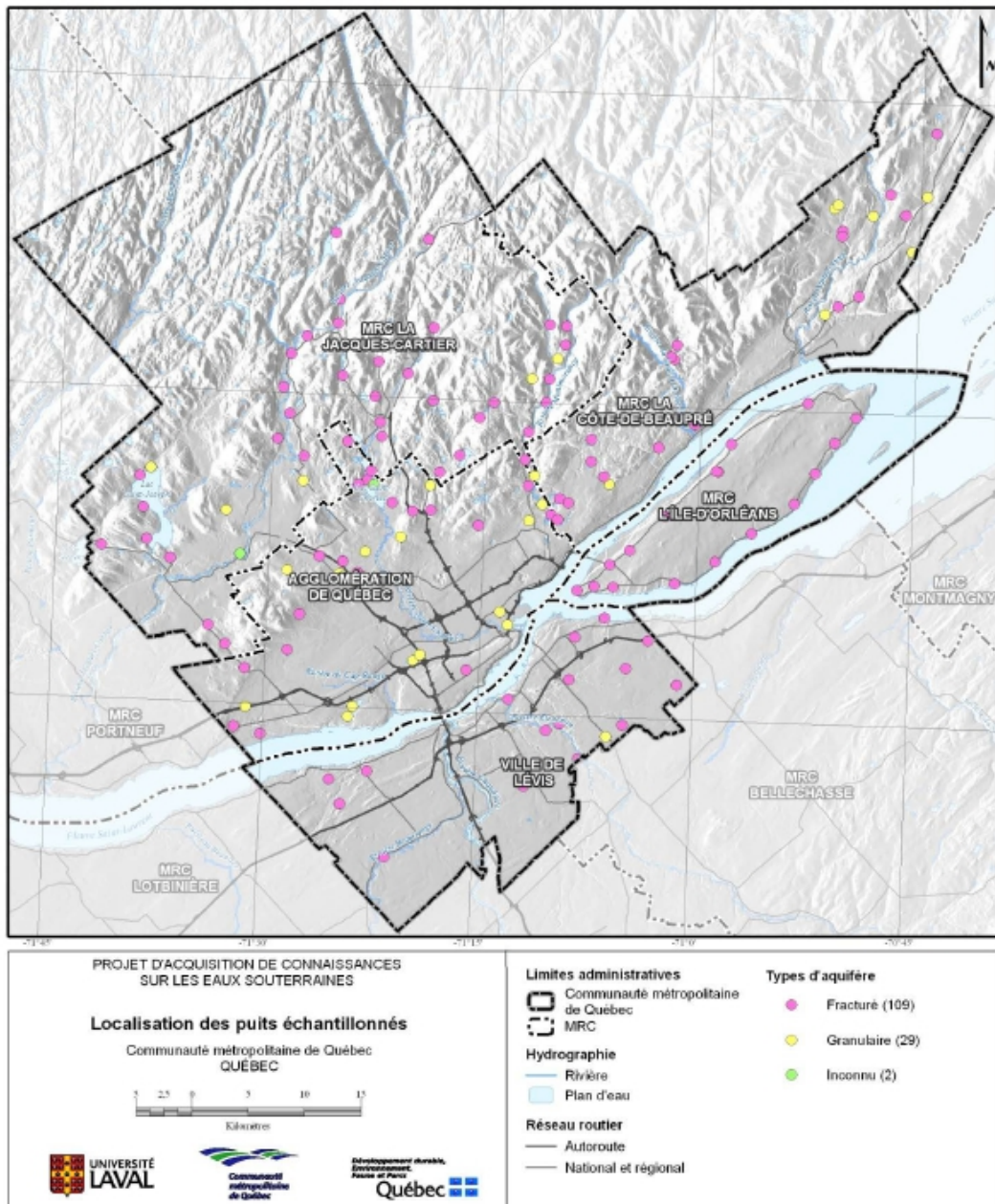


Figure 76: Localisation des puits prélevés en fonction du type d'aquifère correspondant (Talbot Poulin *et al.*, 2013)

Sur ce territoire, l'eau souterraine acquière suffisamment d'éléments dissous pour atteindre la saturation vis-à-vis de la calcite dans tous les contextes hydrogéologiques rencontrés (Figure 77b). Les

parties libres sont les moins saturées, confirmant des temps de séjour courts (recharge récente confirmée). En milieu carbonaté, les eaux souterraines présentent les indices de saturation les plus élevés, mais on retrouve également des eaux saturées vis-à-vis de la calcite dans les milieux silicatés, illustrant l'altération de minéraux silicatés calciques tels que l'anorthite. Dans la moitié des aquifères au roc, le faciès des eaux évolue principalement de bicarbonaté-calcique à bicarbonaté-sodique puis tend vers le pôle chloruré-sodique (Figure 77a). Cette succession de faciès géochimique soutient le changement progressif des processus dominants depuis les aires de recharge avec l'altération/dissolution de minéraux calciques vers les zones plus profondes où l'altération des minéraux sodiques, les échanges cationiques avec les argiles marines ou le mélange avec des eaux de mer piégées deviennent dominants. Dans l'autre moitié des aquifères au roc ainsi que dans les milieux granulaires, les eaux s'étendent du pôle bicarbonaté-calcique au pôle chloruré-sodique en passant par un stade intermédiaire mixte enrichi en nitrates. Pour ces milieux, l'impact anthropique semble significatif, apportant des sels et des nutriments.

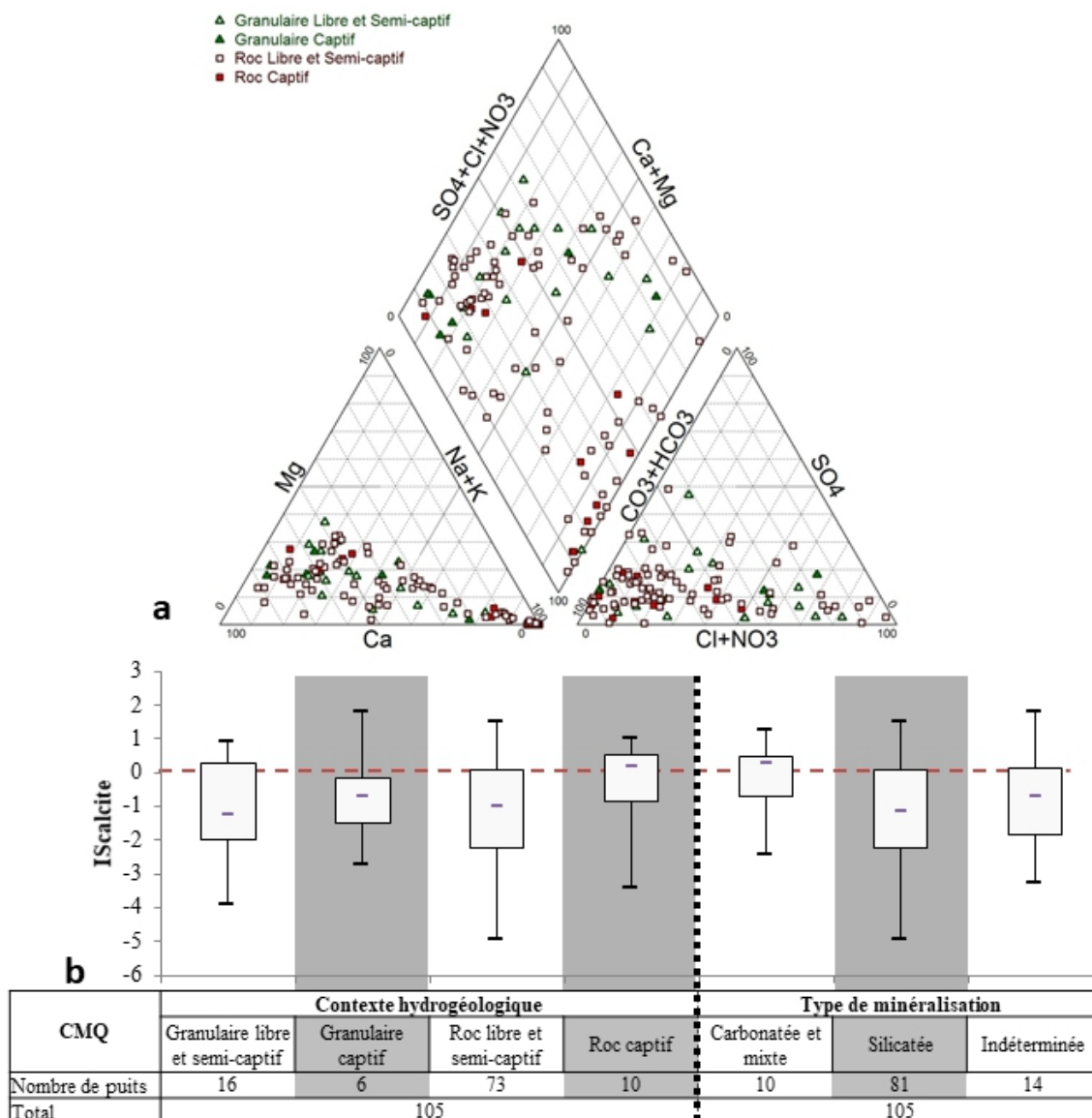


Figure 77 : Faciès géochimique des eaux de la région CMQ représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Dans les aquifères granulaires, la concentration des points à l'origine de l'échelle d'indice du DEH indique une faible évolution du faciès chimique des eaux (Figure 78). Il est important de noter qu'un grand nombre de puits granulaires ont été exclus du calcul d'indice car leurs eaux présentaient un enrichissement significatif en calcium et chlorures non traités dans cette étude ( $\text{Na-Cl} < -0.5 \text{ meq.L}^{-1}$ ). À l'inverse les aquifères au roc présentent différents stades d'évolutions depuis les zones de recharge à la base de l'échelle d'indice jusqu'aux secteurs les plus évolués à l'extrémité gauche du graphique. Ces résultats coïncident avec le contexte géologique de la région où les aquifères granulaires de très faible extension doivent renfermer des eaux très récentes où la recharge domine la chimie de l'eau tandis que les aquifères au roc d'extension régionale présentent toutes les gammes de temps de séjour, dépendamment de la localisation des puits par rapport aux aires de recharge.

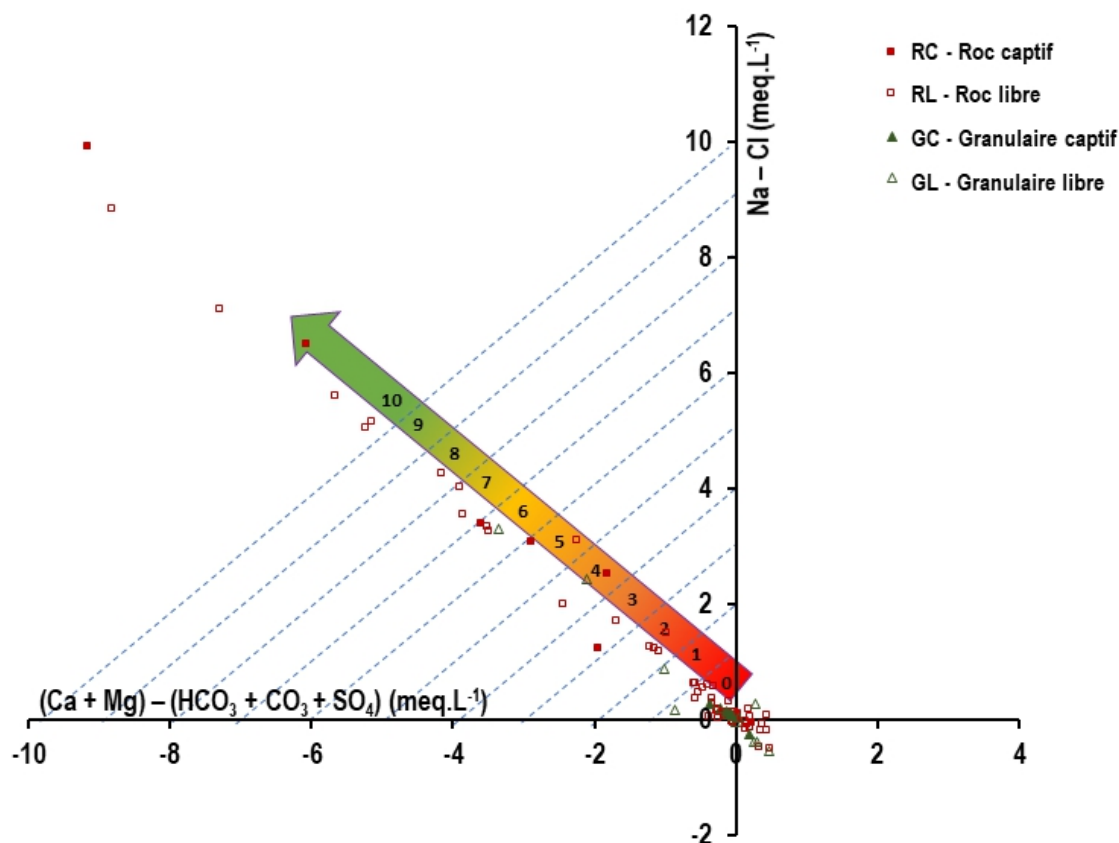


Figure 78 : Faciès chimique des puits du PACES CMQ représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

Dans ce secteur, des eaux dominées par l'altération/dissolution des minéraux calciques sont exploitées dans les aquifères granulaires et les aquifères au roc. Au sein de chaque contexte, la représentation des  $\text{IS}_{\text{calcite}}$  en fonction des teneurs en silice dissoute et en alcalinité permet de préciser les observations faites sur le DEH (Figure 79). En découle une échelle d'indices de résistance plus étendue pour les ressources en eaux dominées par les altérations des minéraux calciques (IRC compris entre 0 et 5), en comparaison de l'indice basé uniquement sur le DEH qui concentre ces ressources sur des indices inférieurs à 1 (Figure 80). Les eaux des aquifères granulaires et des aquifères au roc sont respectivement caractérisées par des IRC compris entre 1 et 8 et entre 0 et 15. La majeure partie des ressources reste faiblement résistante avec des IRC inférieurs à 6.



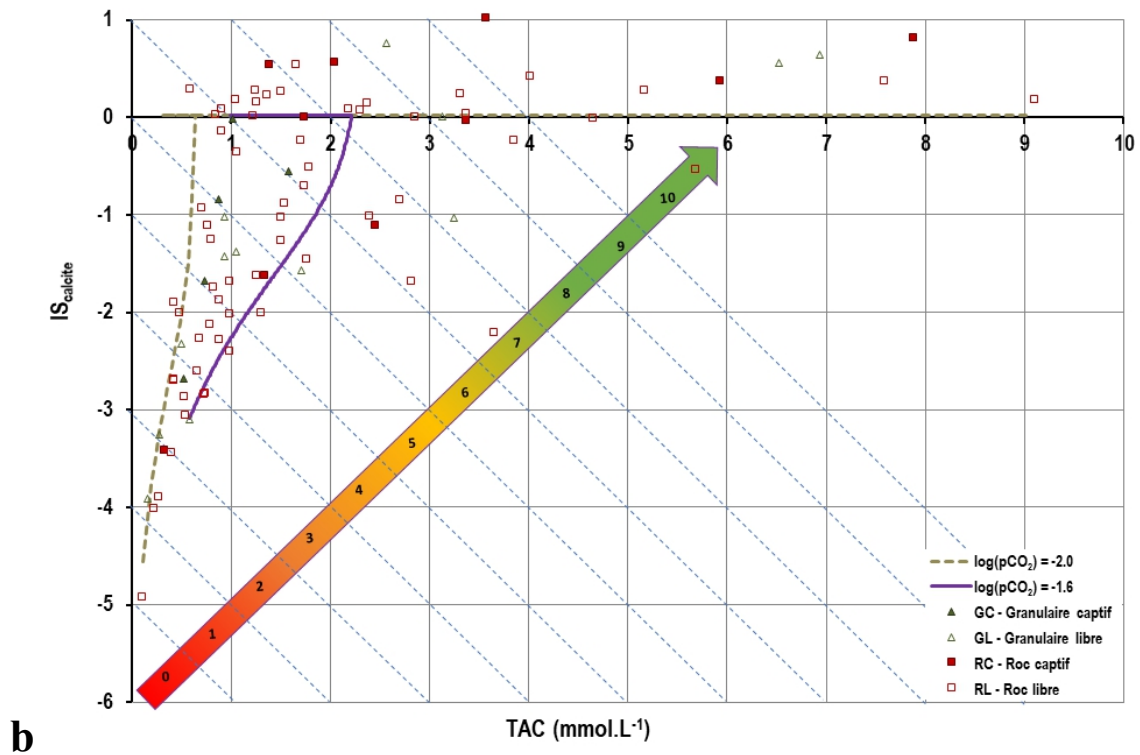
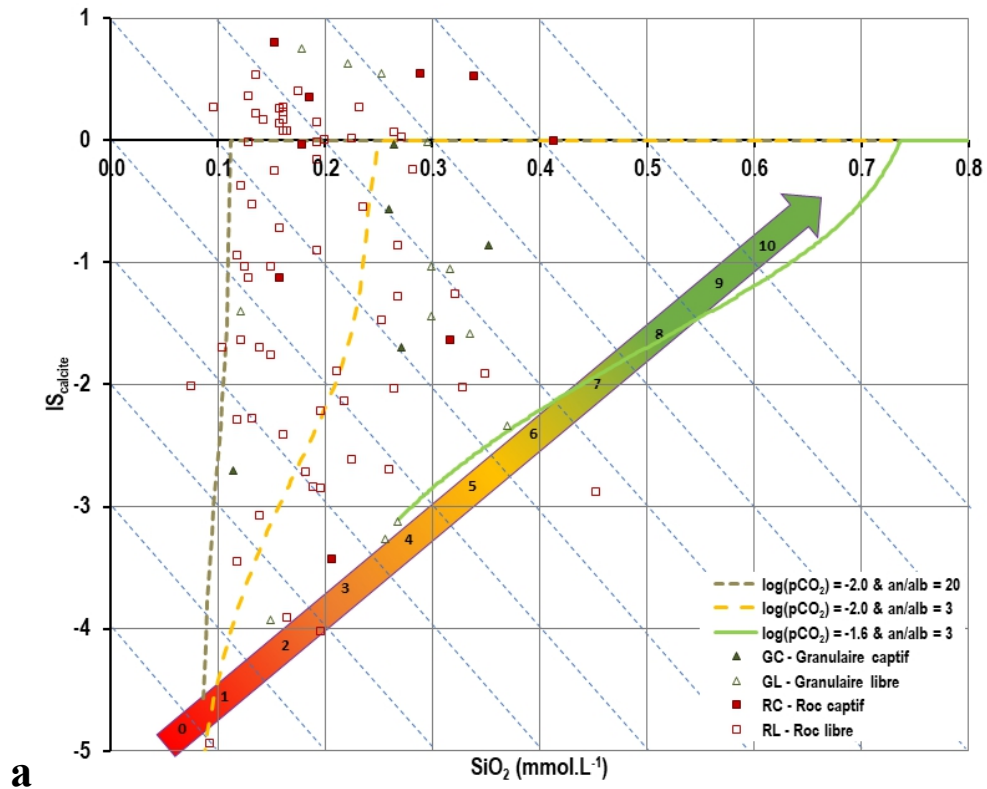


Figure 79 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CMQ (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

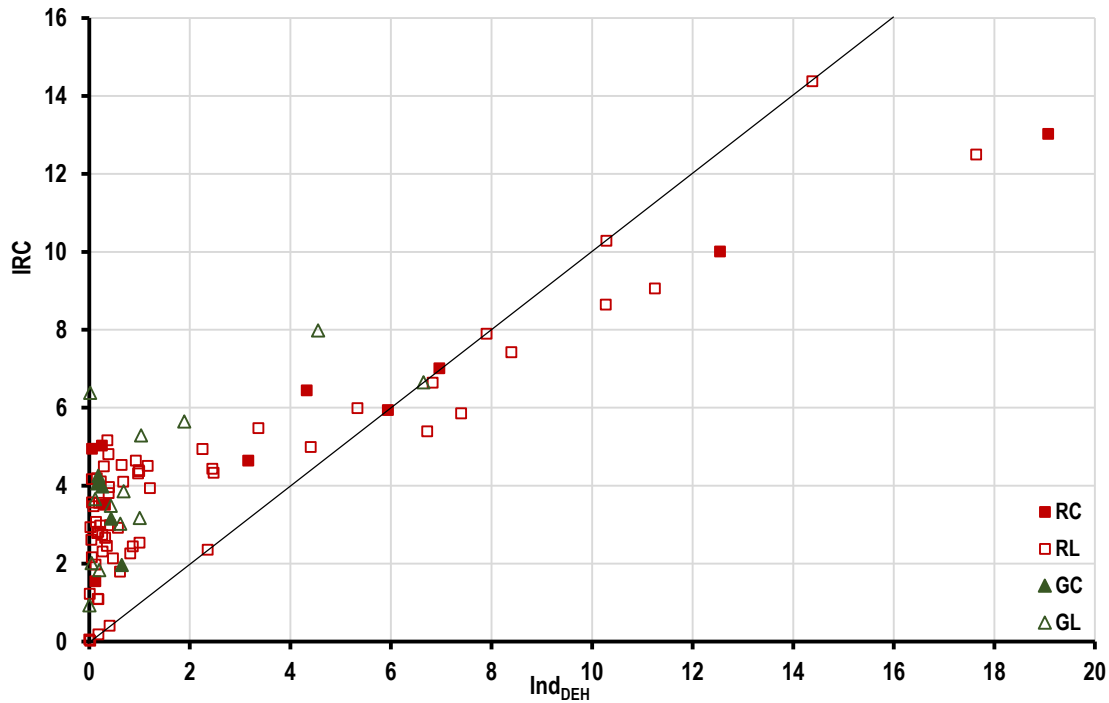


Figure 80 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La prédominance de ressources en eau faiblement résistantes dans les puits d'exploitation de la région concorde très bien avec la répartition géographique des puits échantillonnés (Figure 81). Ces derniers se situent principalement dans les fonds de vallée des Hautes-Terres où la recharge peut être importante en comparaison des lignes d'écoulements plus profondes interceptées par les ouvrages. La proximité des eaux de surface (rivières et lacs) accroît la part de recharge récente dans les prélèvements des ouvrages. Ces secteurs sont caractérisés à la fois par une vulnérabilité forte (indice DRASTIC élevé) et par une résistance faible (IRC faible). Les enjeux de protection y sont importants. Pour le secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Basses-Terres des Appalaches, la résistance est plus importante notamment pour les aquifères captifs dont la recharge dépend principalement des lignes d'écoulement régionales provenant du sud. Les indices DRASTIC sont plus faibles sur ce secteur grâce aux dépôts d'argiles marines qui créent une protection importante des ressources sous-jacentes face aux pollutions de surface. Les rares secteurs où les ressources en eau possèdent une résistance faible dans les Basses-Terres correspondent aux aquifères granulaires superficiels.

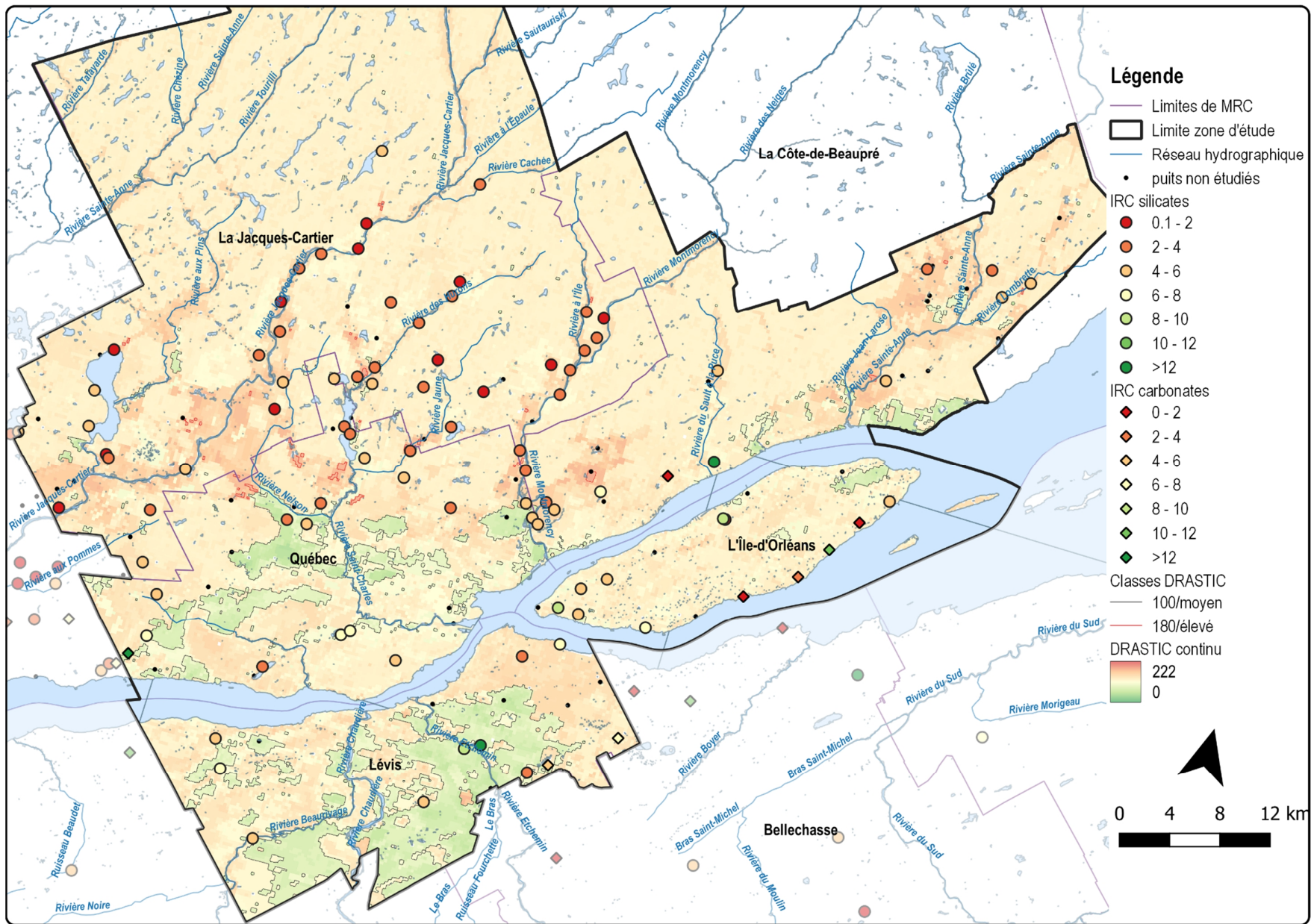


Figure 81 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES CMQ

### 3.1.8 Saguenay-Lac Saint Jean (PACES SLSJ)

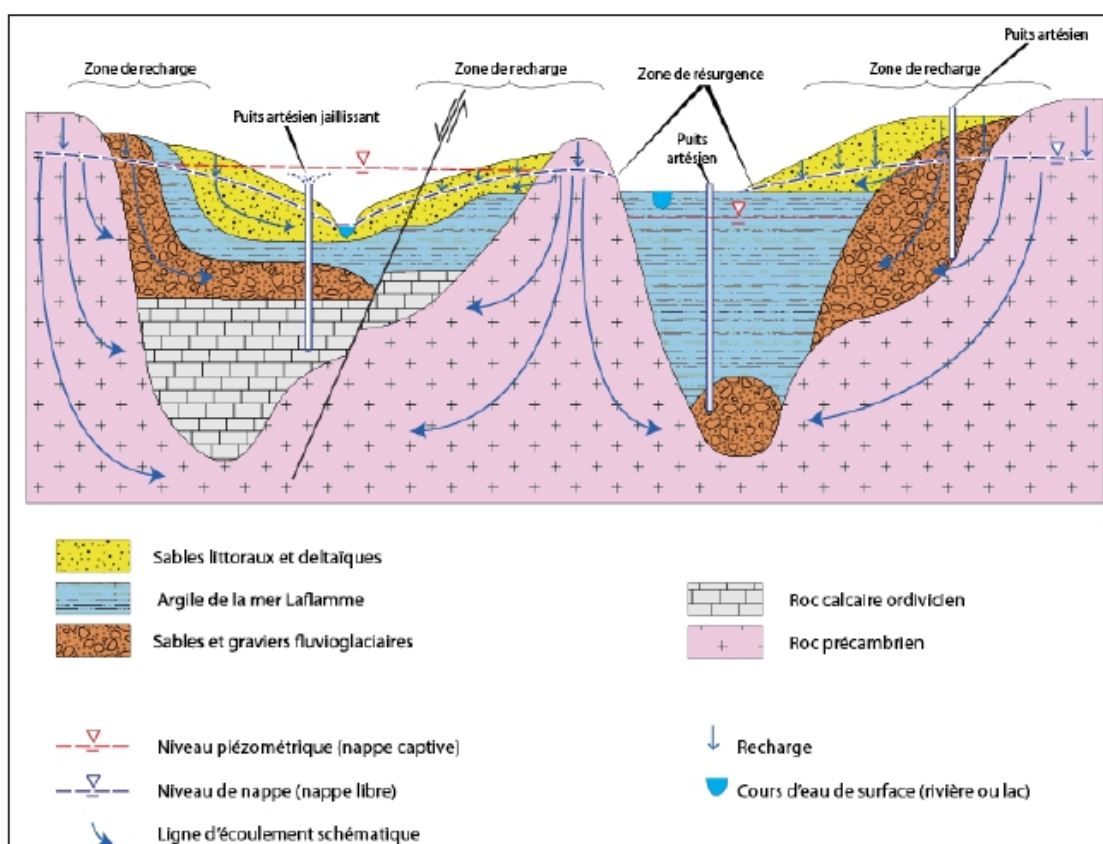
Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 283

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 277

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 238

Le territoire du PACES Saguenay-Lac-Saint-Jean couvre une superficie de 13 210 km<sup>2</sup>. Au cœur de la Province géologique de Grenville, ce territoire est composé du socle cristallin Précambrien recouvert sur une petite partie par des roches sédimentaires ordoviciennes (calcaires et shales) déposées en discordance. Les roches ordoviciennes calcaires très fracturées en surface, montrent une fracturation moins importante dès lors que la profondeur augmente. Cette profondeur peut d'ailleurs atteindre jusqu'à 110 m localement, mais leur extension régionale est très faible, principalement centrée aux abords du lac Saint-Jean. En ce qui concerne les dépôts meubles récents, ils sont de types variés avec deux lithologies d'extension régionale : les sédiments fins de la mer Laflamme et le till. Les autres sédiments de types fluviaux et fluviaux-glaciaires se retrouvent à des échelles plus petites, contenant néanmoins des nappes d'eau souterraines locales lorsque la perméabilité le permet.

Sur ce territoire, toutes les typologies d'aquifères présentent des zones de recharge directe par infiltration des précipitations (Figure 82). Cependant, dans certains secteurs, les aquifères rocheux ordovicien ainsi que quelques aquifères granulaires profonds se retrouvent captifs et complètement dépendants des flux d'alimentation souterrains provenant du socle précambrien ou des aquifères granulaires sus-jacents.



Sur ce territoire, il y a à peu près autant de puits prélevés dans les aquifères granulaires que dans les aquifères au roc (53 % et 47 % respectivement, Figure 83). 40 % d'entre eux puisent dans des nappes libres, 11 % dans des nappes semi-captives et 38 % dans des nappes captives, les 12 % restant ayant des conditions de confinement indéterminées. Malgré leur présence significative autour du lac Saint-Jean, les aquifères purement carbonatés ne sont jamais prélevés dans les puits échantillonnés : 67 % des puits prélèvent dans des aquifères silicatés, 2 % dans des aquifères mixtes et 30 % dans des aquifères indéterminés.

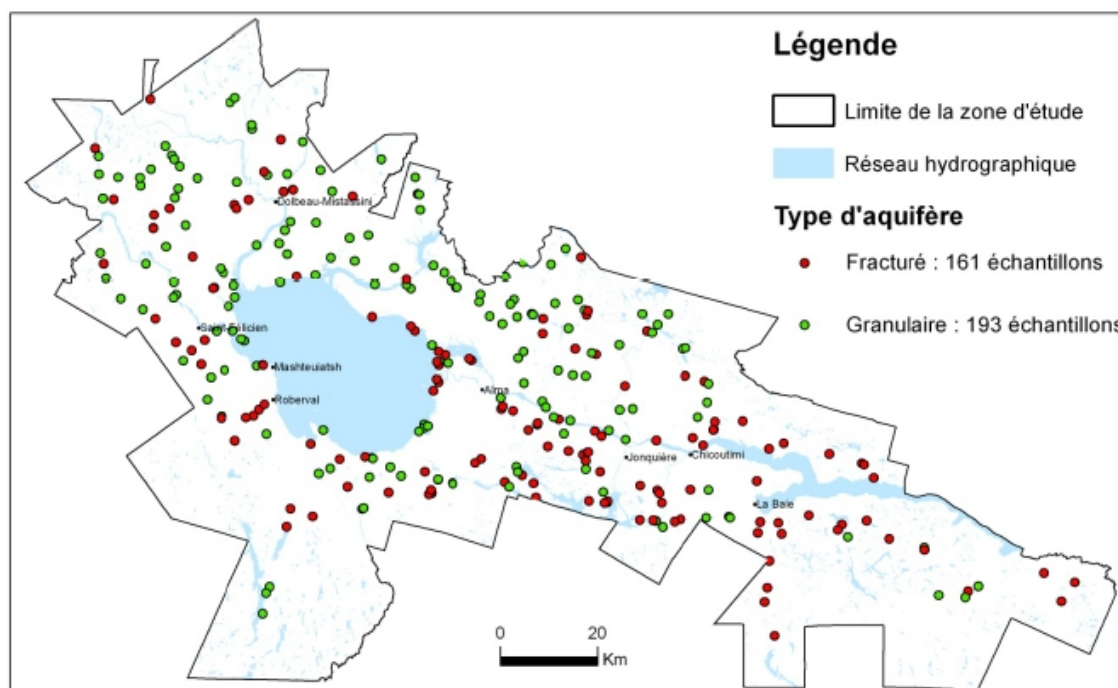


Figure 83: Répartition des puits échantillonnés en fonction du type de milieu aquifère puisé (CERM-PACES, 2013)

Dans cette région, la plupart des eaux souterraines présente un faciès bicarbonaté-calcique avec un  $IS_{\text{calcite}}$  proche de 0 (Figure 84). Bien que les roches ordoviciennes carbonatées soient présentes localement, elles ne peuvent être la source de cette minéralisation sur l'ensemble de la région. L'altération des silicates calciques est donc privilégiée sur ce secteur, ce qui serait concordant avec l'évolution progressive de l' $IS_{\text{calcite}}$  depuis le contexte granulaire libre vers le contexte roc captif en accord avec les circulations décrites sur la Figure 82. Un petit groupe de points possède un faciès bicarbonaté-sodique, illustrant un stade d'évolution des eaux souterraines où l'altération de silicates sodiques et l'échange cationique avec les argiles présentes peuvent devenir majoritaires. Les eaux présentant un faciès chloruré-sodique sont issues d'un mélange avec des eaux saumâtres piégées dans les dépôts marins et leur minéralisation trop importante les rend non potables. Ces eaux ont donc été exclues pour les calculs d'indices. De la même manière, les eaux présentant un faciès chloruré-calcique ont été exclues car ce faciès correspond généralement aux eaux impactées par des pollutions anthropiques pour lesquelles la méthode d'indice basée sur le diagramme d'évolution chimique est inadaptée (eaux de type 2 dans la Figure 21).

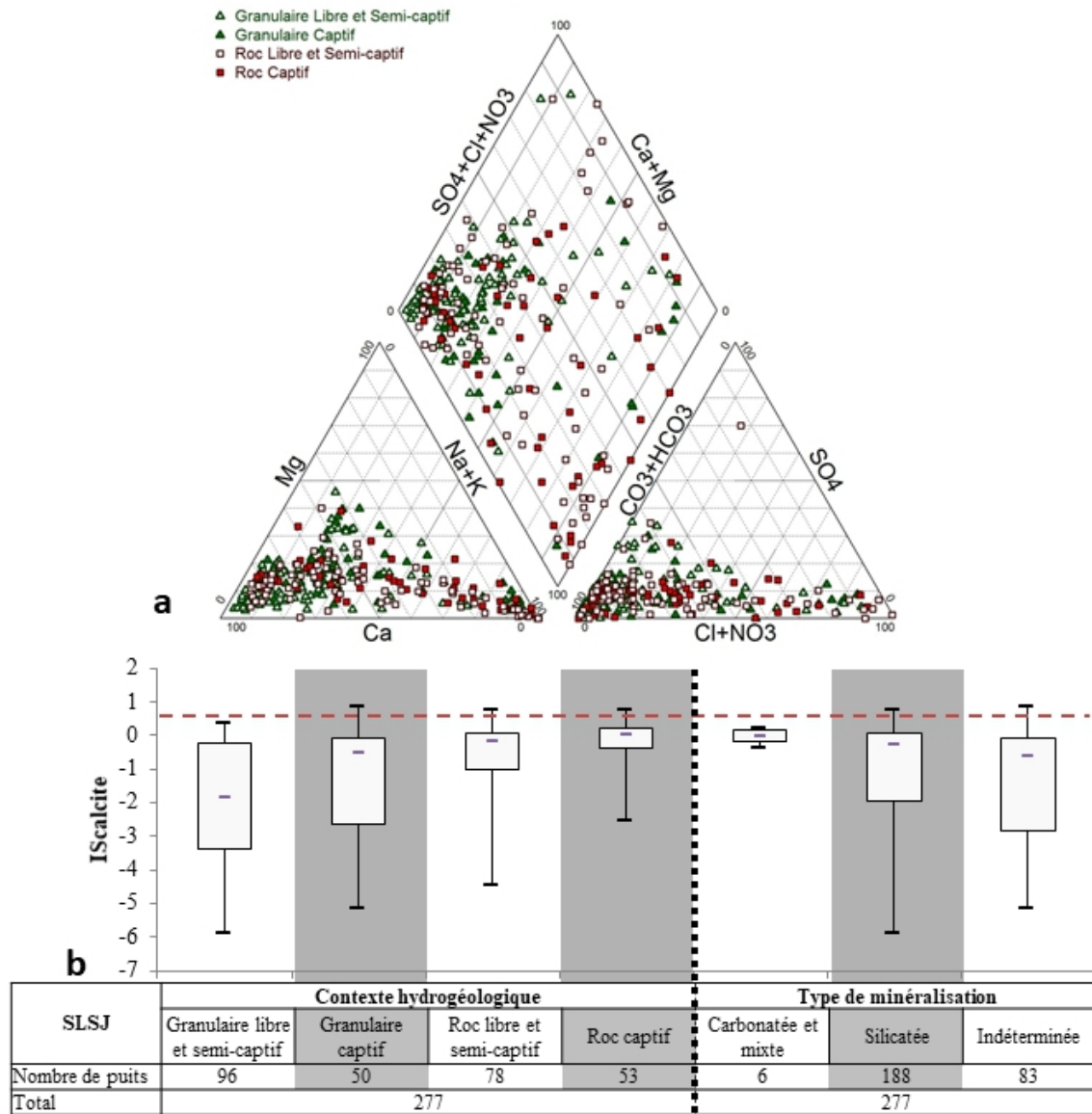


Figure 84 : Faciès géochimique des eaux de la région SLSJ représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{\text{calcite}}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Pour les 238 puits conservés, la distribution des points dans le DEH s'accorde avec le changement de faciès chimique des eaux le long de leur parcours dans les aquifères rocheux ainsi que dans les parties captives des aquifères granulaires (Figure 85). Les eaux des nappes libres des aquifères granulaires se retrouvent exclusivement à l'origine de l'échelle d'indice du DEH, appuyant le caractère récent de ces ressources. Le temps de séjour faible de ces eaux s'explique par la proximité des zones de recharge ainsi que l'extension souvent limitée de ces aquifères locaux. Certaines eaux prélevées dans des aquifères au roc libres se trouvent également à l'origine de l'échelle du DEH. Pourtant, ces eaux reflètent un stade d'évolution chimique plus abouti car leur  $IS_{\text{calcite}}$  et leur alcalinité sont plus élevés (Figure 86).

Dans les milieux silicatés, le suivi de l' $IS_{\text{calcite}}$  fournit un réel complément d'information par rapport au DEH, en détaillant plus finement les stades de minéralisation de l'eau souterraine associés à l'altération des silicates calciques. Les modélisations réalisées sous PHREEQC encadrent les nuages de points des différents contextes hydrogéologiques présents.

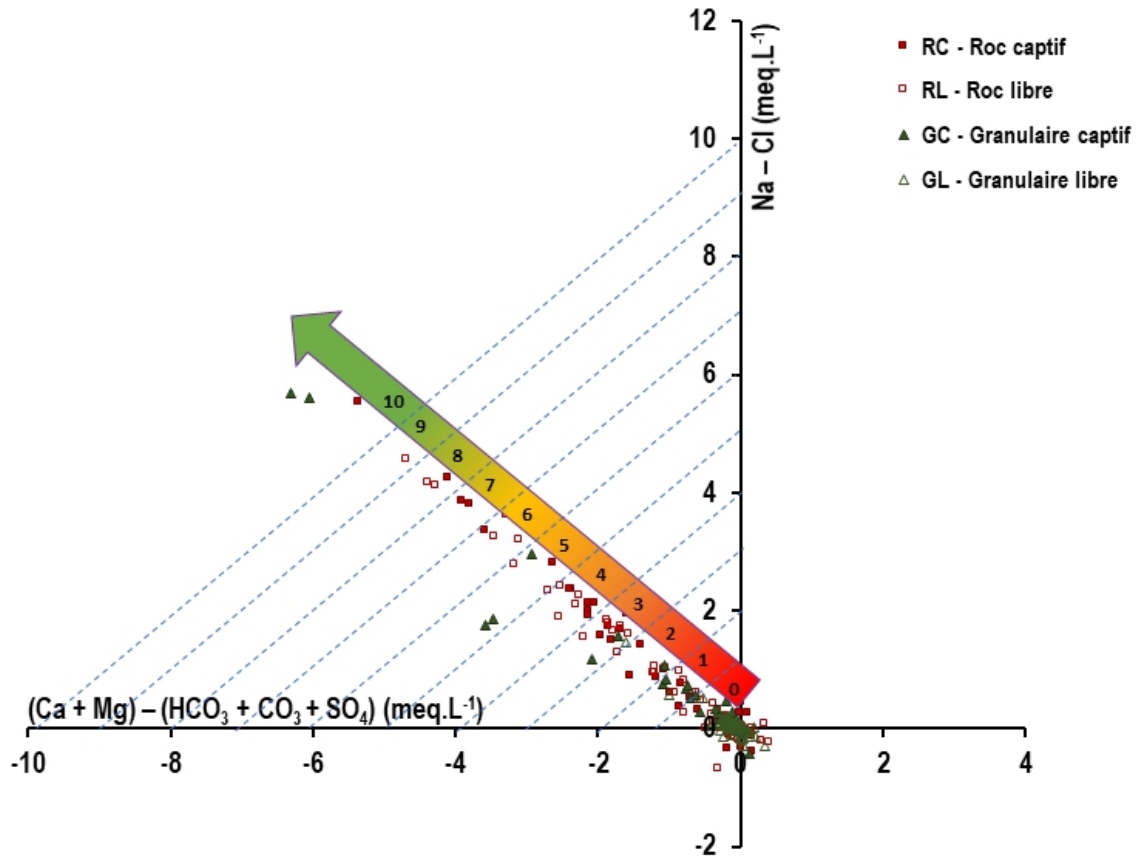


Figure 85 : Faciès chimique des puits du PACES SLSJ représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

Dans cette région, la sensibilité de l'IRC contribue à la distinction des ressources en eaux aux plus faibles résistances présentes dans les aquifères granulaires (IRC de 0 à 6) par rapport aux ressources des aquifères au roc dont les eaux les moins résistantes possèdent un IRC de 3 (Figure 87). Aucune distinction ne peut être faite entre les secteurs captifs et les secteurs libres des aquifères au roc ni des aquifères granulaires.

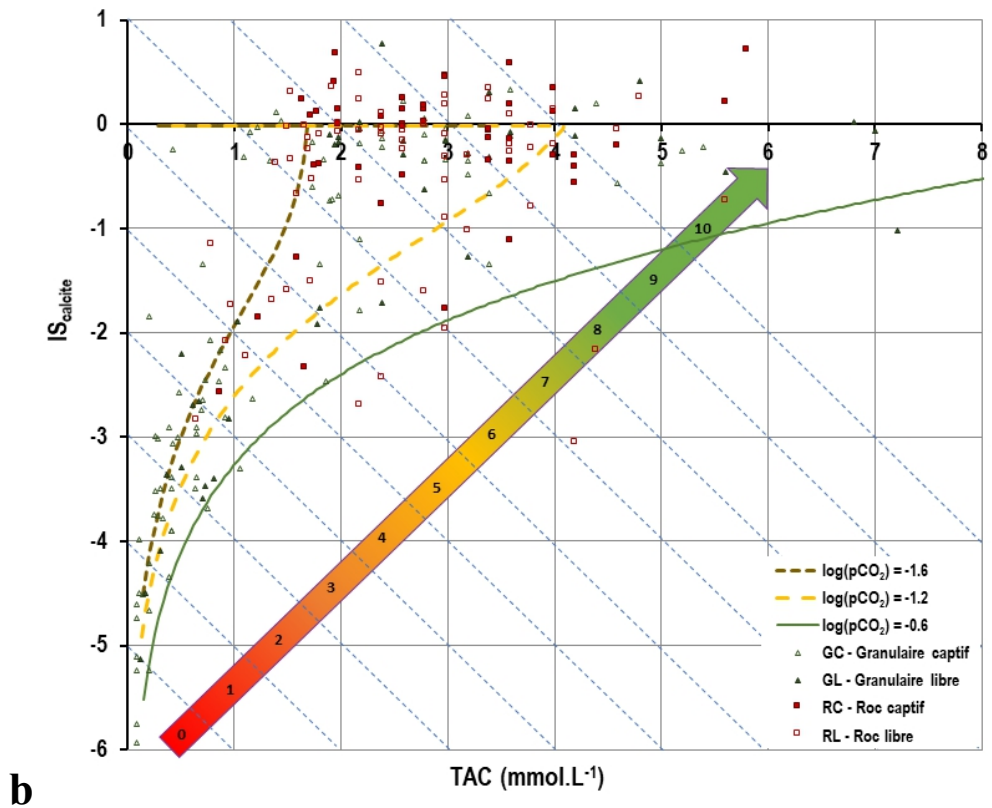
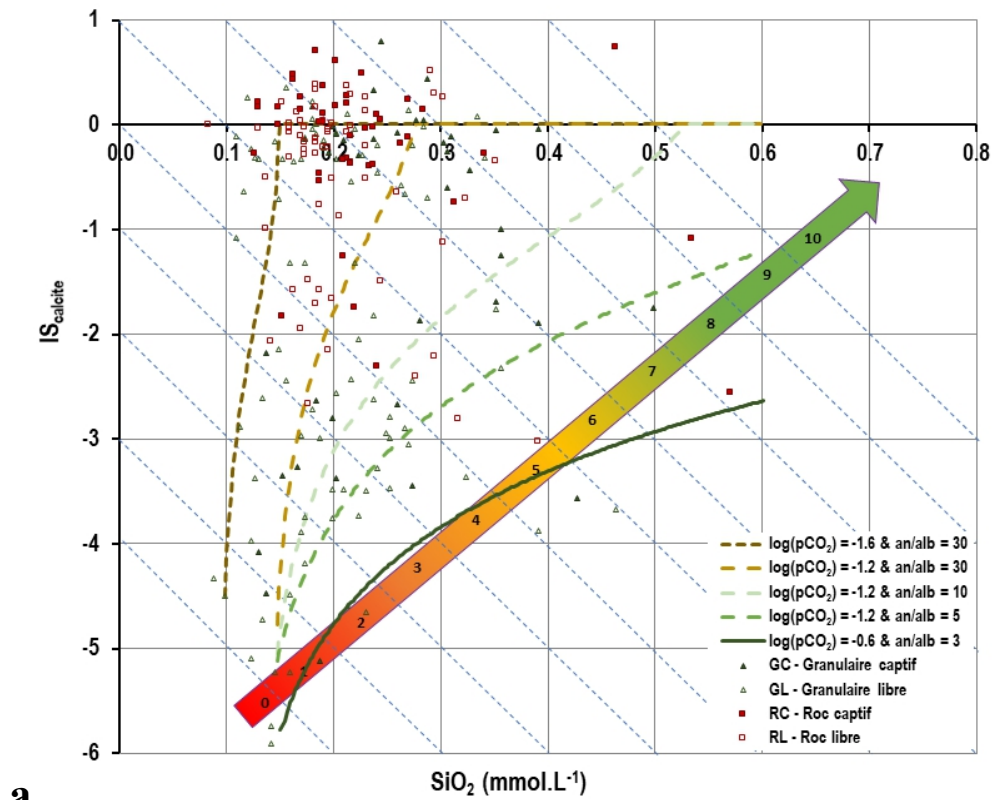


Figure 86 : Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES SLSJ (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance



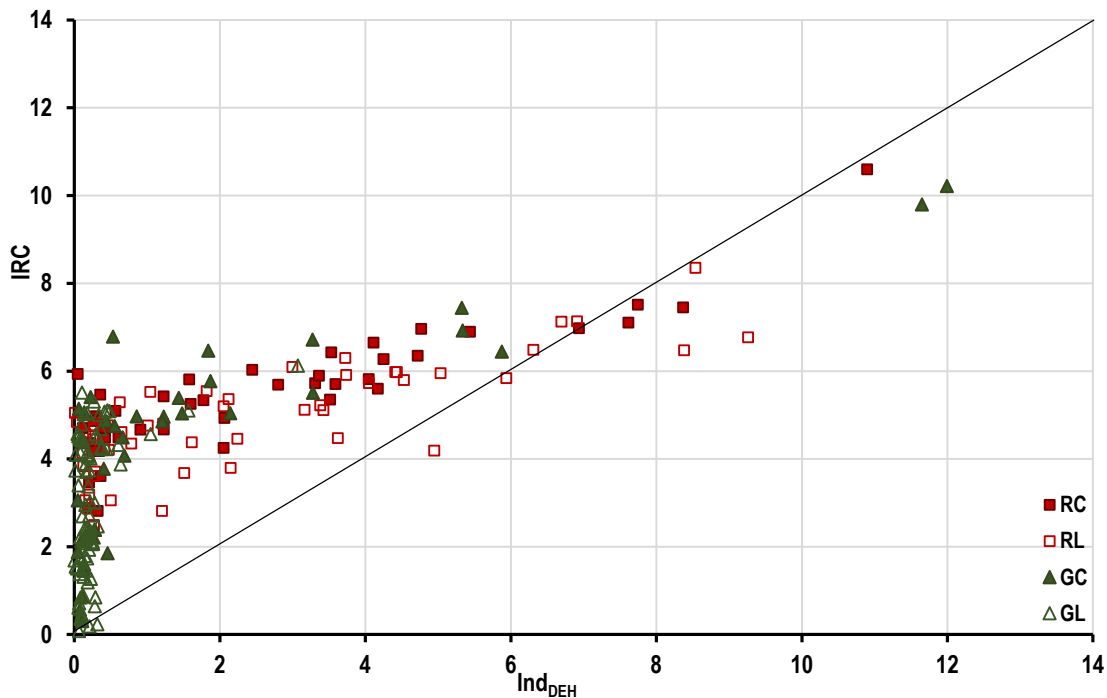


Figure 87 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

Comme pour les régions précédentes, sur le Saguenay-Lac-Saint-Jean, une concordance entre les échelles de valeur de l'IRC et de l'indice DRASTIC est observable (Figure 88). Les ressources en eau possédant une grande résistance (points verts) sont rares mais se retrouvent sur des secteurs jugés comme peu vulnérables par DRASTIC. Elles sont éloignées des aires de recharge, et correspondent à des masses d'eaux plus évoluées chimiquement. Les ressources de résistance moyenne (points jaunes/oranges) se répartissent principalement au sud du fjord du Saguenay et au sud-ouest du lac Saint-Jean. Ces secteurs sont généralement couverts par des indices DRASTIC moyens. Enfin, les ressources les moins résistantes (points rouges) se retrouvent dans les secteurs de recharge et de décharge (fonds de vallées étroites, plateaux perméables...) caractérisés par des indices DRASTIC élevés. Aux abords du réseau hydrographique, un certain nombre de points illustrent des résistances des masses d'eau faibles, souvent associés à des secteurs jugés vulnérables par DRASTIC (i.e. secteurs entourés en pointillés noirs). L'impact des interactions eau de surface – eau souterraine, notamment la recharge des nappes par les lacs et les rivières, peut expliquer ces résultats. Dans l'ensemble, les ressources en eau sont caractérisées par des IRC faibles à moyens car peu de puits sont situés sur les portions de territoires jugées non vulnérables avec l'indice DRASTIC.

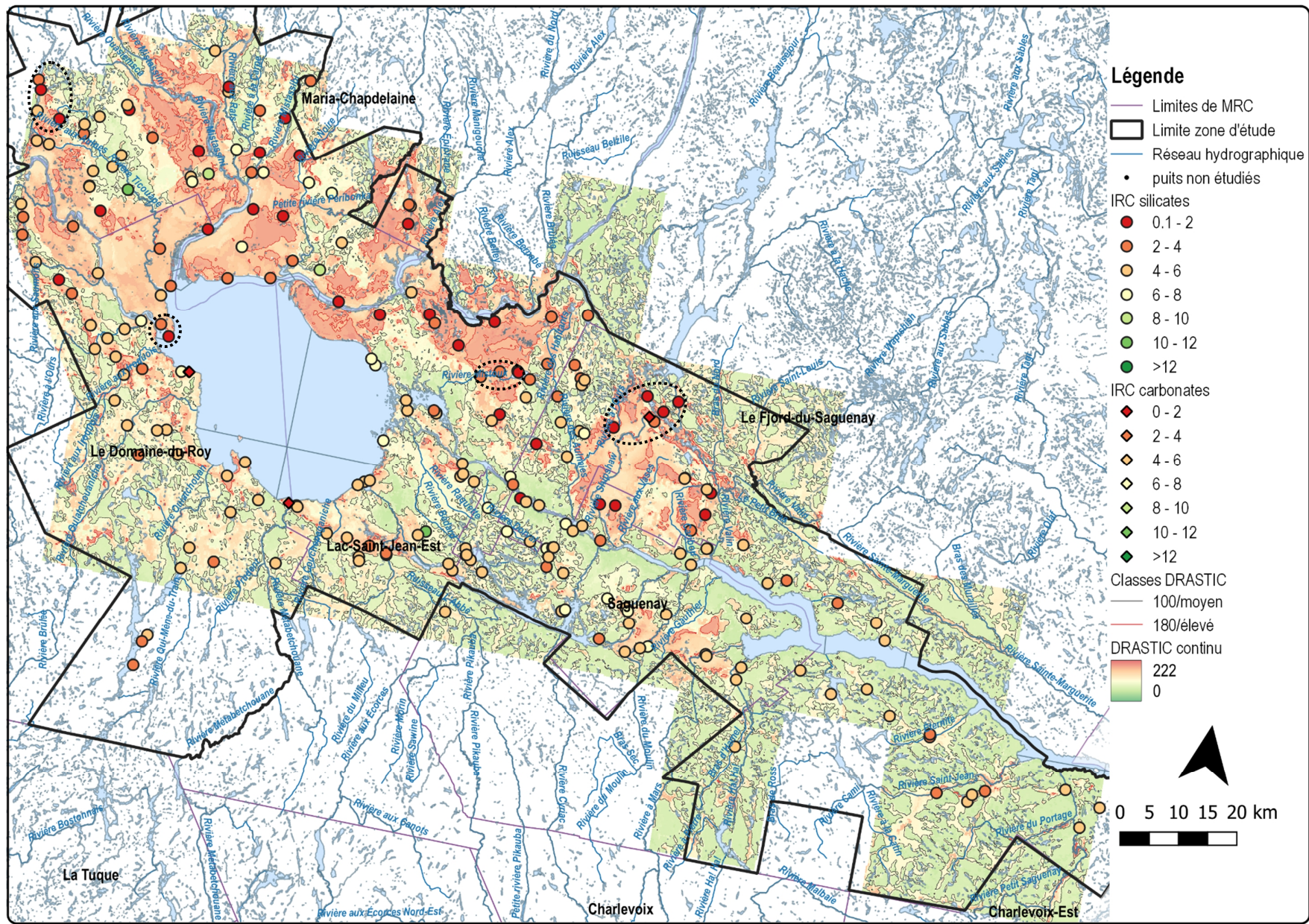


Figure 88 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES SLSJ

### 3.1.9 Charlevoix-Haute-Côte-Nord (PACES CHCN)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 105**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 105**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 101**

La région du PACES Charlevoix-Côte-Nord couvre un territoire d'environ 4 500 km<sup>2</sup>, situé sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent. Ce territoire majoritairement compris dans la Province géologique de Grenville, possède néanmoins en très faibles parts des roches de la Plate-forme du Saint-Laurent (au fond des vallées encaissées au bord du fleuve) et des roches de la Province des Appalaches (exclusivement la formation de l'Isle-aux-Coudres composée de flysch). Les roches grenvilliennes sur ce secteur sont toutes silicatées mais de lithologies variées : gneiss, migmatites, granites, quartzites, schistes, pegmatites. Les rares couches ordoviciennes de la Plate-forme du Saint-Laurent sont représentées ici par des successions de couches détritiques (grès, quartzites), de calcaires et de mudstones calcareux. Ces roches de socle sont recouvertes presque en totalité par des sédiments meubles quaternaires issus de la dernière ère glaciaire : les tills se retrouvent sur les hauteurs tandis que les sédiments fluvio-glaciaires se retrouvent au fond des vallées encaissées. Sur ce territoire en revanche, les dépôts meubles d'autres origines (marines, lacustres...) sont trop peu étendus pour avoir un rôle significatif sur les écoulements d'eau souterraine.

L'autre particularité de ce territoire, est la présence de vallées glaciaires très profondes, qui déconnectent les systèmes d'écoulement des eaux souterraines d'une rive à l'autre des rivières présentes. Sur ce secteur, il n'y a donc pas de nappe régionale au sens propre, mais plutôt une succession d'aquifères très locaux dont les bassins versants sont de petite taille (Figure 89).

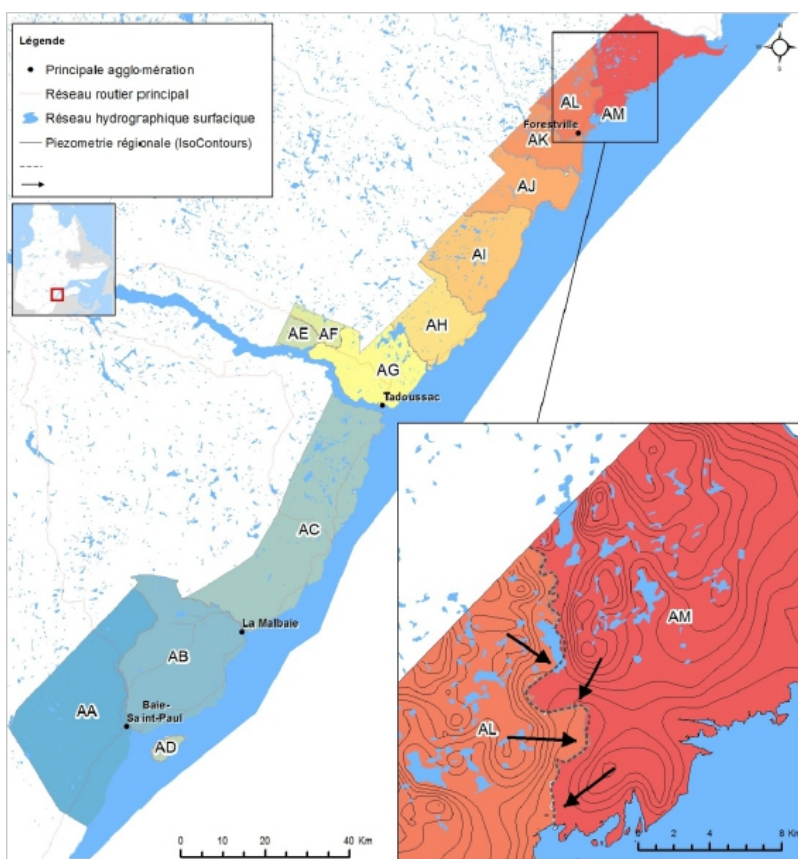


Figure 89: Délimitations des contextes hydrogéologiques du PACES Charlevoix-Haute-Côte-Nord (CERM-PACES, 2015)

Au sein de ces aquifères, les puits sélectionnés prélèvent presque autant dans les aquifères granulaires (44 %) que dans les aquifères au roc (56 %). Les conditions de captivité sont très peu renseignées (56 % des puits sont indéterminés), mais on a néanmoins 33 % des puits en condition de nappe libre et 10 % en condition de nappe captive. Du point de vue minéralogique, 70 % des puits sont en milieu silicaté, contre 3 % en milieu carbonaté. Les 27 % restant demeurent indéterminés. La majorité des puits échantillonnés se situe dans le secteur de Charlevoix où il y a la plus grande concentration d'activités humaines. La caractérisation des eaux sur le reste du territoire est moins fine car les puits sont moins fréquents (Figure 90).

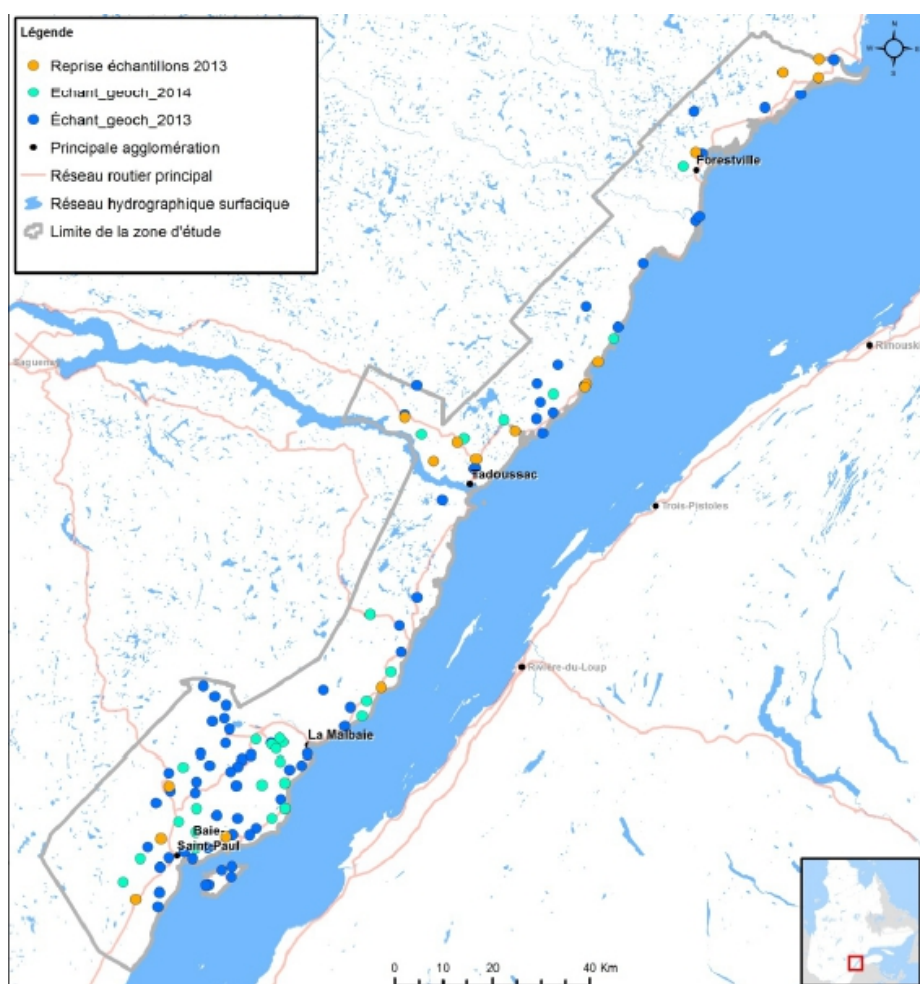


Figure 90 : Localisation des échantillons d'eau souterraine prélevés lors du PACES CHCN (CERM-PACES, 2015)

Les aquifères granulaires sont de faible extension et principalement silicatés. L'eau souterraine contenue y est sous-saturée vis-à-vis de la calcite, saturation qui tend à augmenter dans les secteurs captifs (Figure 91b). La présence de quelques niveaux carbonatés dans les aquifères au roc ou la prédominance de minéraux silicatés calciques se confirme par des  $IS_{calcite}$  plus élevés dans les eaux souterraines du roc libre, qui atteignent même la saturation dans les parties captives. Le faciès bicarbonaté-calcique domine dans la majorité des eaux de tous les contextes hydrogéologiques (Figure 91a). Les ressources en eau exploitées dans cette région semblent jeunes. Dans les aquifères libres le faciès chimique des eaux évolue pour les cations d'un pôle calcique à un pôle sodique. Les puits de minéralisation indéterminée dont les eaux présentent les  $IS_{calcite}$  les plus faibles, doivent certainement être en milieu dépourvu de carbonates et ont donc tous été traités comme des puits en milieu silicaté.

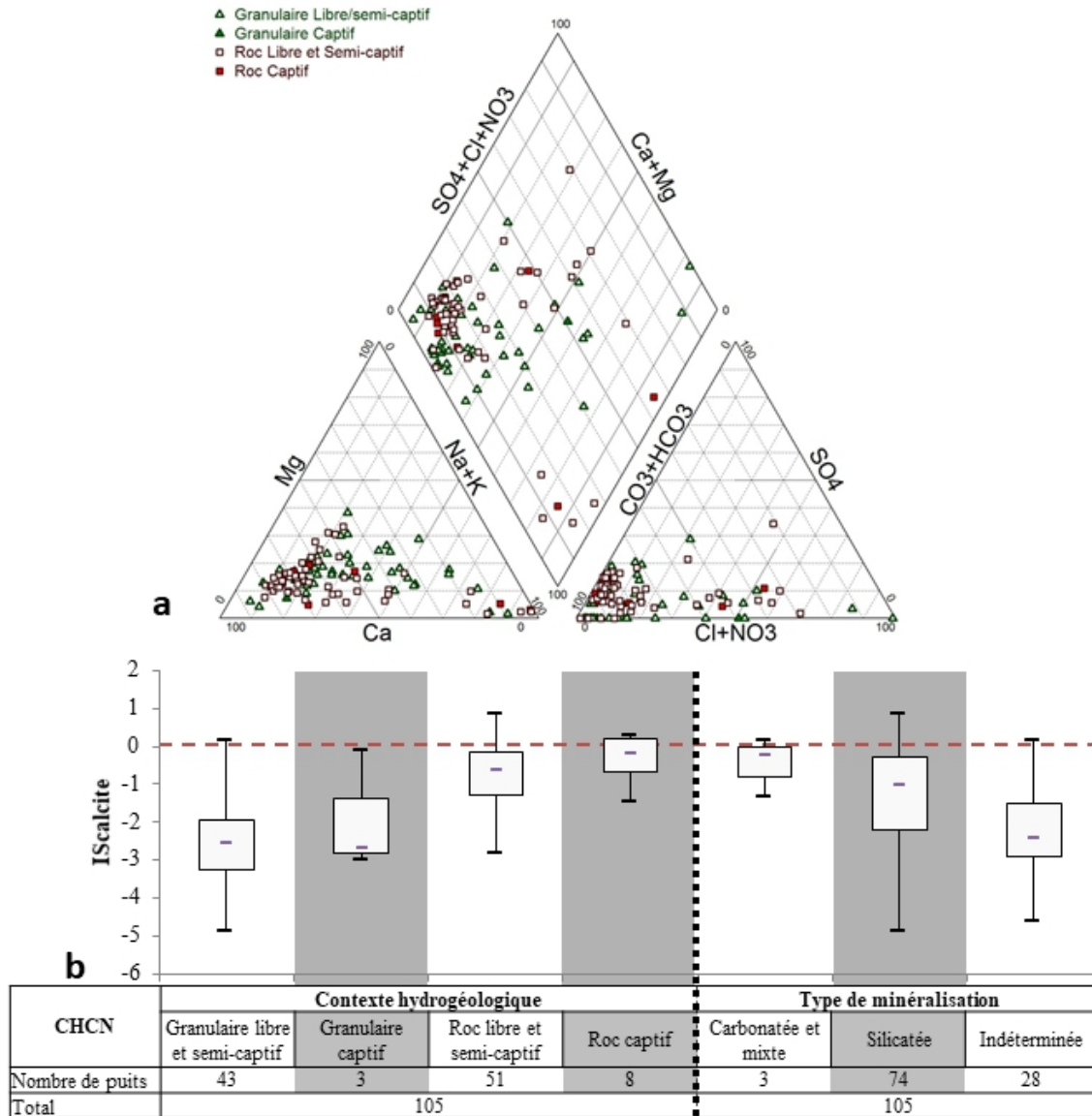


Figure 91 : Faciès géochimique des eaux de la région CHCN représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Les courts temps de séjours moyens des eaux en milieu souterrain sont soutenus par la concentration de la plupart des puits à l'origine de l'échelle d'indices du DEH, indépendamment de leur contexte hydrogéologique (Figure 92). Ces résultats coïncident avec la particularité de ce secteur caractérisé par des bassins versants de petite taille dont les ressources en eau souterraine superficielles sont de faible extension également. La représentation des  $IS_{calcite}$  en fonction des teneurs en silice dissoute et en alcalinité permet d'observer que les nappes prélevées dans les aquifères granulaires sont moins évoluées que celles résidant dans les aquifères au roc puisqu'elles sont beaucoup plus éloignées de la saturation vis-à-vis de la calcite (Figure 93). Dans les deux types d'aquifères, la minéralisation des eaux reste faible en comparaison des autres régions étudiées. Pourtant, les gammes de variations en silice et en alcalinité témoignent de l'occurrence significative des interactions eau – roche et plus précisément de l'altération des minéraux silicatés. La comparaison de ces représentations avec le DEH permet de déduire que les minéraux altérés sont principalement des minéraux silicatés riches en calcium ou magnésium tels que les feldspaths plagioclases.

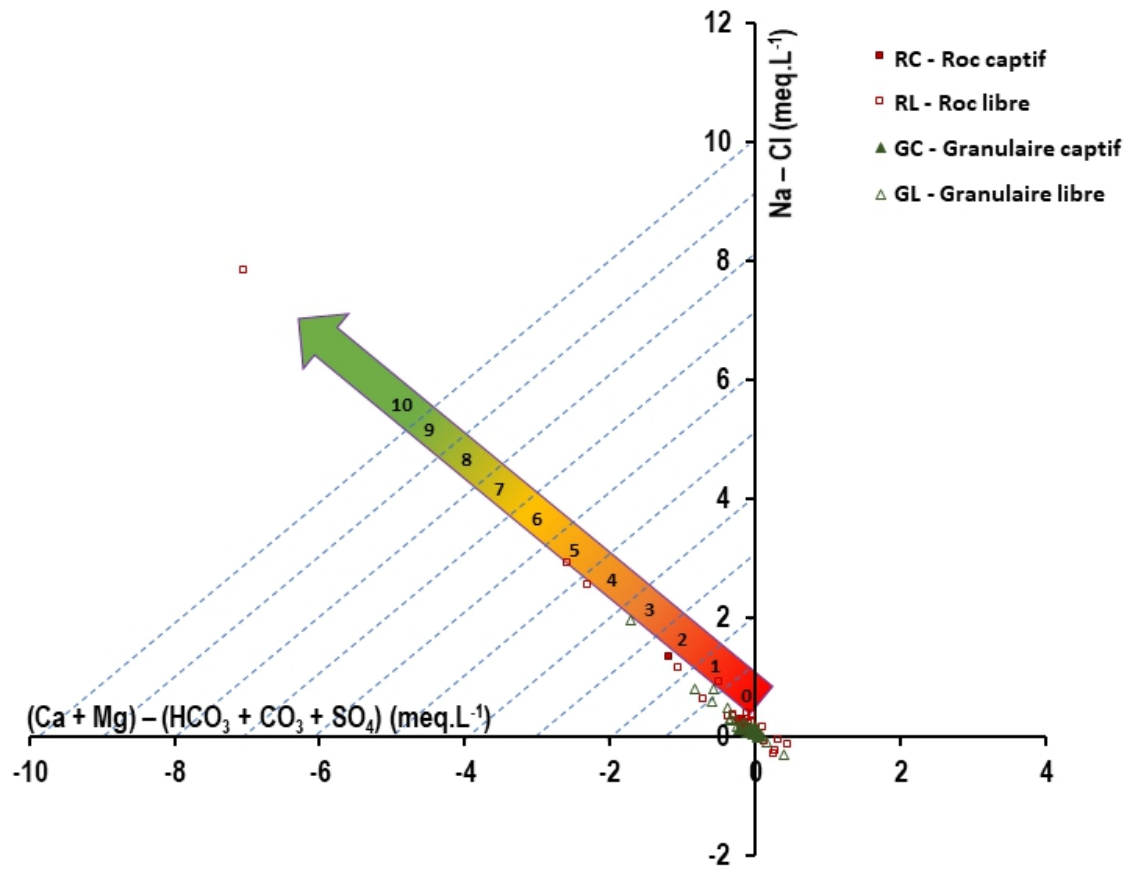


Figure 92 : Faciès chimique des puits du PACES CHCN représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

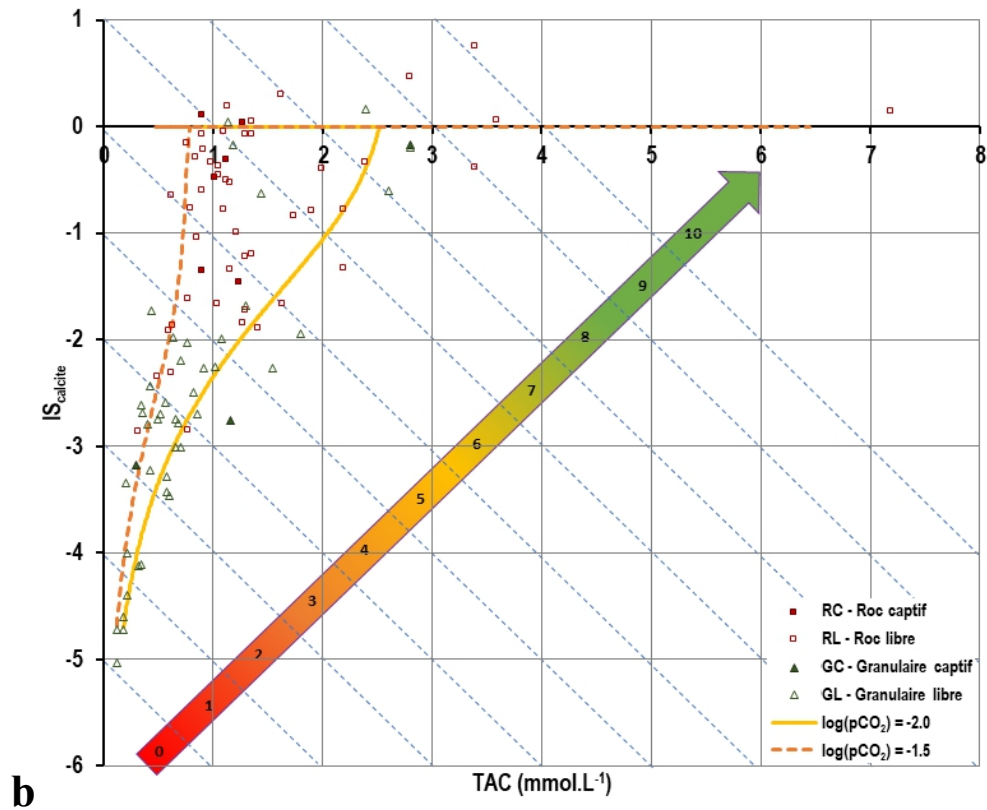
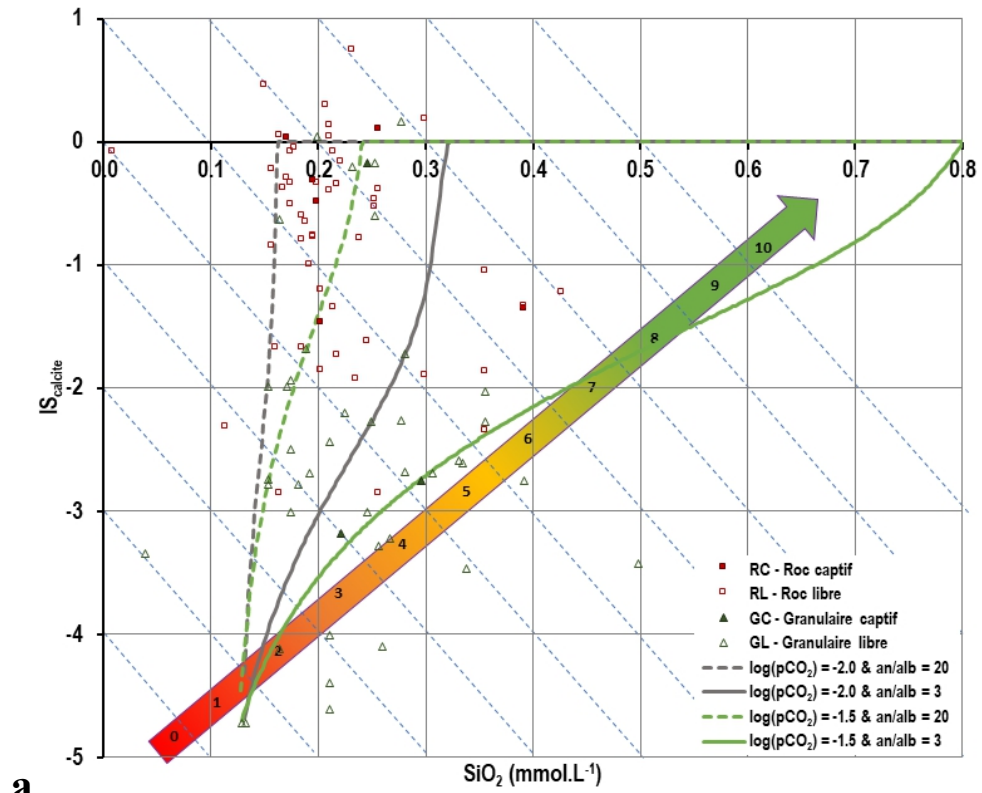


Figure 93 : Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CHCN (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

Dans une région comme Charlevoix-Haute-Côte-Nord, la sensibilité de l'IRC est indispensable pour décrire l'évolution de la résistance des eaux récentes. Les IRC varient de 0 à 6 pour les eaux des aquifères granulaires et de 2 à 11 pour les eaux des aquifères au roc (Figure 94). Les ressources les moins résistantes sont principalement situées dans des aquifères granulaires dont la faible épaisseur limite encore plus leur capacité d'endiguement des pollutions en comparaison des ressources des aquifères au roc dont l'épaisseur importante compense en partie la faible extension régionale des lignes d'écoulement interceptées dans les puits.

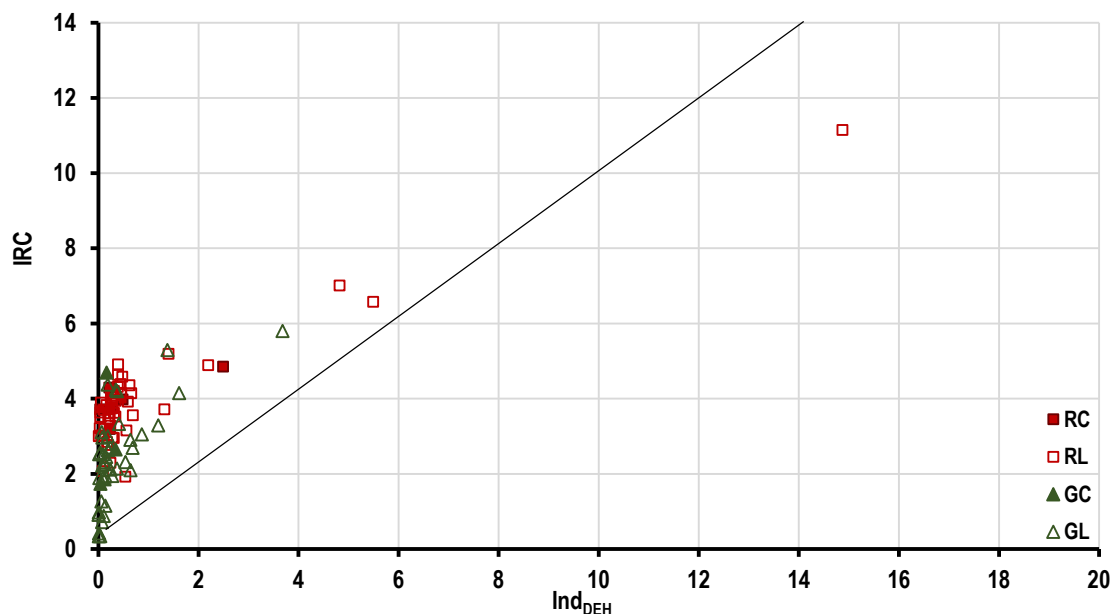


Figure 94 : Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode couplée (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La superposition de l'IRC sur la carte d'indice DRASTIC illustre une certaine concordance spatiale entre les indices (Figure 95). La plupart des ressources en eau prélevées dans cette région sont de résistance moyenne (points jaunes/oranges) ou faible (points rouges). Les puits concernés par les IRC les plus faibles se situent principalement dans les vallées où les indices DRASTIC sont très élevés, démontrant notamment une forte probabilité de transfert vertical des polluants depuis la surface jusque dans la nappe. Dans les autres secteurs où la méthode DRASTIC caractérise les ressources avec une vulnérabilité moyenne, l'IRC reste faible (i.e. secteurs entourés en pointillés noirs), appuyant le fait que les dimensions trop faibles des aquifères de cette région rendent les ressources très peu résistantes face aux pollutions anthropiques. Les deux approches décrivent une forte vulnérabilité globale des masses d'eau dans cette région.



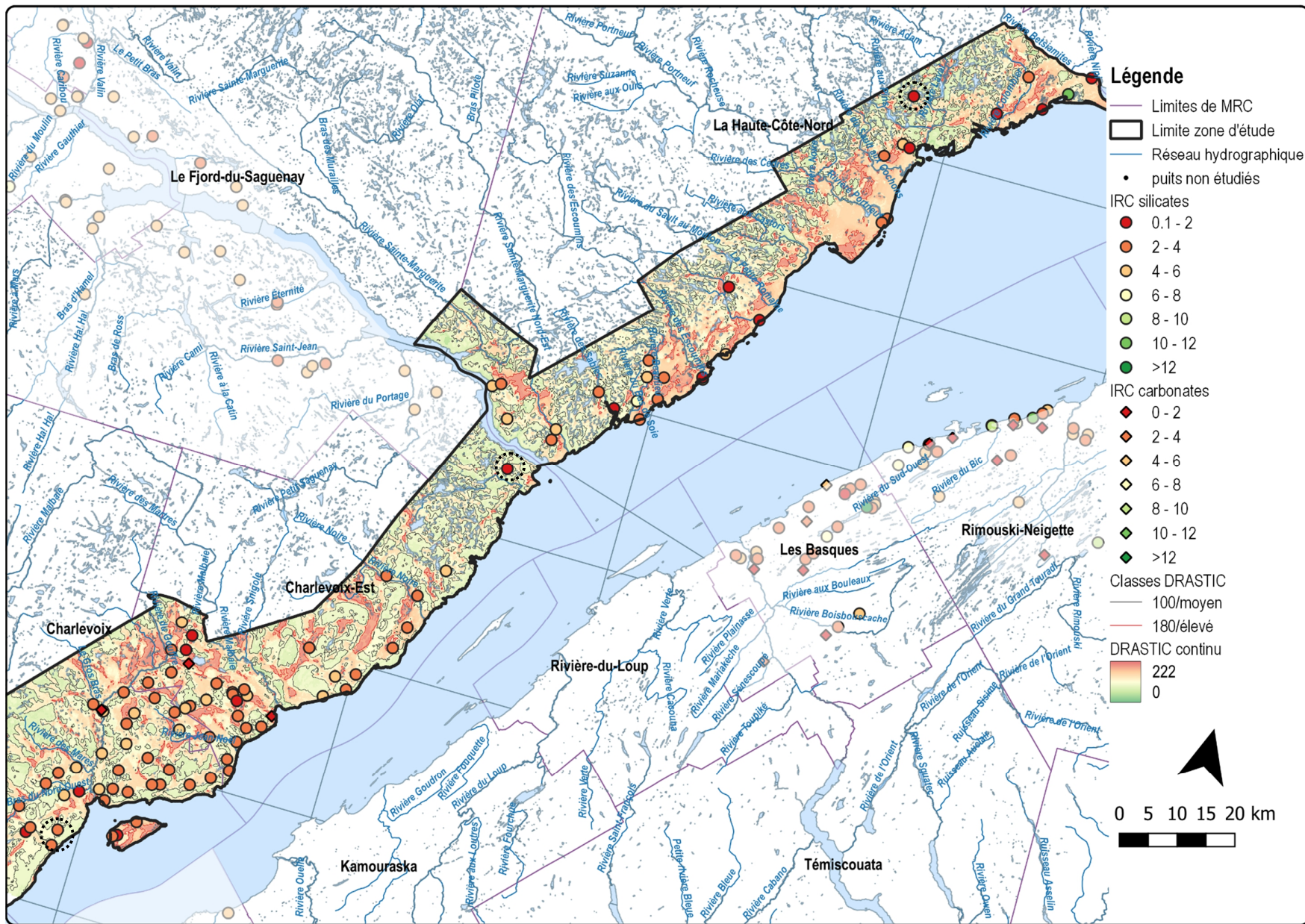


Figure 95 : Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES CHCN

## 3.2 Régions situées au Sud du fleuve Saint-Laurent

Au sud du fleuve, les 6 régions étudiées s'étendent de la Plate-forme du Saint-Laurent au sud-ouest vers les Appalaches au nord-est. Il s'agit des régions de Châteauguay, Montérégie Est, Nicolet-Saint-François, Bécancour, Chaudières Appalaches et Nord-Est du Bas-Saint-Laurent. Les résultats de ces six régions sont présentés ci-après, d'ouest en est.

### 3.2.1 Châteauguay (PRE-PACES CH)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 144**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 130**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 103**

Le secteur de Châteauguay a été étudié au début des années 2000, avant le développement des PACES. Toutes les informations recueillies proviennent du rapport de maîtrise de Daniel Blanchette réalisé en 2006. Situé en rive sud du fleuve Saint-Laurent, ce projet couvre un territoire d'environ 1400 km<sup>2</sup> et correspond à la partie canadienne du bassin versant de la rivière Châteauguay. Le socle rocheux du bassin versant est intégralement situé dans la Province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent et comprend des roches carbonatées (calcaires et dolomies) et silicatées (grès et shales) cambriennes à ordoviciennes. Des dépôts meubles quaternaires issus de l'invasion de la mer de Champlain (argiles) et de la dernière glaciation (tills) recouvrent en discordance le socle rocheux. Ces sédiments fins peuvent atteindre jusqu'à 50 m d'épaisseur. Dans ces conditions les aquifères granulaires sont très peu répandus sur le territoire. Les aquifères au roc quant à eux sont d'extension régionale et les écoulements souterrains se font principalement dans les réseaux de fractures, depuis les Hautes-Terres où la recharge se fait directement sur les affleurements, vers les Basses-Terres où le roc est captif sous plusieurs dizaines de mètres de sédiments fins. Les interactions entre aquifères granulaires et rocheux sont presque inexistantes sur ce bassin versant.

À l'image de ce contexte, les puits échantillonnés prélèvent dans 88 % des cas dans les aquifères au roc (Figure 96). 8 % prélèvent dans des unités mixtes, et seulement 4 % prélèvent dans des aquifères granulaires. La grande majorité des puits ne possèdent pas de caractérisation des conditions de confinement (57 % d'indéterminés). Pour le reste, 15 % prélèvent dans une nappe libre et 28 % dans une nappe captive. Côté minéralogie, il y a autant de puits ouverts dans les aquifères carbonatés que silicatés (26 % chaque), tandis que 54 % sont ouverts dans des aquifères mixtes.

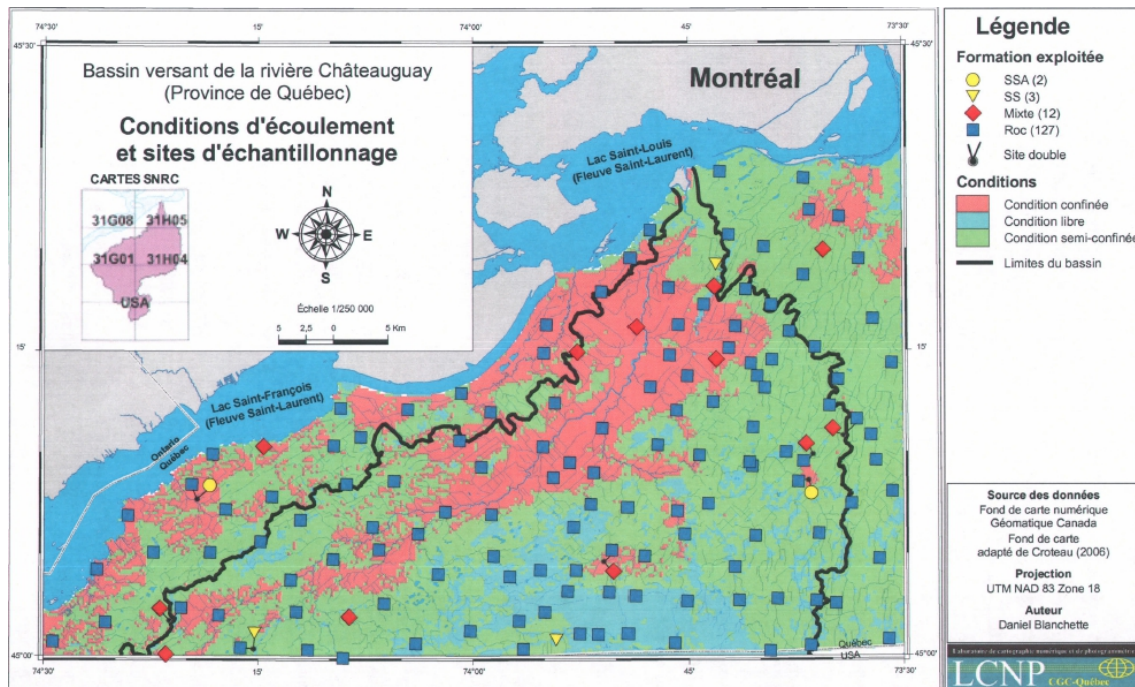


Figure 96: Localisation des puits échantillonnés en fonction du type d'aquifère prélevé et des conditions de captivité rencontrées (Blanchette, 2006)

Sur ce secteur d'étude, la présence des minéraux carbonatés s'illustre par une saturation de presque toutes les eaux souterraines vis-à-vis de la calcite, quel que soit le contexte hydrogéologique concerné (Figure 97b). La dissolution des carbonates paraît donc être un processus dominant dans ce secteur, depuis les aires de recharge, jusqu'aux zones saturées des aquifères rocheux captifs. Le faciès chimique dominant des eaux souterraines en aquifère libre est bicarbonaté-calcique et magnésien (Figure 97a). Dans le roc captif, un enrichissement en sodium et potassium au détriment du calcium et magnésium se produit graduellement, une évolution typique de l'échange cationique avec les argiles marines de la mer de Champlain présentes dans les Basses-Terres.

Ce changement de faciès associé aux échanges cationiques est mis en évidence sur le DEH où les points se répartissent sur l'ensemble du graphique le long de la ligne théorique d'évolution de la minéralisation des eaux (Figure 98). Une partie des points représentant les eaux des aquifères libres (granulaires ou rocheux) sont situés à l'origine de l'échelle d'indice du DEH. Pour les eaux évoluant en milieu carbonaté, cette position reflète la prédominance de la dissolution des carbonates. Pour les eaux évoluant en milieu silicaté, il s'agit de la dominance de la recharge où l'altération des feldspaths calciques domine.

Les milieux silicatés sont minoritaires mais l'évolution de la minéralisation des eaux de ces milieux suit les courbes théoriques d'altération des feldspaths modélisées à partir des quelques puits présentant une dominance de la recharge, ce qui permet de valider la pertinence de la méthode de calcul des indices de résistance sur ce secteur également (Figure 99).

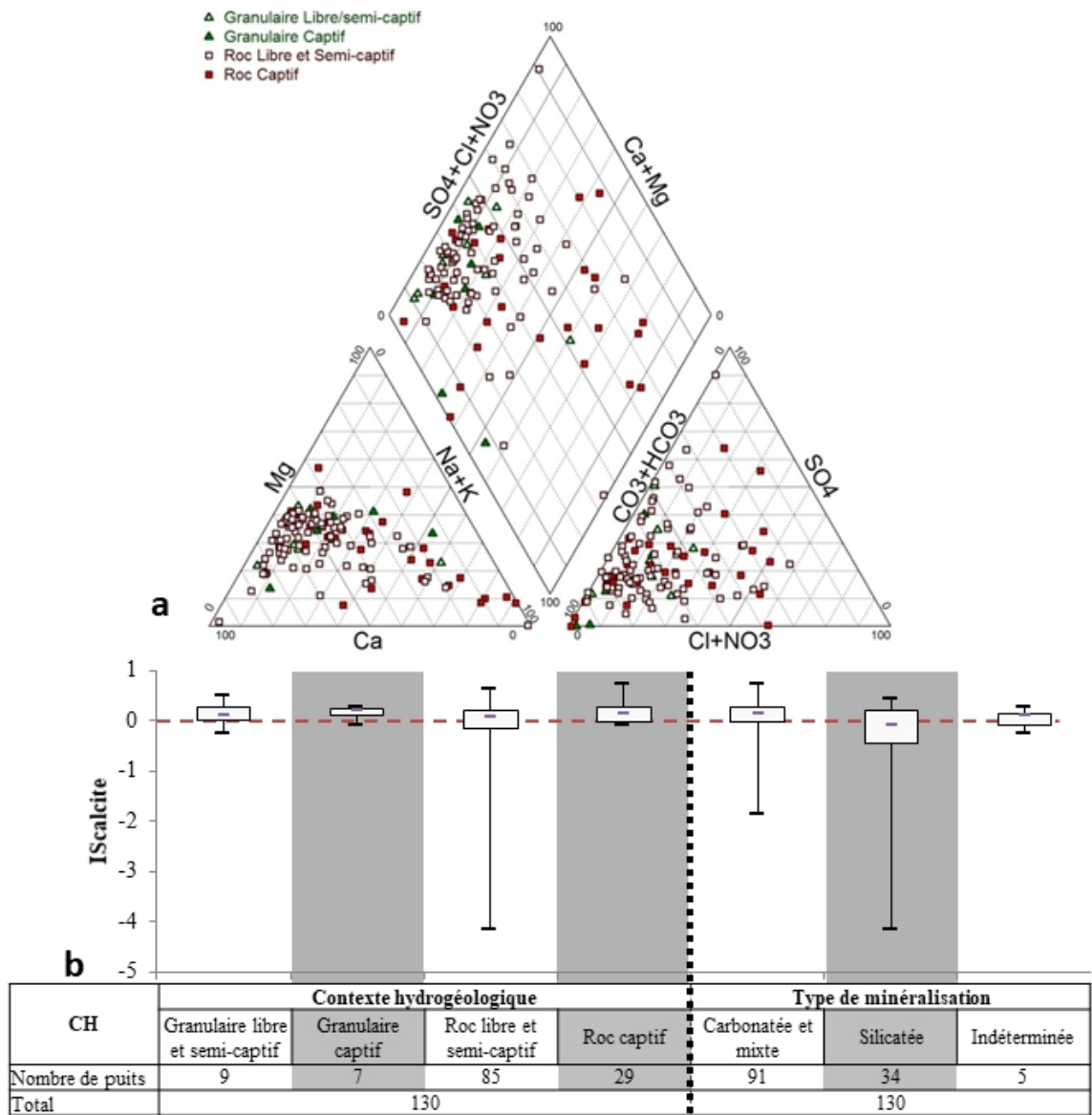


Figure 97: Faciès géochimique des eaux de la région CH représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

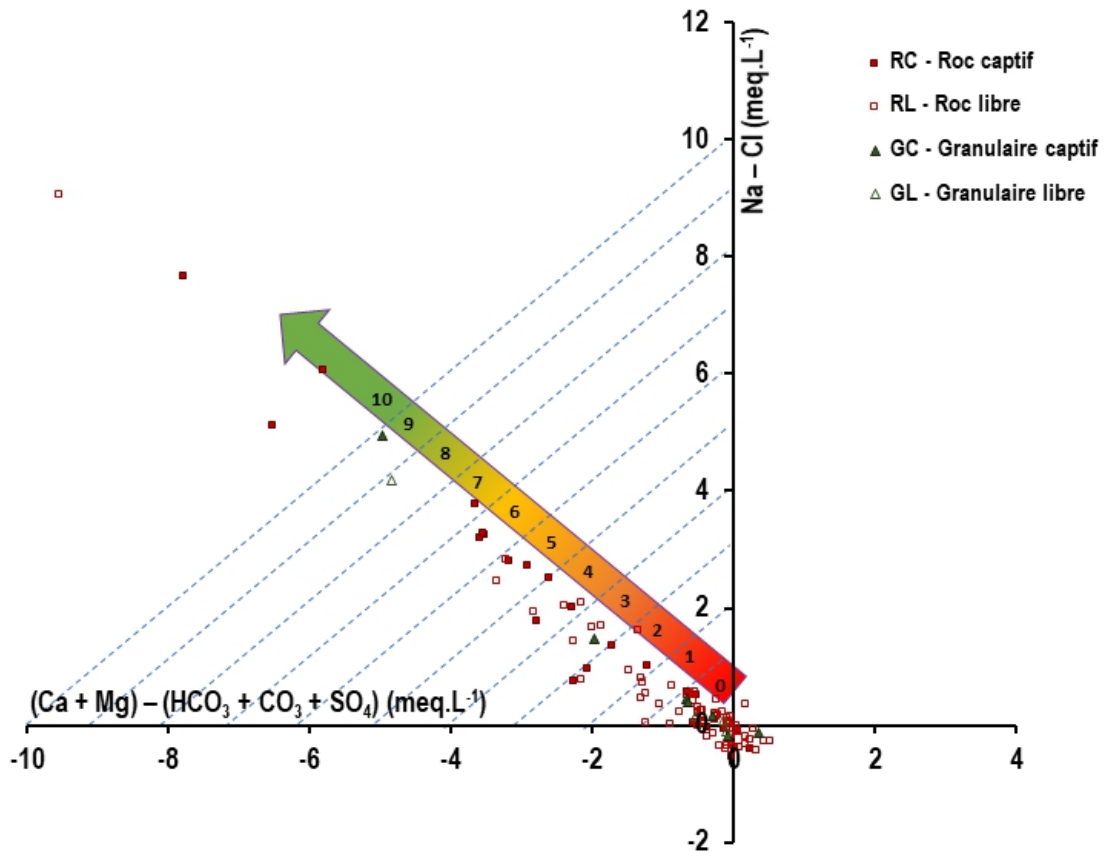


Figure 98: Faciès chimique des puits du Pré-PACES CH représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

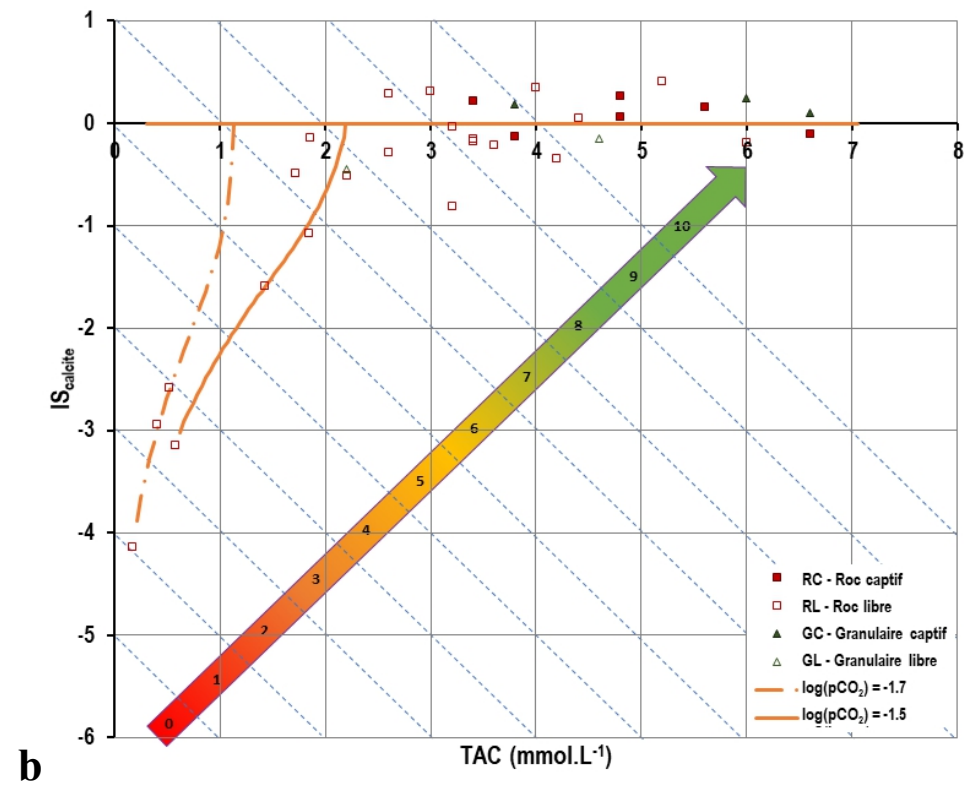
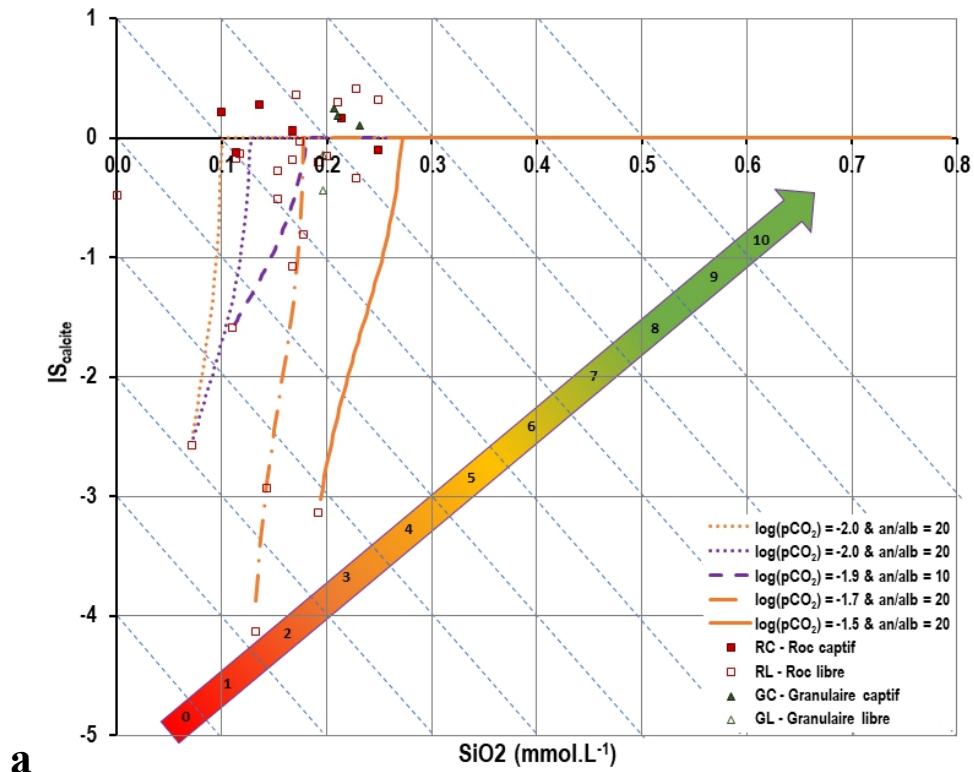


Figure 99: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région Pré-PACES CH (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

Les IRC évoluent de 1 à 10 pour les milieux silicatés et de 0 à 18 pour les milieux carbonatés (Figure 100). La majorité des indices est inférieure à 6, preuve des ressources faiblement résistantes. La particularité de ce secteur est que les ressources des aquifères granulaires ne sont pas moins résistantes que la plupart des ressources des aquifères au roc. Ce résultat appuie l'hypothèse que dans cette région, les aquifères granulaires peuvent contenir des eaux provenant des Hautes-Terres et ayant transité un certain temps avant d'atteindre les sédiments granulaires. La résistance de ces eaux fait référence à l'ensemble du système traversé et non uniquement au contexte granulaire local.

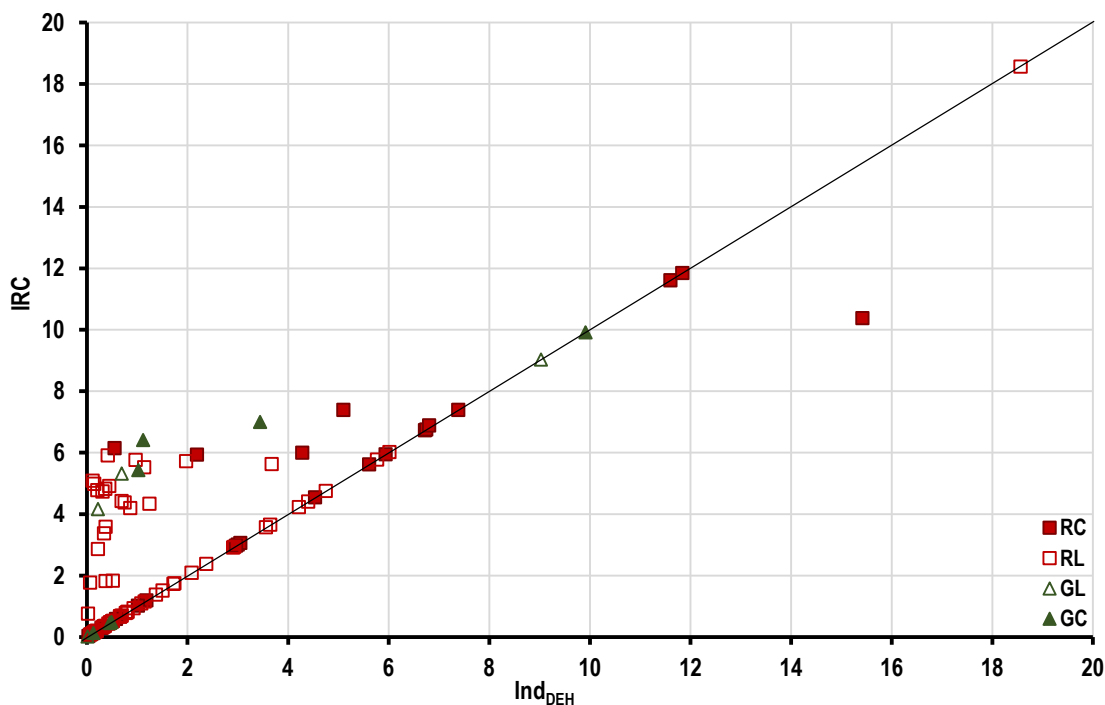


Figure 100: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH} = IRC_{carbonates}$ )

La répartition spatiale des indices de résistance est cohérente avec la carte d'indices DRASTIC établie pour ce secteur (Figure 101). Sur les Hautes-Terres du sud de la région, les puits sont principalement situés sur les alignements les plus vulnérables et interceptent des lignes d'écoulement superficielles possédant des résistances très faibles (points et losanges rouges). En descendant vers les vallées au nord, les aquifères sont de moins en moins vulnérables (DRASTIC) et les ressources de plus en plus résistantes, illustrant ainsi le parcours progressif d'une même ligne d'écoulement depuis sa source jusqu'aux secteurs les plus en aval de l'aquifère régional. Pour les aquifères carbonatés, les ressources en eau suivent aussi cette dynamique depuis les Hautes-Terres peu résistantes jusqu'au fleuve où les résistances sont maximales. Néanmoins, dans les Basses-Terres, dans le secteur de la MRC Beauharnois-Salaberry, plusieurs puits présentent des eaux aux résistances très faibles tandis que les indices DRASTIC font apparaître une faible vulnérabilité au droit de ces puits (secteurs entourés en pointillés noirs). Mais en considérant les secteurs alentour, ces puits sont toujours situés à proximité de secteurs jugés plus vulnérables par DRASTIC, ce qui soutient l'hypothèse de l'interception par les puits de lignes d'écoulement plus superficielles dominées par de la recharge récente. Dans la MRC du Haut-Saint-Laurent, plusieurs puits situés le long de la rivière Châteauguay présentent une résistance minimale (losanges rouges) à l'inverse de l'indice DRASTIC, illustrant potentiellement un impact fort des eaux de surface sur la ressource prélevée.

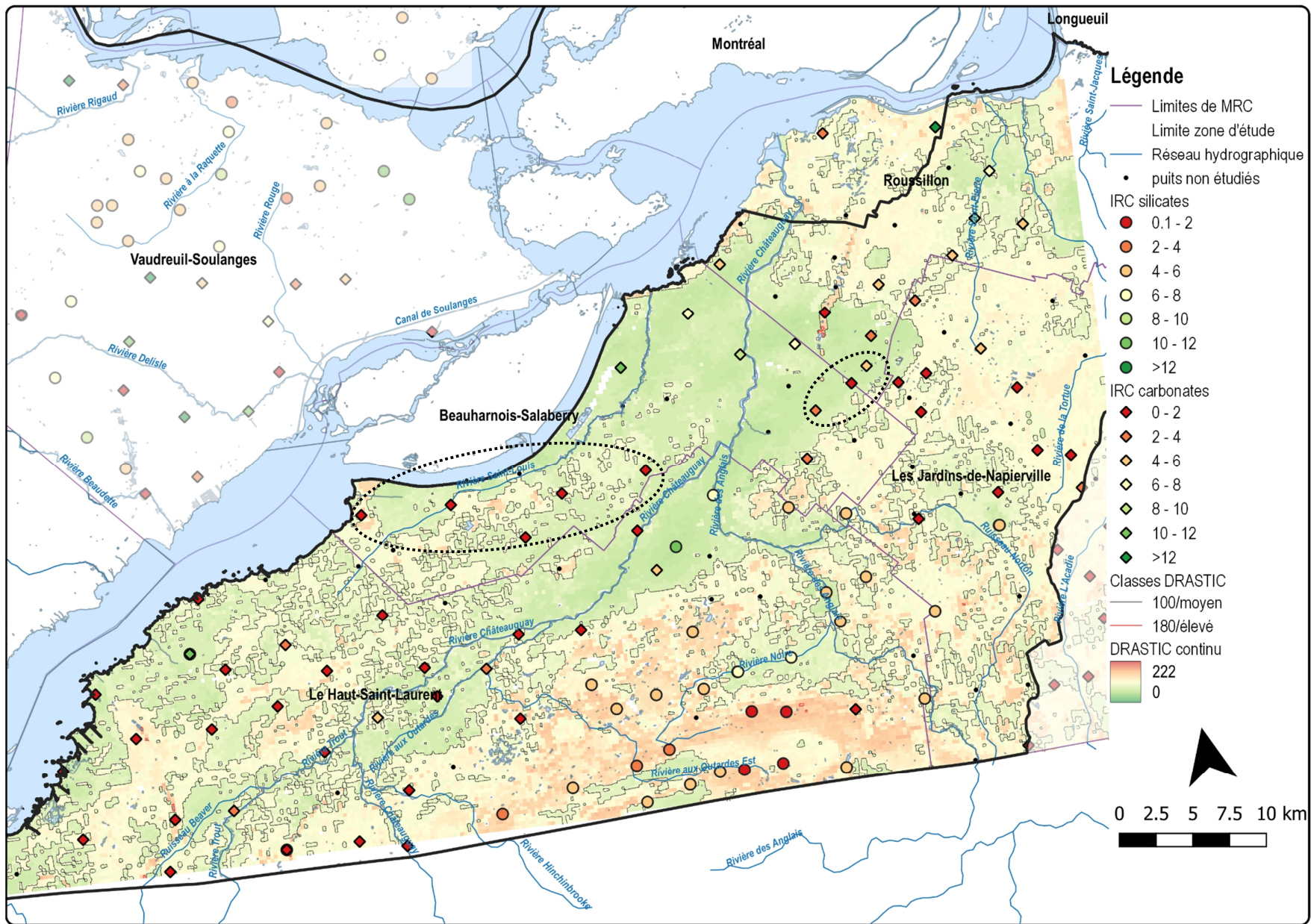


Figure 101: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - Pré-PACES CH



### 3.2.2 Montérégie-Est (ME)

**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 242**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 208**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 174**

Le PACES de la Montérégie s'étend sur un territoire de 9 032 km<sup>2</sup> au sud du fleuve Saint-Laurent, compris entre le bassin versant de la rivière Châteauguay au sud-ouest et le PACES Nicolet-Saint-François au nord-est. La région s'étend sur les provinces de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches. La Plate-forme du Saint-Laurent est constituée de roches sédimentaires majoritairement calcaires peu déformées tandis que les Appalaches sont constituées de roches sédimentaires qui ont été métamorphosées lors de l'orogénèse de la chaîne de montagnes. Ces provinces sont séparées par la faille de Logan, avec en surplomb la présence de collines montérégiennes issues d'intrusions de roches ignées d'âge Crétacé. Ces collines mises à jour grâce aux phases d'érosion des roches qui les entouraient sont composées de roches alcalines de type gabbro et syénites. Les formations superficielles recouvrant le socle rocheux sont constituées principalement de sédiments glaciaires dans les Appalaches et de sédiments marins dans les Basses-Terres de la Plate-forme du Saint-Laurent.

Les collines montérégiennes comme les Hautes-Terres appalachiennes constituent des zones de recharge préférentielles pour les aquifères rocheux régionaux qui sont tous en interaction entre eux (Figure 102). Les aquifères granulaires de faible extension se retrouvent généralement isolés les uns des autres, mais conservent une interaction avec les aquifères au roc qui les entourent.

Dans cette région, 86 % des puits puisent de l'eau dans les aquifères rocheux (Figure 103). Dans la base de données 61 % ne sont pas renseignés sur leur condition de confinement, mais 11 % sont associés à une nappe libre, 3 % à une nappe semi-captive et 25 % à une nappe captive. Au niveau minéralogique, 45 % des puits prélèvent dans des milieux mixtes de roches carbonatées et silicatées, 42 % puisent dans les milieux silicatés, 5 % dans des milieux carbonatés et 8 % dans des milieux indéterminés.

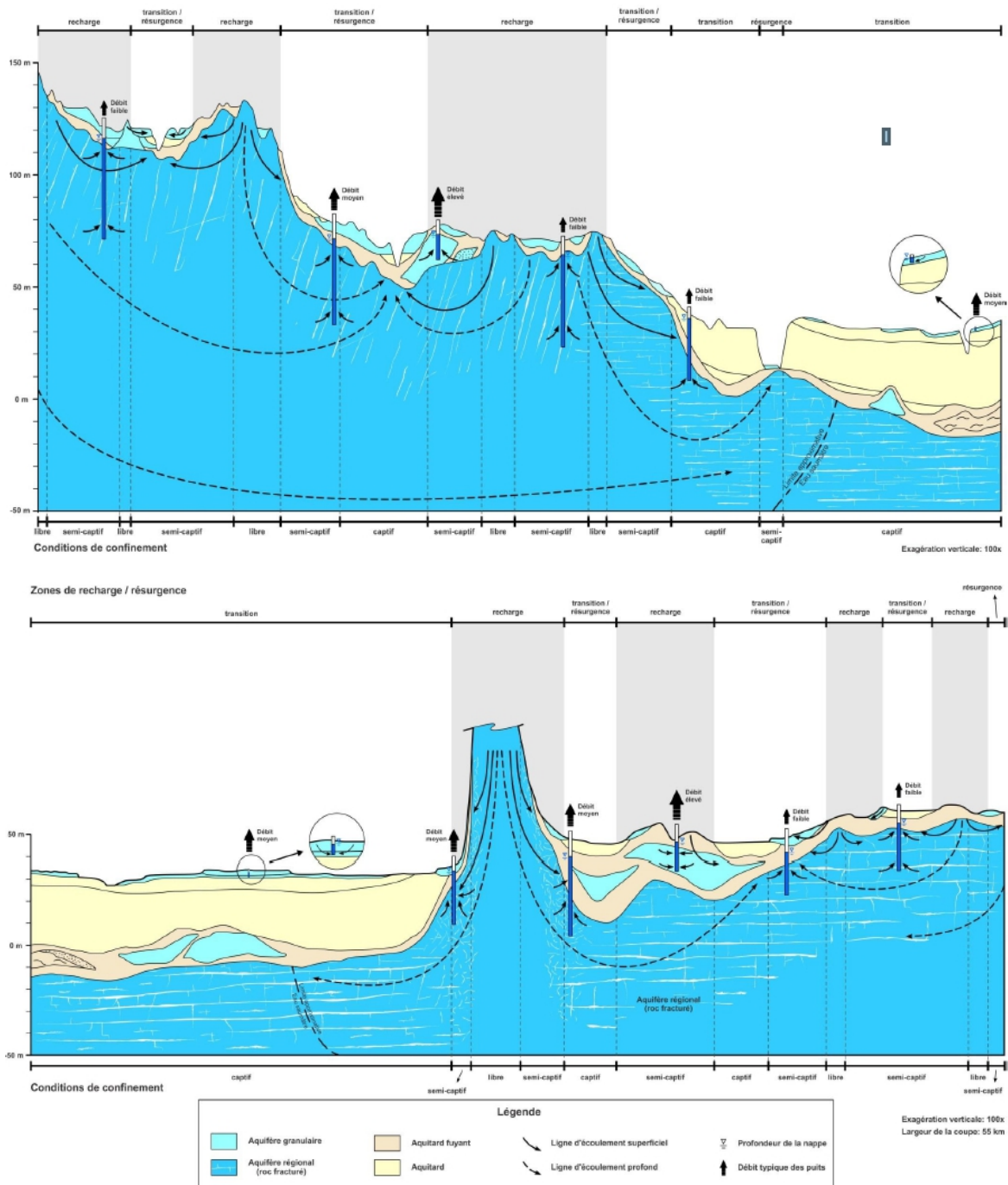


Figure 102: Coupes de synthèse des contextes hydrogéologiques présents sur le territoire du PACES de la Montérégie (Carrier *et al.*, 2013)

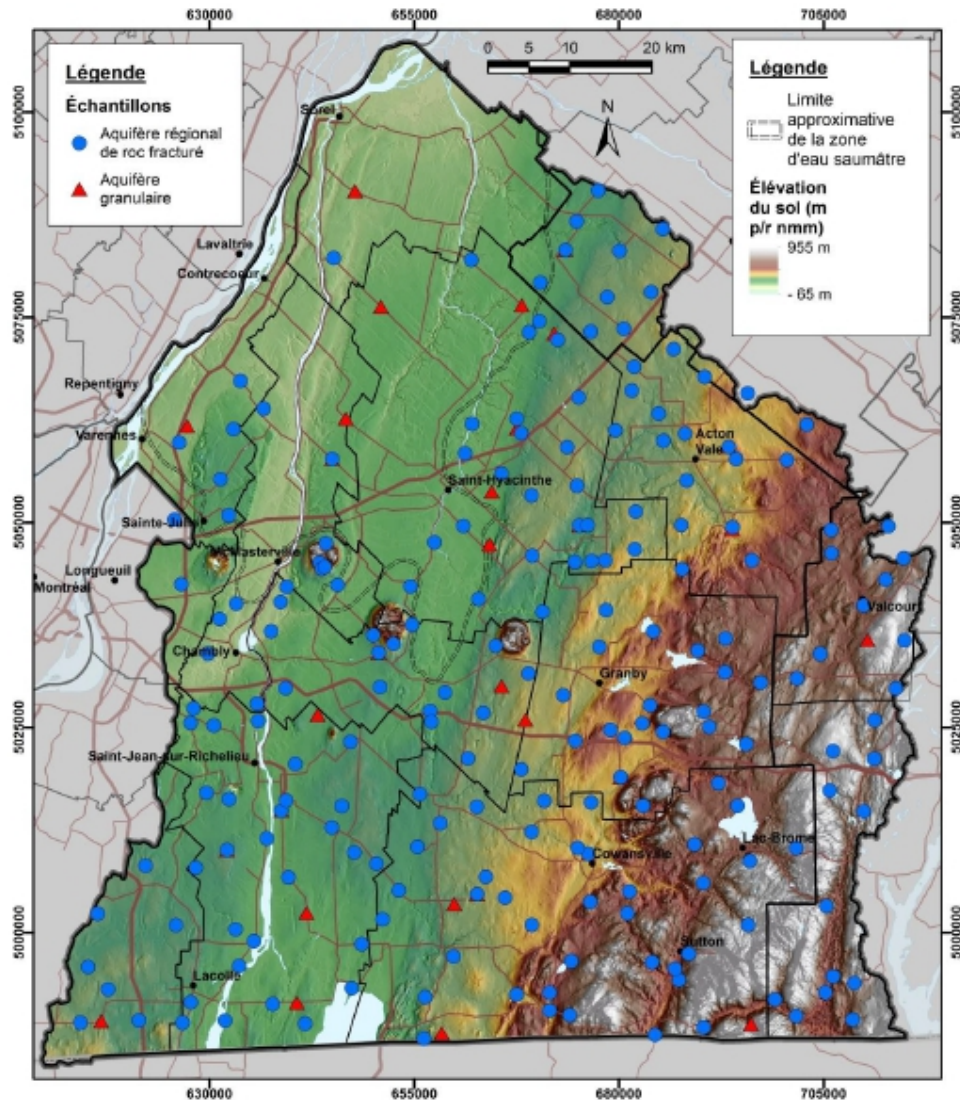


Figure 103: Carte de répartition des puits échantillonnés en fonction du type d'aquifère prélevé (Carrier *et al.*, 2013)

L'omniprésence de roches carbonatées dans les aquifères rocheux de cette région ne fait aucun doute au vu des valeurs élevées d'indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite (Figure 104b). Les eaux des parties captives des aquifères rocheux et granulaires sont légèrement plus saturées que celles des parties libres, illustrant la progression du processus de dissolution des carbonates depuis les aires de recharge vers les secteurs plus profonds. La dolomite semble significativement présente dans ces carbonates puisque le faciès dominant est bicarbonaté-calcique et magnésien (Figure 104a). Bien que ce processus paraisse dominer la chimie des eaux souterraines, l'évolution du faciès dominant bicarbonaté-calcique et magnésien vers un faciès bicarbonaté-sodique tend à démontrer une présence significative des processus d'échanges cationiques et d'altération de minéraux silicatés sodiques le long des lignes d'écoulement. Enfin, quelques puits dans le roc captif dont les minéralisations totales sont très importantes ( $TDS > 6000 \text{ mg.L}^{-1}$ ) présentent un faciès chloruré-sodique, ce qui laisse à penser à un mélange avec des eaux marines piégées dans les sédiments marins de la mer de Champlain. Ces puits n'ont cependant pas été traités dans le calcul des indices de résistance.

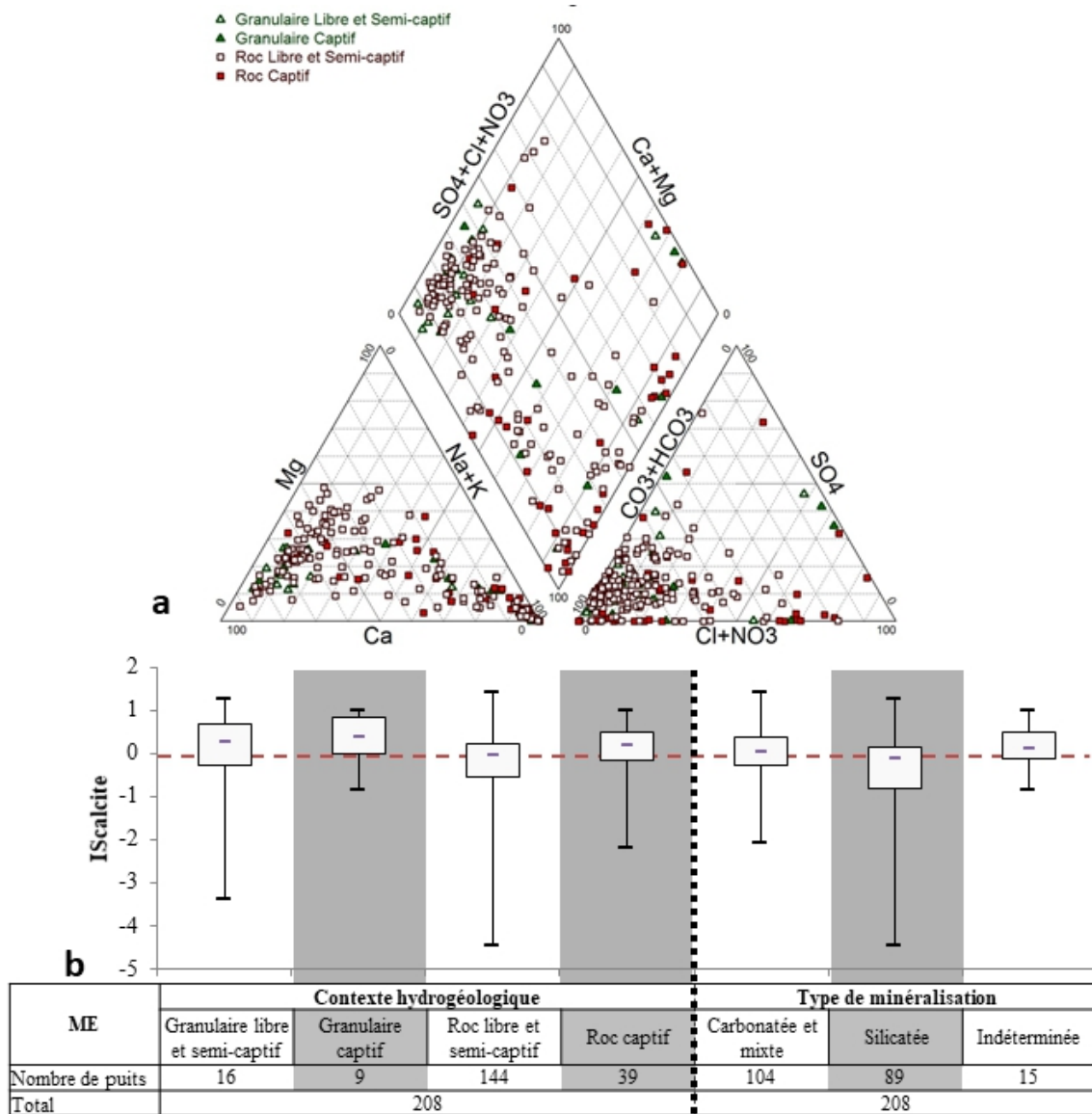


Figure 104: Faciès géochimique des eaux de la région ME représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

La Montérégie est la région PACES où l'évolution des faciès chimiques des eaux souterraines est la plus étendue. Sur le DEH, les points se répartissent depuis l'origine du graphique équivalant à une résistance nulle typique des ressources constituées d'eaux de recharge, jusqu'à des valeurs d'échelle d'indice dépassant les 20 (Figure 105). Les points les plus évolués correspondent à des eaux transitant dans des aquifères au roc carbo-silicatés, ou dans de rares cas (2 puits) dans des aquifères au roc silicatés contenant des évaporites. Les points des eaux séjournant dans les aquifères granulaires sont majoritairement regroupées près de l'origine du DEH, en accord avec leur faciès bicarbonaté-calcique.

Pour les milieux silicatés, la mise en relation des  $IS_{calcite}$  avec les teneurs en silice et en alcalinité permet de caractériser plus précisément les stades de minéralisation des eaux associées à l'altération des minéraux silicatés (Figure 106). Dans le cas des aquifères rocheux, ces représentations sont satisfaisantes, car les courbes théoriques illustrant l'altération des minéraux dans différents contextes de minéralisation encadrent bien les eaux du secteur. Dans le cas des aquifères granulaires, les points se trouvent à des stades plus évolués ( $IS_{calcite} \geq 0$ ) pouvant résulter (i) soit de la présence de carbonates

secondaires en quantité suffisamment importante pour minéraliser les eaux, (ii) soit à une alimentation de ces aquifères par des flux régionaux provenant du socle rocheux. Cela se traduit également par des indices de résistance plus élevés pour les nappes des aquifères granulaires que pour la plupart des ressources présentes dans les aquifères rocheux silicatés (Figure 107). Les IRC s'étendent de 1 à 15 pour les eaux des aquifères silicatés. Dans le cas des ressources transitant dans les aquifères mixtes et carbonatés, les indices s'étendent de 0 à 25, illustrant l'évolution progressive de la chimie des eaux le long des lignes d'écoulement régionales.

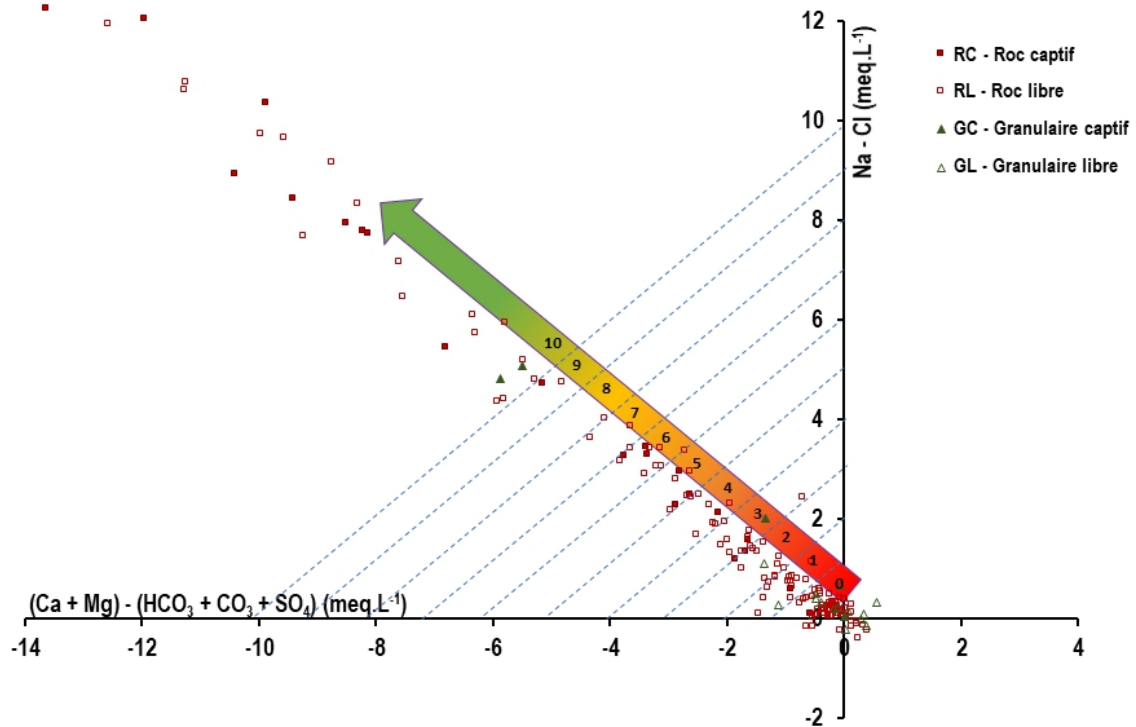


Figure 105: Faciès chimique des puits du PACES ME représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

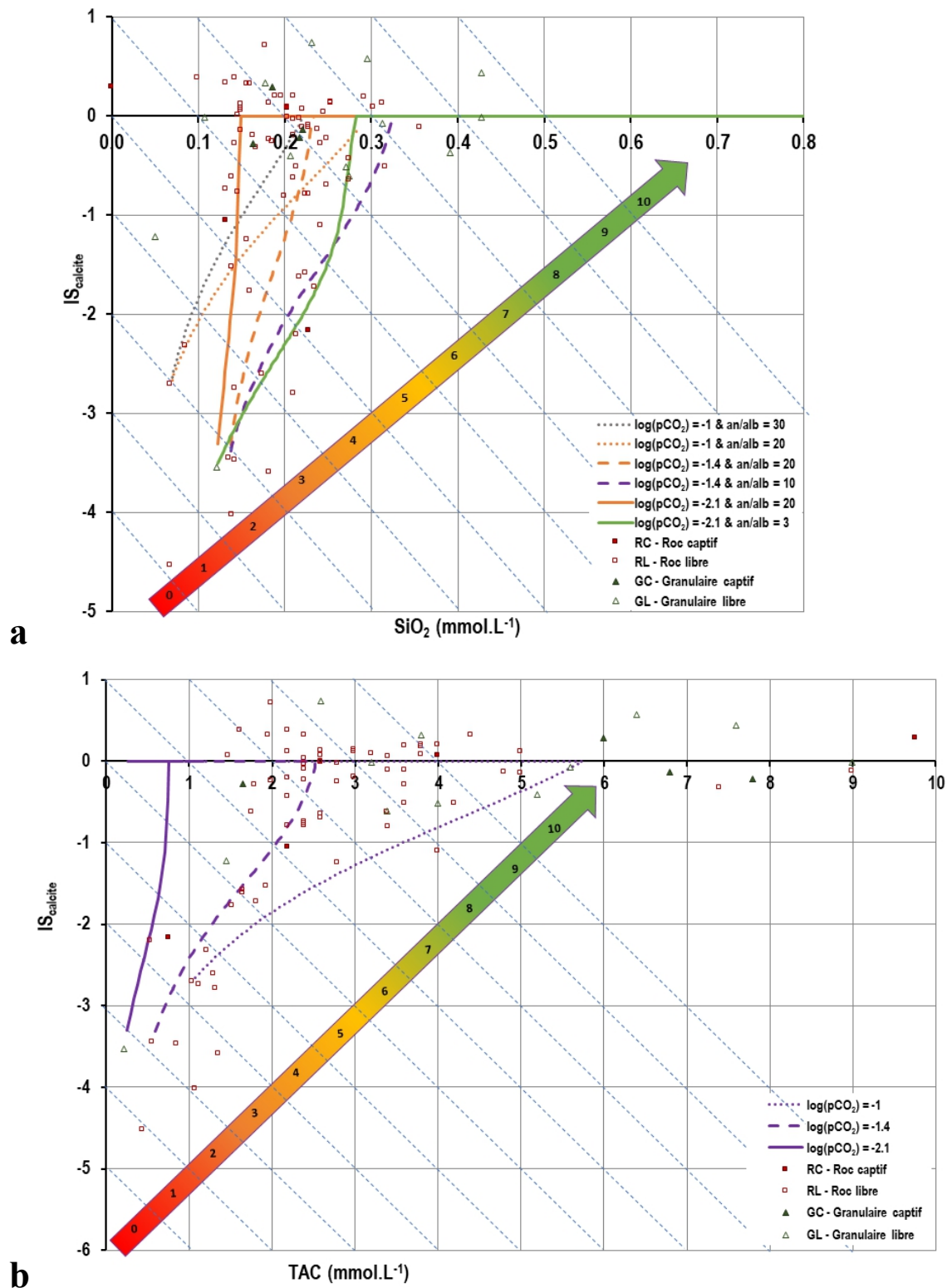


Figure 106: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES ME (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

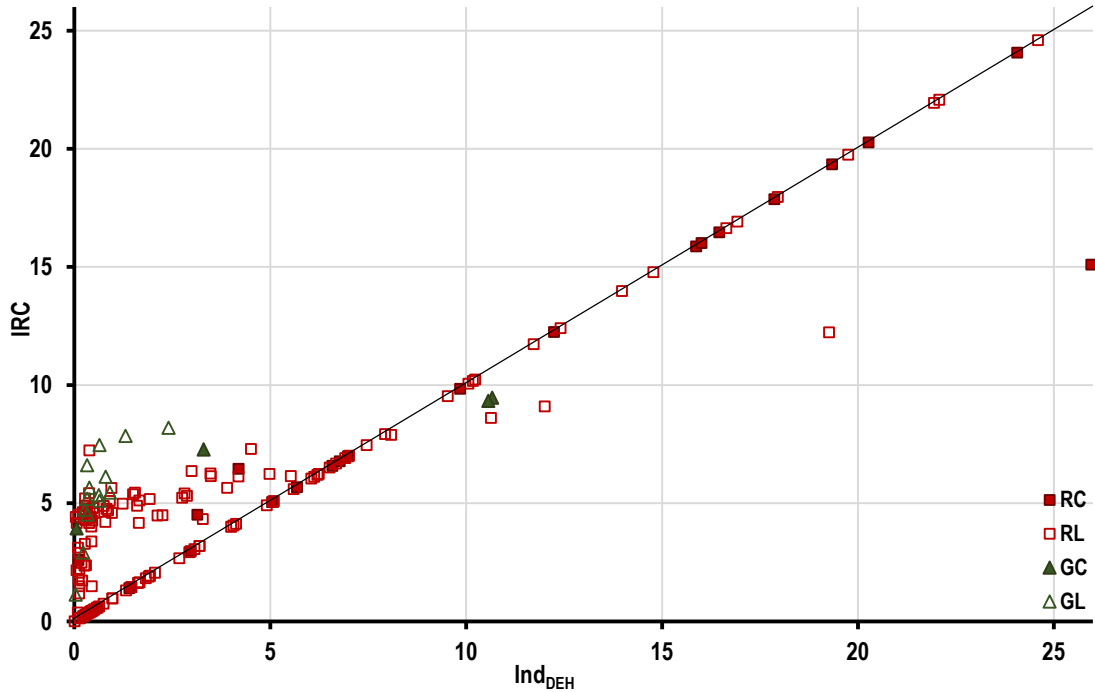


Figure 107: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La représentation cartographique des IRC avec les indices DRASTIC permet d'observer une augmentation de la résistance du sud vers le nord, c'est-à-dire depuis les Hautes-Terres appalachiennes vers les Basses-Terres de la Plate-forme du Saint-Laurent (Figure 108). Cette évolution concorde avec la direction générale des lignes d'écoulement depuis les aires de recharge au sud en direction du fleuve au nord. Les aquifères carbonatés plus présents sur la moitié ouest du territoire supportent eux aussi cette dynamique. Une bonne adéquation spatiale est visible entre les indices de résistance et les indices DRASTIC. Les ressources en eau les moins résistantes sont situées sur ou en aval hydraulique direct des secteurs les plus vulnérables selon DRASTIC (losanges et points rouges). La part d'eau de recharge sur les écoulements interceptés dans ces puits y est importante. Plusieurs points situés au milieu des secteurs vulnérables présentent un IRC fort (losanges et points verts encerclés de pointillés noirs). Ce décalage entre les deux indices peut être expliqué par le fait que la part de recharge verticale à proximité du puits n'est pas suffisamment importante pour avoir un impact sur la masse d'eau prélevée. De la même manière, autour de la faille Logan, les résistances de la plupart des eaux sont fortes, tandis que les indices DRASTIC restent élevés témoignant d'une forte vulnérabilité. Cela peut être dû au fait que soit la recharge est très minimale sur ce secteur, malgré la forte vulnérabilité des aquifères, soit les lignes d'écoulement interceptées sont plus profondes et témoignent de temps de transits plus importants.

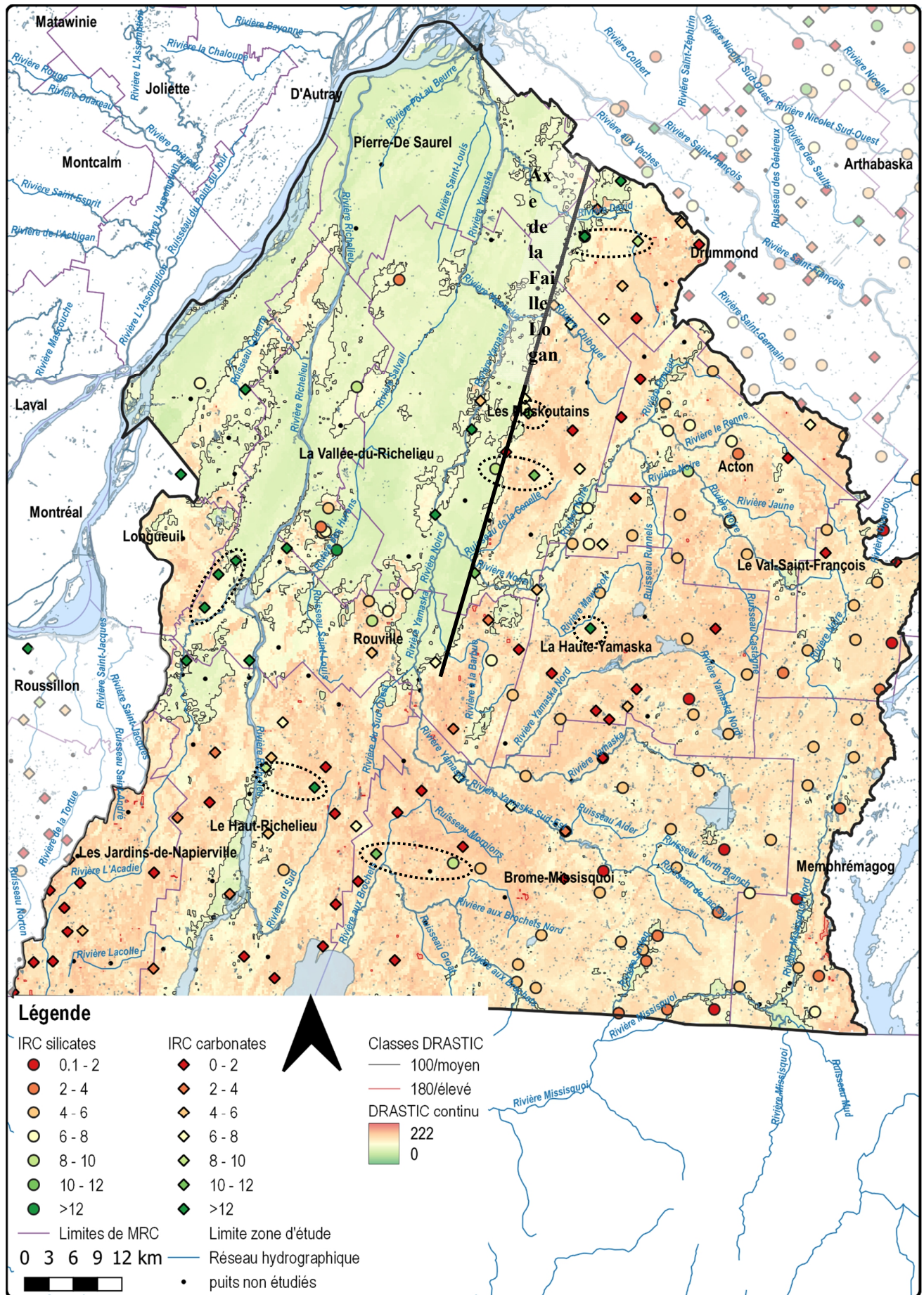


Figure 108: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES ME



### 3.2.3 Nicolet-Saint-François (PACES NSF)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 191

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 180

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 152

Le PACES Nicolet-Saint-François couvre un territoire de 4 585 km<sup>2</sup> au sud du fleuve Saint-Laurent à cheval sur deux régions géologiques : la Plate-forme du Saint-Laurent au nord et les Appalaches au sud. Le territoire est situé entre le PACES Montérégie Est à l'ouest et le PACES Bécancour à l'est. Son contexte hydrogéologique est très similaire à ces deux secteurs. La grande faille Logan sépare les couches sédimentaires ordoviciennes des unités métamorphiques de la nappe de chevauchement des Appalaches. Les roches appalachiennes fortement déformées et comportant de nombreuses failles sont constituées de roches ignées ou métamorphiques qui affleurent sur les Hautes-Terres au sud du territoire. L'ensemble est recouvert de manière discontinue par des sédiments meubles glaciaires, surmontés par les argiles de la mer de Champlain dont l'épaisseur augmente depuis le sud vers le nord. Par endroits, au sommet de la stratigraphie se retrouvent des couches de sables plus ou moins grossiers dans lesquels des nappes locales se sont développées. Les principales zones de recharge se situent sur les Hautes-Terres appalachiennes (Figure 109). L'eau s'infiltré jusque dans les aquifères au roc puis transite vers le nord et alimente à son tour les aquifères des Basses-Terres de la Plate-forme du Saint-Laurent. Dans les Basses-Terres, de rares zones libres permettent une faible recharge des aquifères rocheux, la présence des sédiments argileux de plus en plus épais augmentant le confinement de ces strates. En revanche, pour les aquifères granulaires de faible extension, certains présents à l'affleurement peuvent avoir un ou deux vecteurs de recharge (la pluie et les apports des aquifères rocheux présents en amont), tandis que d'autres complètement isolés du roc ne sont rechargés que par la pluie.

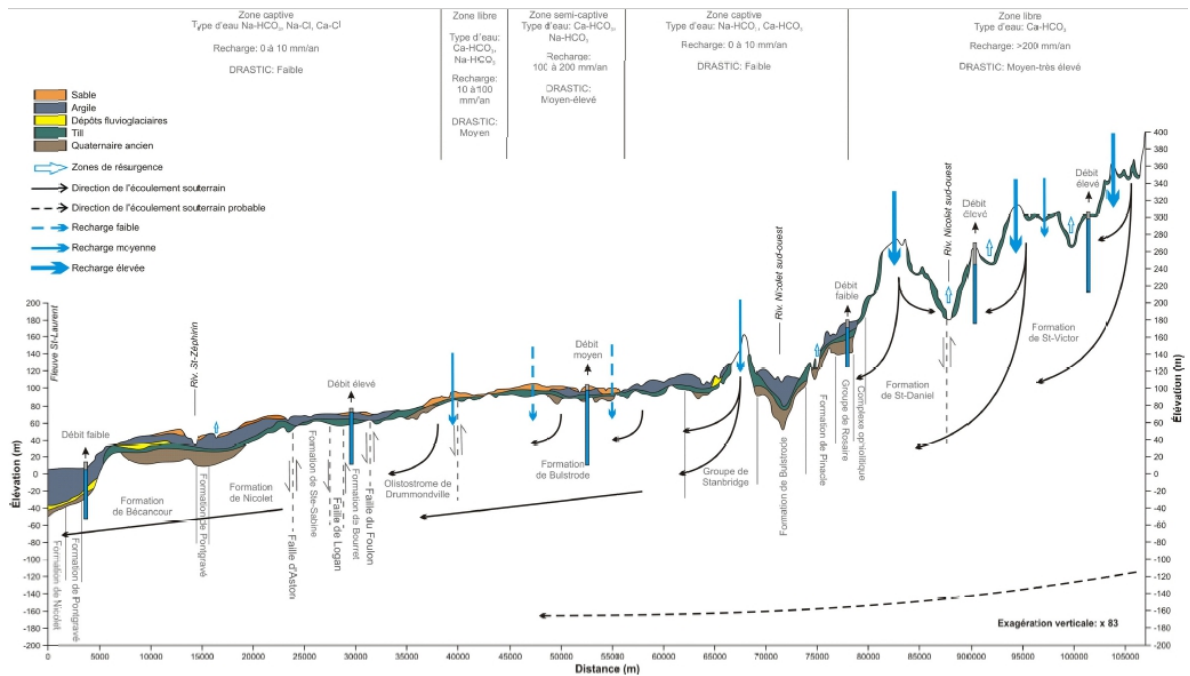


Figure 109: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Nicolet-Saint-François (Larocque *et al.*, 2015a)

Sur ce secteur, 25 % des puits prélevés sont installés dans les aquifères granulaires et 75 % dans les aquifères au roc. La moitié des puits atteignent des nappes d'eau souterraine libres, tandis que 28 % prélèvent des nappes semi-captives et 20 % des nappes captives (Figure 110). Au niveau minéralogique, les calcaires ordoviciens sont très peu représentés avec seulement 1 puits situé dans ces formations. En revanche, 49 % sont situés dans des aquifères silicatés et 32 % prélèvent dans des unités mixtes de roches silicatées présentant des lits de roches carbonatées. À partir des informations de la base de données, 34 puits (soit 19 %) prélèvent dans des aquifères indéterminés.

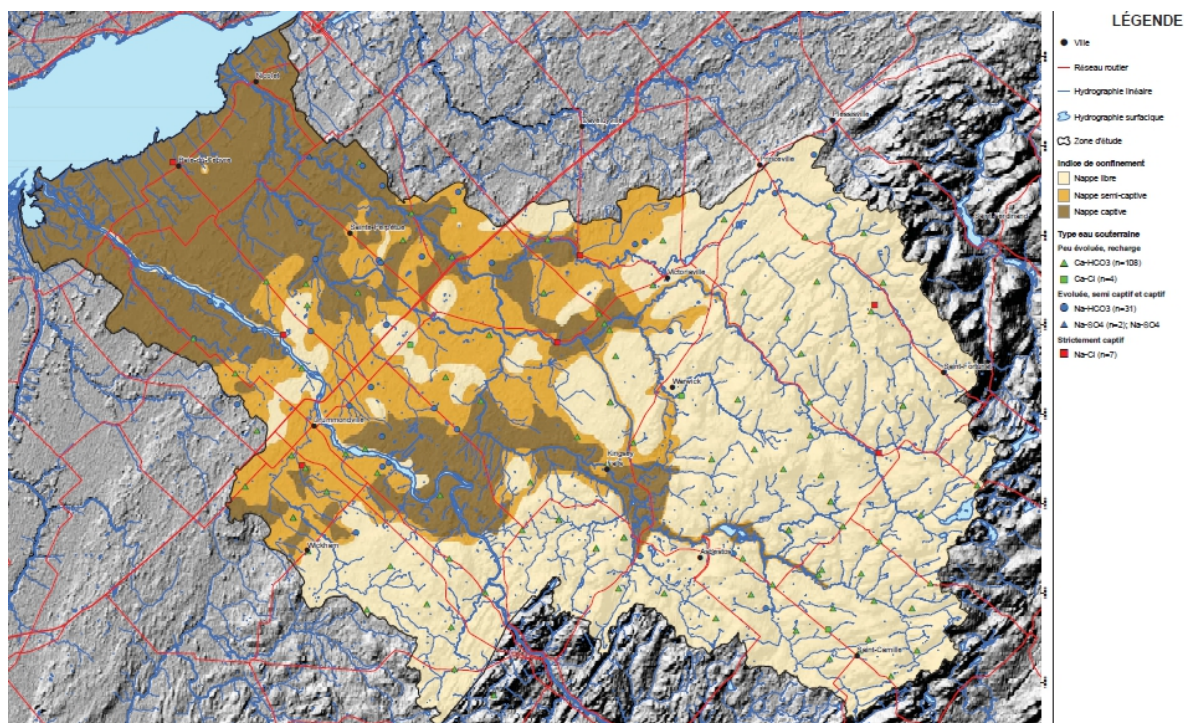


Figure 110: Répartition des puits échantillonnés et de leur type d'eau en fonction de l'indice de confinement du milieu (Larocque *et al.*, 2015a)

Avec un faciès bicarbonaté-calcique dominant dans les aquifères granulaires (libres et captifs), les eaux souterraines ont un caractère sous-saturé vis-à-vis de la calcite (Figure 111). Les eaux présentes dans les aquifères classés indéterminés ont exactement la même sous-saturation, ce qui appuie l'hypothèse que les dépôts meubles ne contiennent pas de minéraux carbonatés, bien que le roc sous-jacent en soit partiellement constitué. La dissolution des carbonates n'est donc pas à l'origine du faciès des eaux dans ce type d'aquifère. L'acquisition du calcium est plutôt être liée à une altération de silicates calciques (feldspaths). Les eaux souterraines des aquifères rocheux quant à elles présentent une saturation vis-à-vis de la calcite dès les aires de recharge. La présence avérée des lits carbonatés dans certaines parties du socle rocheux, est certainement la source de minéraux que les eaux souterraines dissolvent jusqu'à atteindre un équilibre. Le faciès bicarbonaté-calcique dominant dans les aquifères rocheux et granulaires indique que la dissolution/altération de minéraux calciques (carbonates ou silicates) est le processus majoritaire de ces milieux (Figure 111a). L'évolution du faciès bicarbonaté-calcique vers le faciès bicarbonaté-sodique, notamment dans les aquifères rocheux libres peut s'expliquer par l'association des processus d'échange cationique avec les argiles dans les secteurs amont des Basses-Terres et d'altération des minéraux sodiques (Figure 112 et Figure 113).

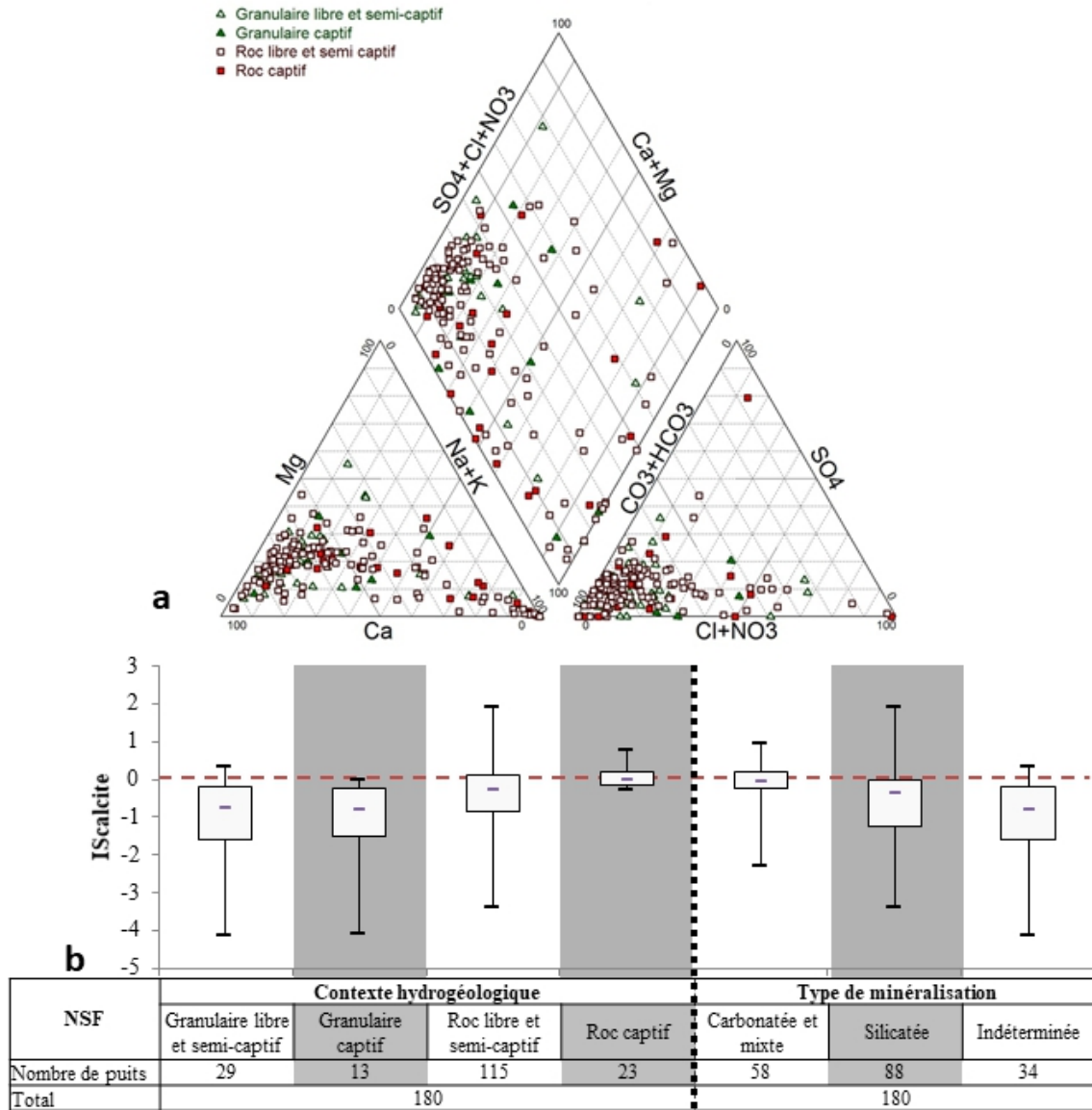


Figure 111 : Faciès géochimique des eaux de la région NSF représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Le DEH assure la représentation de l'impact couplé d'altération des minéraux sodiques et d'échange cationique avec les argiles marines permettant un échange Ca-Na sur l'évolution chimique des masses d'eau (Figure 112). L'échange cationique, qui permet un déplacement plus important dans les stades d'évolution chimique du DEH, est associé aux eaux transitant dans les aquifères des Basses-Terres, ce qui concorde avec la répartition spatiale des argiles marines. Les eaux des aquifères des Hautes-Terres (carbonatés et silicatés) restent majoritairement dominées par l'altération des minéraux calciques, et leurs points se situent à l'origine des axes du DEH. Pourtant, ces eaux possèdent des temps de séjour apparent variés, visibles par l'évolution des  $IS_{calcite}$  en fonction des teneurs en silice et en alcalinité (Figure 113). Sur ces représentations, il n'est pas possible d'établir une distinction entre les eaux des aquifères rocheux et celles des aquifères granulaires, les deux types de ressources présentant les mêmes stades d'évolution.

Cela se traduit par des IRC faibles à moyen dans la plupart des ressources des aquifères silicatés qu'ils soient rocheux ou granulaires (IRC de 1 à 8 ; Figure 114). Comme sur les autres régions, la méthode

de calcul de résistance couplée utilisée pour les ressources en eau des aquifères silicatés est plus sensible pour les temps de séjours assez courts. Dans le cas des eaux transitant dans les aquifères carbonatés, les IRC s'étendent de 0 à 18.

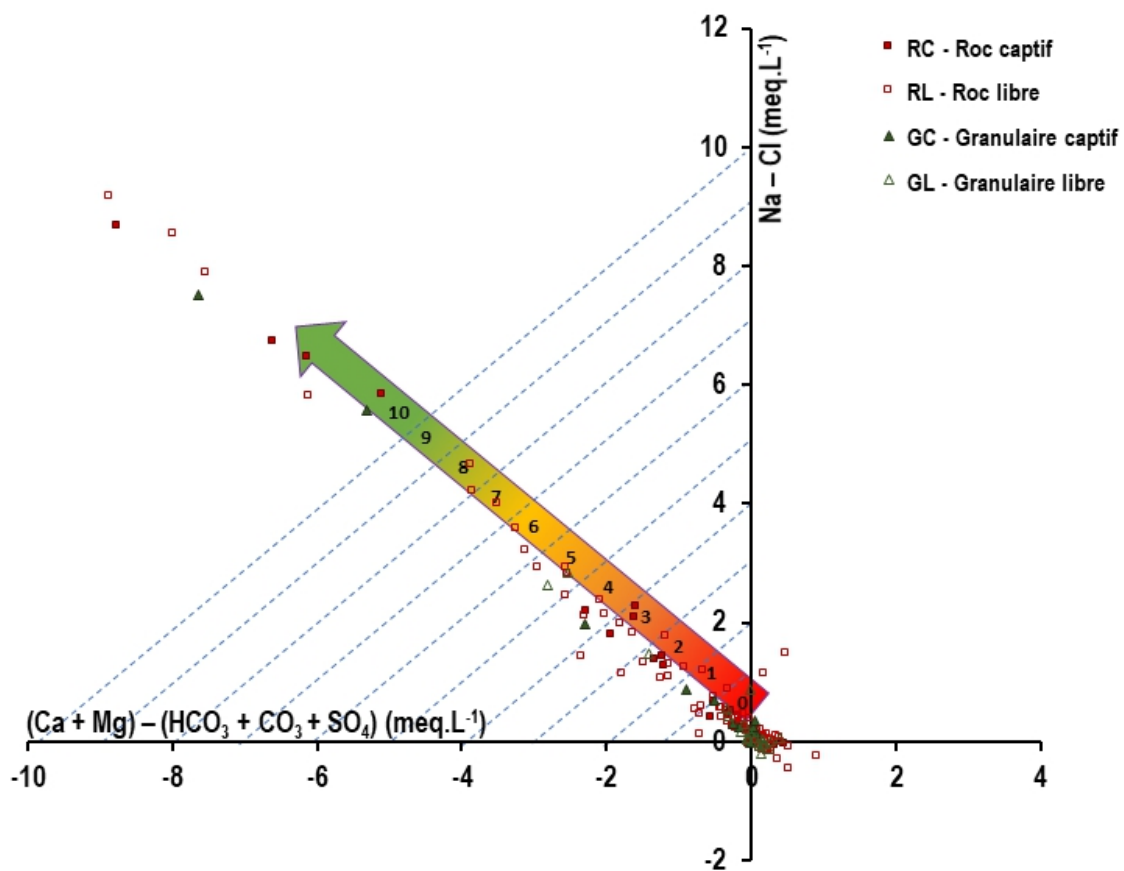


Figure 112: Faciès chimique des puits du PACES NSF représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

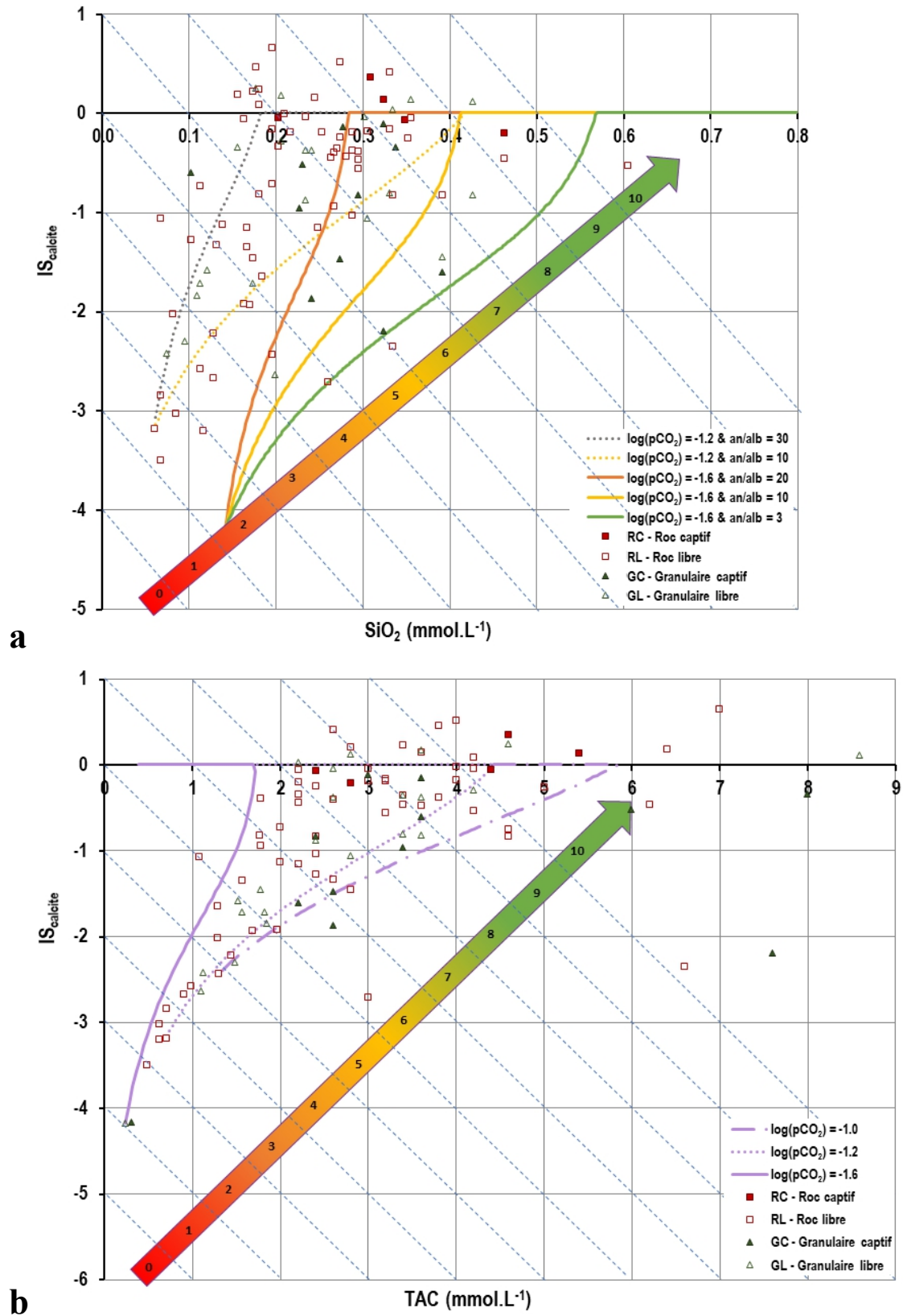


Figure 113: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES NSF (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en Si dissout (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

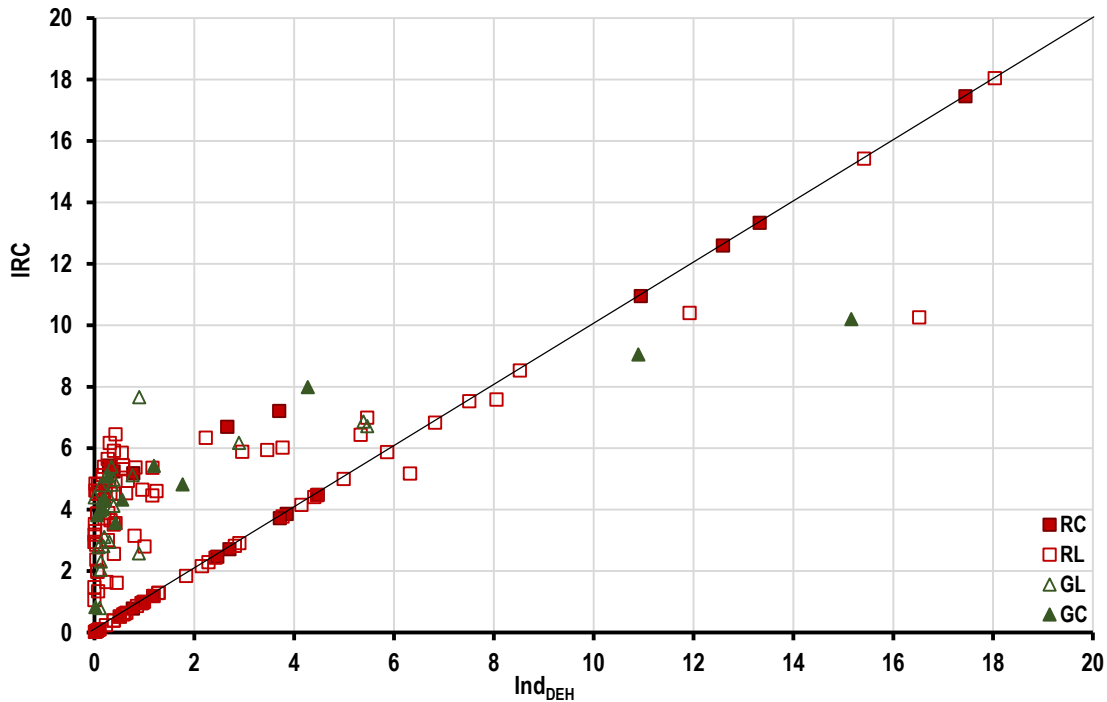


Figure 114: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La comparaison spatiale des IRC avec les indices DRASTIC associe la faible résistance des ressources des Hautes-Terres, rechargées en continu par les flux d'infiltrations sur les secteurs perméables d'affleurement sus-jacents caractérisés avec des indices DRASTIC élevés (Figure 115). Dans les secteurs des Hautes-Terres jugés peu vulnérables par DRASTIC (entourés de pointillés noirs), notamment en raison de la présence des argiles, certaines ressources en eau prélevées restent aussi peu résistantes que dans les secteurs de recharge des Hautes-Terres. Ce constat s'explique par la proximité entre les puits prélevés et les secteurs de recharge en amont hydraulique. La perception verticale des écoulements par DRASTIC ne permet pas de faire le lien entre les aires de recharges et les ressources en aval hydraulique direct. Le complément d'information apporté ici par l'indice de résistance est pertinent car il permet de souligner cette faiblesse. Dans le cas des Basses-Terres, les quelques puits caractérisés par de faibles résistances chimiques sont situés au milieu de la plaine argileuse sous laquelle les aquifères sont jugés peu vulnérables par DRASTIC (points entourés de pointillés rouges). Ce décalage est ici certainement dû au fait que les puits puisent dans les nappes d'accompagnement des rivières présentes dans les dépôts granulaires autour des cours d'eau tandis que le DRASTIC a été calculé pour l'aquifère au roc régional sous-jacent. Il est important de noter ici que le DRASTIC n'a été calculé que pour l'aquifère au roc en raison de la trop faible extension des aquifères granulaires. L'interprétation du DRASTIC pour les milieux granulaires est donc impossible tandis que l'IRC apporte une information sur la résistance de la masse d'eau quel que soit son contexte hydrogéologique.

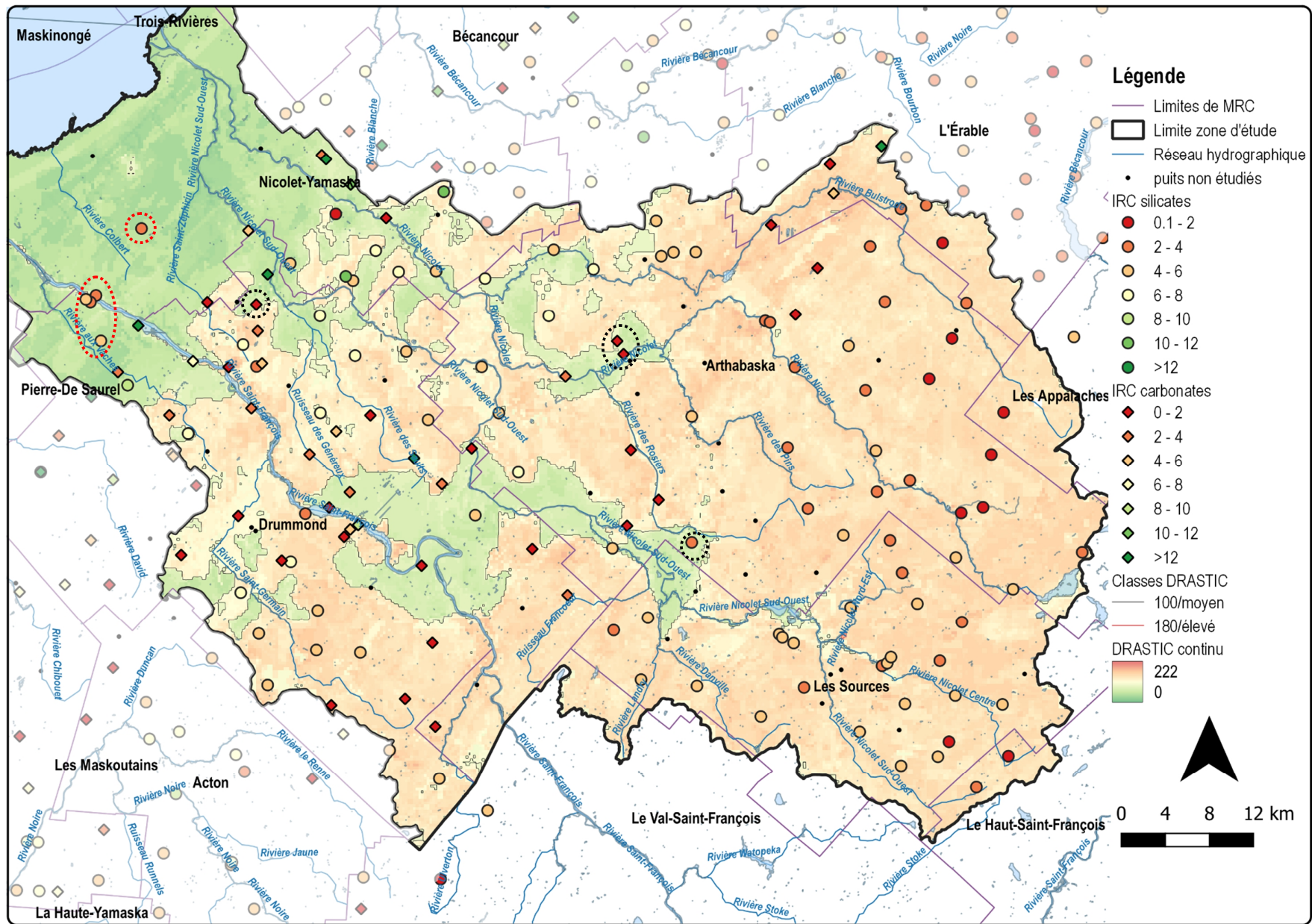


Figure 115: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC - PACES NSF

### 3.2.4 Bécancour (PACES BEC)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 117

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 107

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 99

Le PACES de la Bécancour s'étend sur une superficie de 2 859 km<sup>2</sup>, à cheval sur les provinces de la Plate-forme du Saint-Laurent au nord et des Appalaches au sud, dans la continuité directe de la région du PACES Nicolet-Saint-François. La Plate-forme du Saint-Laurent est caractérisée par des roches ordoviciennes de type shales, calcaires et grès qui reposent en discordance sur le socle rocheux cristallin de la Province de Grenville. Les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent se retrouvent séparées des roches Paléozoïques des Appalaches par une faille majeure : la faille Logan de direction NE-SO. Au sud de cette faille, les roches appalachiennes sont composées de roches métamorphiques d'origine sédimentaires (schistes, phyllades et quartzites principalement). À l'exception des Hautes-Terres situées dans les Appalaches, le socle rocheux est recouvert par une multitude de couches sédimentaires meubles d'âge quaternaire. Ces dépôts sont de natures variées (tills, sédiments glacio-lacustres, glacio-marins, fluvio-lacustres, alluviaux et éoliens) et leur épaisseur totale varie de moins d'un mètre à plus de 90 m, en alternant des unités aquifères et des unités aquitards. Le socle rocheux des Basses-Terres se retrouve totalement recouvert ce qui empêche une recharge directe de cet aquifère depuis la surface : soit la recharge passe par les Hautes-Terres des Appalaches et transite dans les roches métamorphiques avant d'atteindre les roches des Basses-Terres, soit la recharge traverse les unités perméables des dépôts quaternaires avant d'atteindre le socle rocheux (Figure 116). Il existe aussi par endroit des connexions directes entre les couches aquifères quaternaires et le socle rocheux métamorphique des Appalaches.

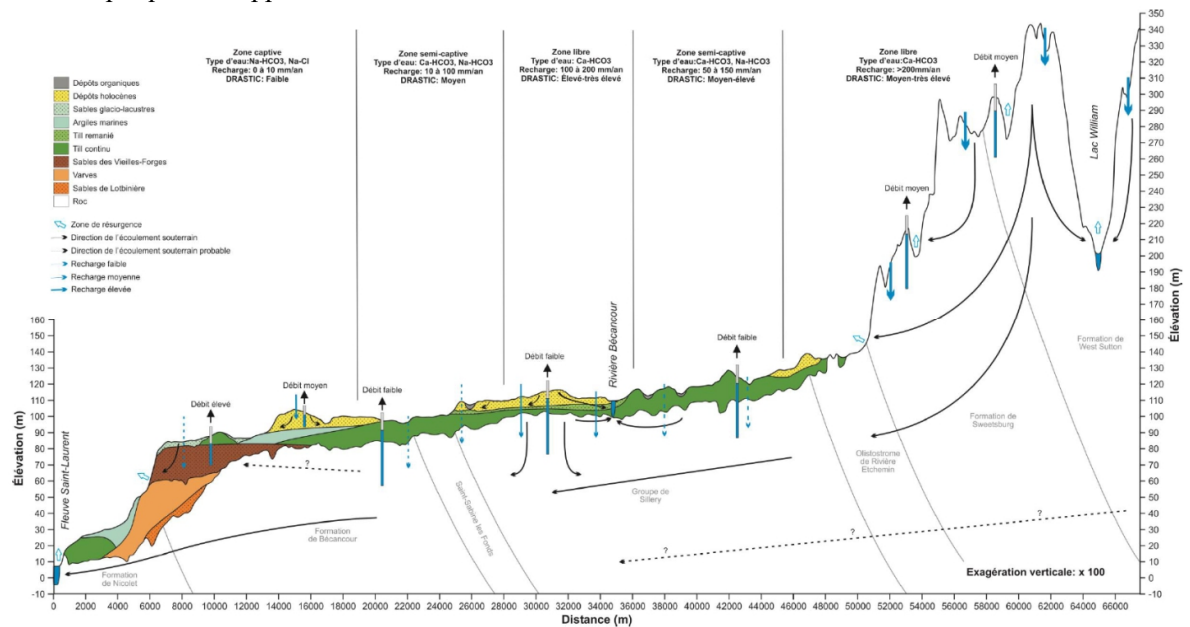


Figure 116: Synthèse du contexte hydrogéologique du PACES Bécancour (Larocque *et al.*, 2013)

Sur ce territoire, 78 % des puits prélevés atteignent les aquifères rocheux (Figure 117). Plus de la moitié des puits puisent des nappes en condition libre (58 %), tandis que 8 % puisent des nappes semi-captives et 34 % des nappes captives. Côté minéralogique, 58 % des puits accèdent à des aquifères silicatés, 2 % à des aquifères carbonatés, 25 % des aquifères mixtes carbo-silicatés, et 11 % sont classés comme indéterminés. Un point particulier du secteur, 4 % des puits puisent de l'eau dans des



couches sédimentaires mixtes entre roches silicatées et évaporites. Pour le traitement des données, ces puits ont été inclus avec les puits silicatés.

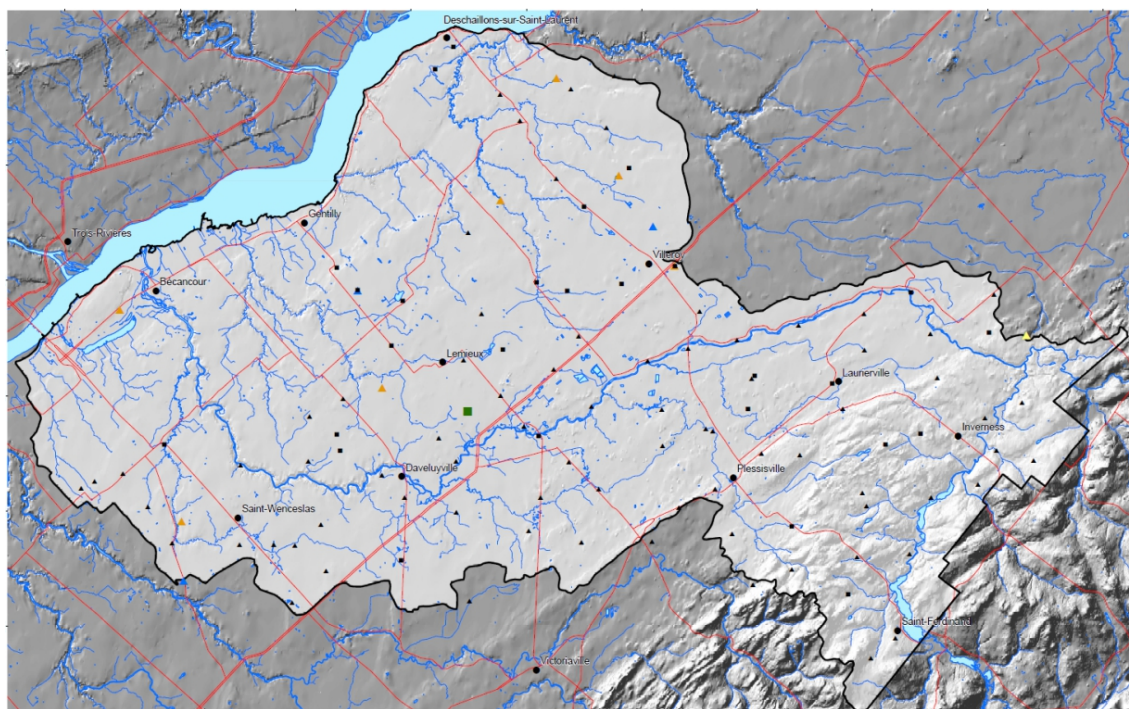


Figure 117: Répartition spatiale des puits en fonction du type d'aquifère (triangles : aquifère roc, carrés : aquifère granulaire ; en jaune les puits dépassant la norme de potabilité pour l'antimoine, en vert pour l'arsenic, en orange pour le fluor et en bleu pour le barium, les points noirs ne dépassent aucune norme; Larocque et al., 2013)

Le faciès chimique des eaux évolue entre un pôle bicarbonaté-calcique et magnésien et un pôle bicarbonaté-sodique (Figure 118a). Comme précédemment la distribution des  $IS_{calcite}$  renseigne sur les processus dominants la minéralisation des eaux. Les aquifères granulaires libres et captifs sont majoritairement silicatés et d'extension locale, ce qui se traduit par des  $IS_{calcite}$  faibles (très inférieurs à 0 ; Figure 118b). La minéralisation y est dominée par l'altération des silicates calciques puis sodiques.

Dans les formations au roc, des carbonates sont souvent présents. La minéralisation de l'eau implique leur dissolution ce qui peut expliquer la présence d'eaux faiblement sous-saturées vis-à-vis de la calcite en zone libre, puis toutes saturées en partie captive. La distribution des  $IS_{calcite}$  entre formations carbonatées et silicatées confirme bien l'empreinte de la présence des carbonates sur l' $IS_{calcite}$ . Les aquifères dont la nature est non déterminée présentent généralement des eaux sous saturées vis-à-vis de la calcite, il est donc possible de conclure que ces formations sont dépourvues de carbonates. Ces puits sont donc traités avec les milieux silicatés.

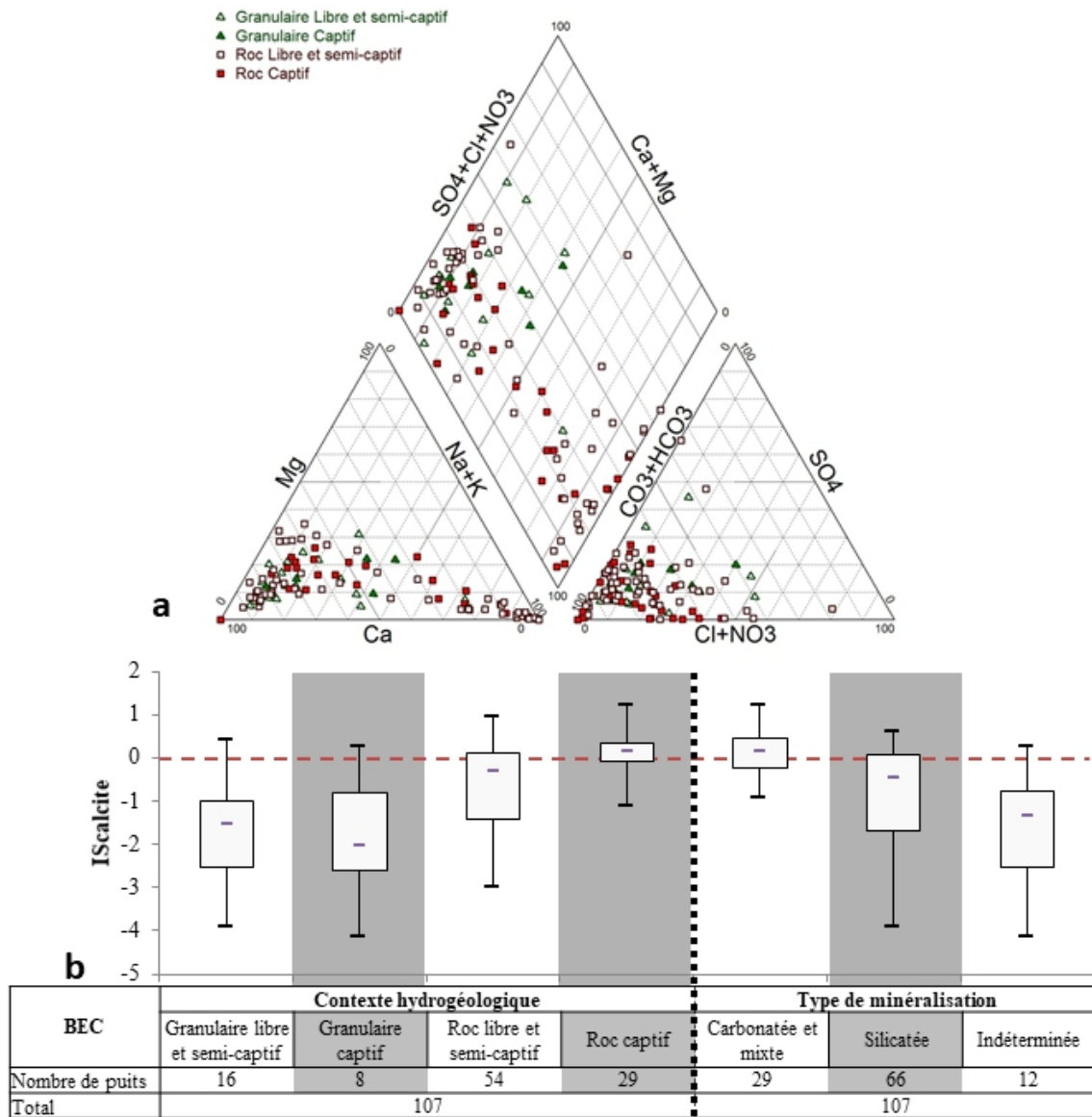


Figure 118: Faciès géochimique des eaux de la région BEC représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

La distribution des points sur le DEH est très étendue, représentant l'impact croissant de l'altération des minéraux silicatés et des échanges cationiques sur les eaux souterraines au fur et à mesure de leur parcours dans les aquifères au roc (Figure 119). Il n'y a pas de distinction franche entre les parties captives et les parties libres, ce qui permet de supposer que les temps de séjours moyen des lignes d'écoulement interceptées dans les puits sont similaires dans les deux contextes. Les points représentant les aquifères granulaires sont centrés à l'origine des axes du graphique, illustrant leur faciès bicarbonaté-calcique associé à un temps de parcours faible dans l'aquifère.

Le suivi de l'évolution de l' $IS_{calcite}$  des eaux en milieux silicaté en fonction des teneurs en silice et en alcalinité permet pour cette région également de détailler avec plus de précision les stades de minéralisation des eaux au début de leur parcours (Figure 120). Les eaux des aquifères granulaires ne se distinguent pas des eaux séjournant dans les aquifères rocheux. Ces représentations permettent d'obtenir des IRC allant de 1 à 6 pour ces eaux dominées par l'altération des minéraux calciques en milieu silicaté (Figure 121). Les eaux des milieux silicatés dominées par l'altération des minéraux

sodiques ou les échanges cationiques sont caractérisés par des IRC compris entre 6 et 11. Dans les milieux carbonatés, les ressources en eaux sont caractérisées par des IRC allant de 0 à 16.

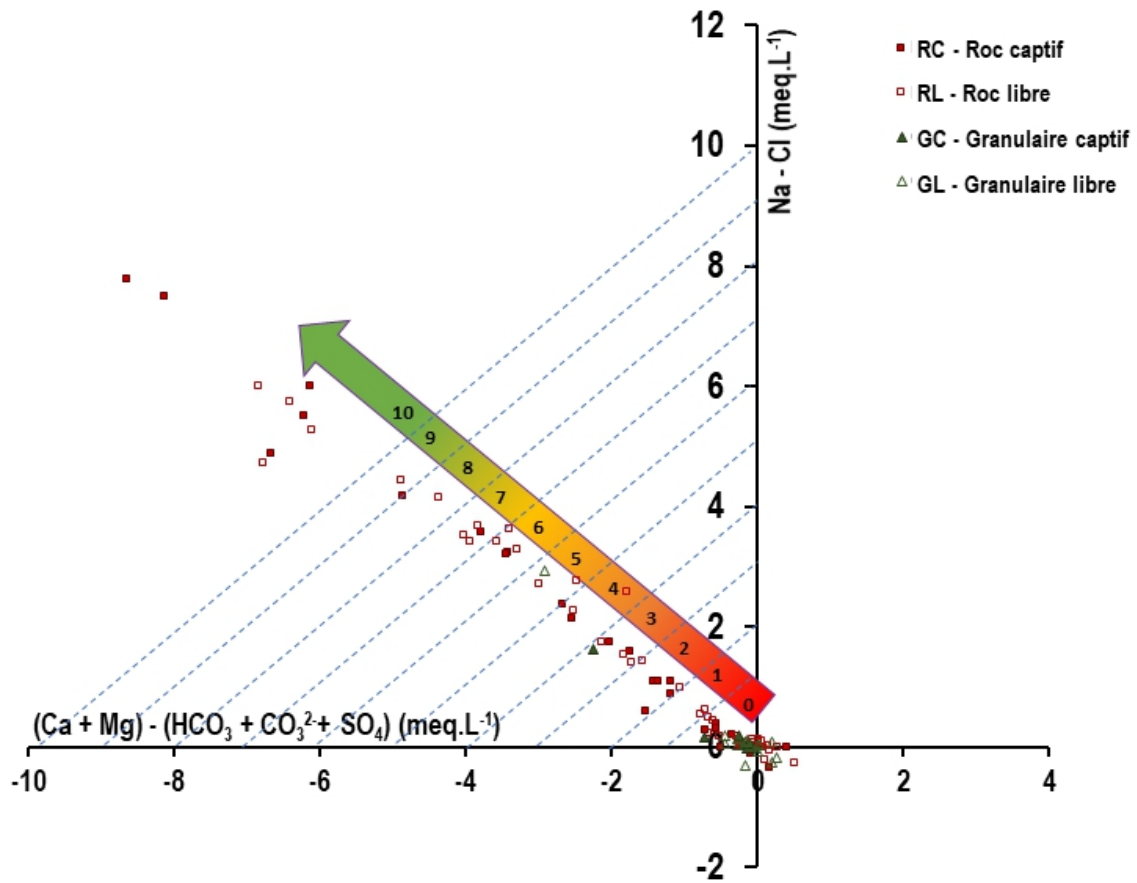


Figure 119: Faciès chimique des puits du PACES BEC représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

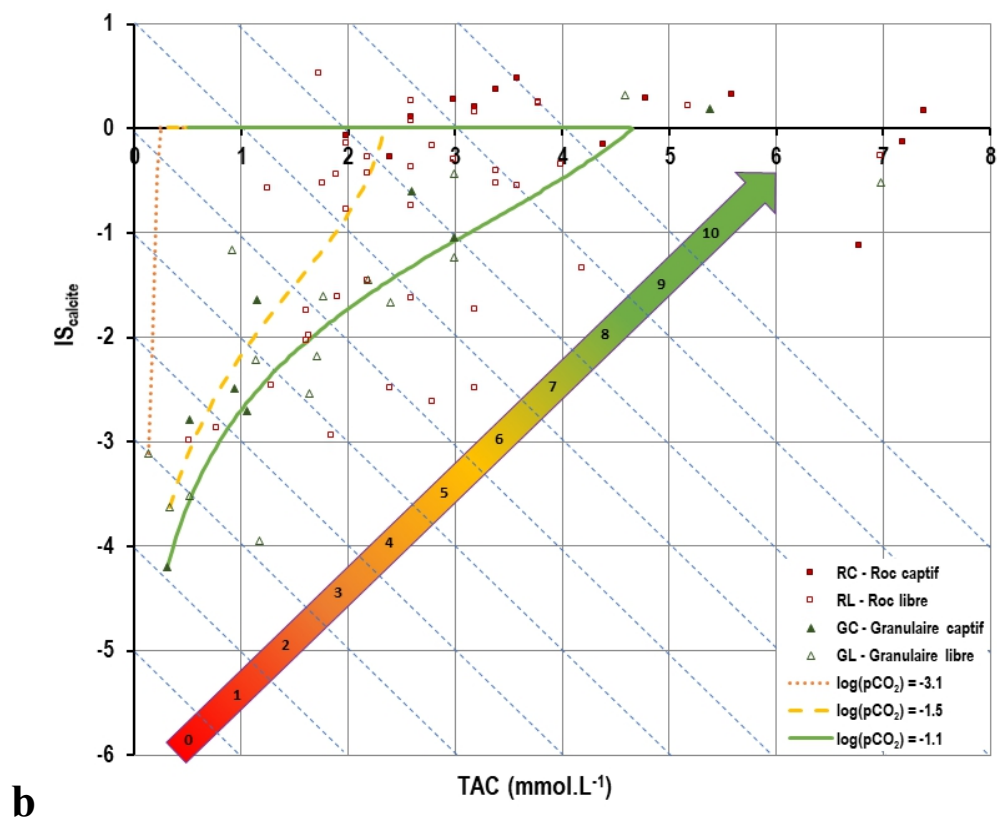
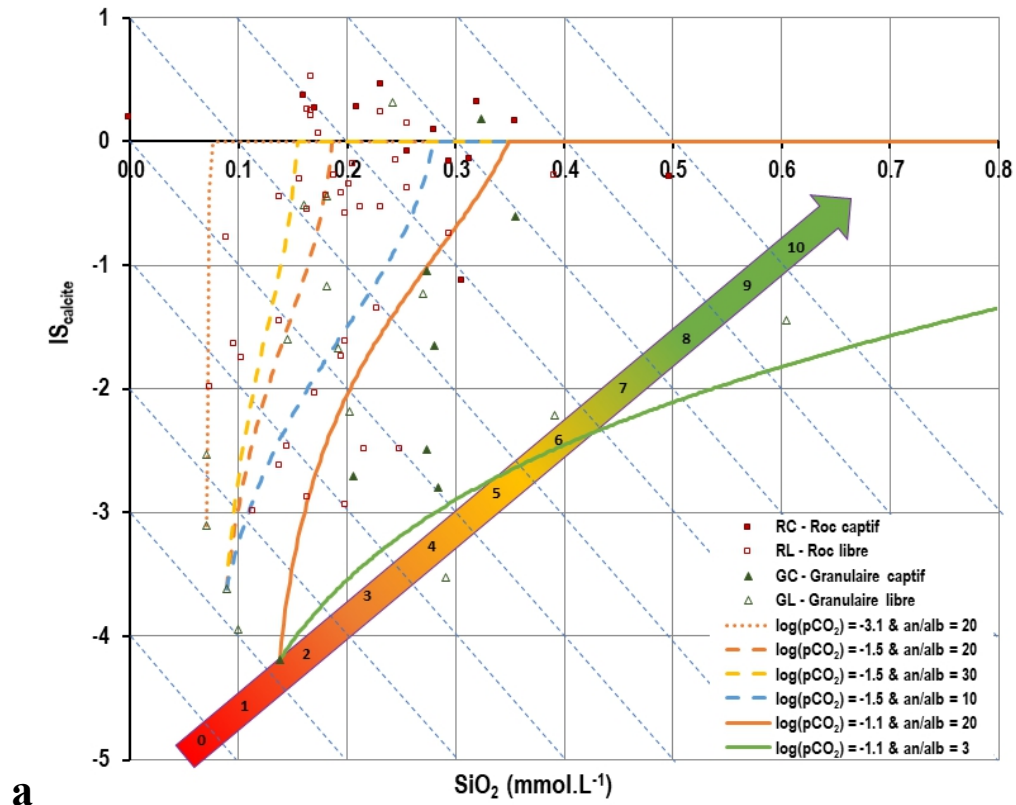


Figure 120: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES BEC (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en Si dissout (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

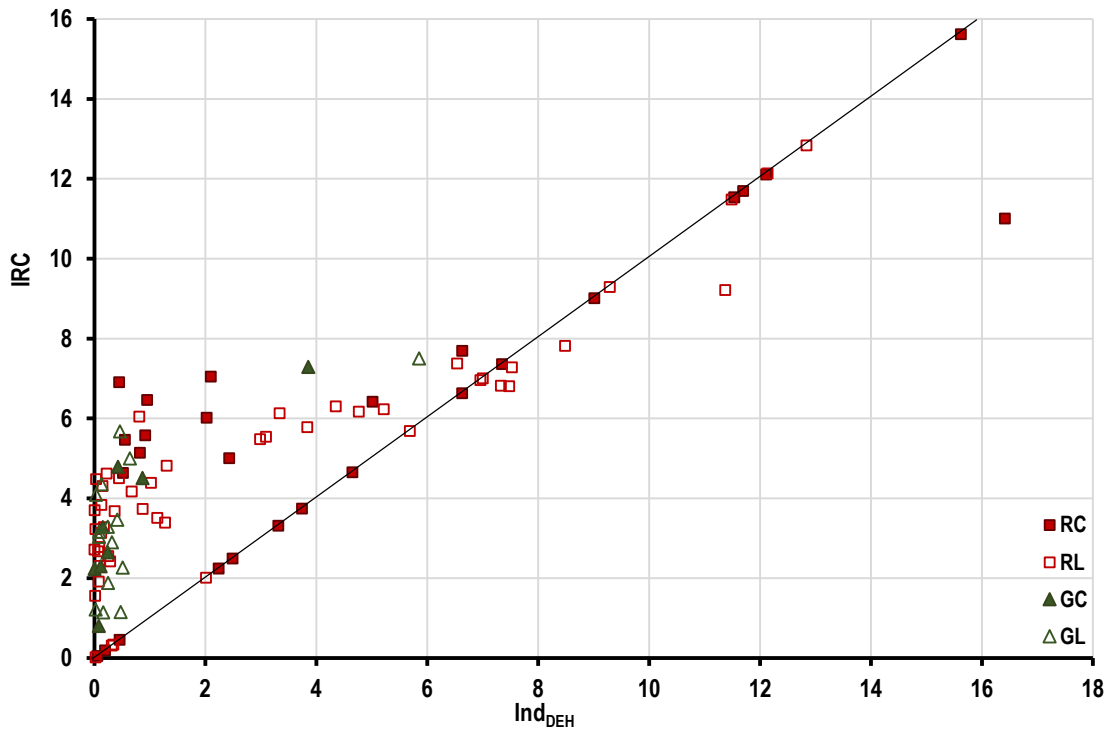


Figure 121: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

La répartition spatiale des IRC concorde dans l'ensemble avec les indices DRASTIC (Figure 122). Sur les Hautes-Terres, la résistance des ressources est très faible à moyenne (points rouges et orange), confirmant la prédominance des eaux de recharge sur ces secteurs où les aquifères affleurent facilement. Sur la partie médiane du territoire, dans la MRC d'Arthabaska, un certain nombre de ressources sont jugées vulnérables par DRASTIC mais résistantes par cette étude (points entourés de pointillés noirs). Cela peut s'expliquer par le fait que dans ces secteurs la recharge verticale n'est pas suffisamment importante pour impacter la ressource captée dans les puits. Ce cas de figure peut être associé aux lignes d'écoulements régionales des aquifères au roc dont la recharge principale provient des Hautes-Terres très en amont et pour lesquelles la recharge locale ne représente qu'une part négligeable du réservoir souterrain. Enfin sur les secteurs les plus en aval des Basses-Terres, où se situent la majeure partie des ressources exploitées dans les milieux carbonatés, une hétérogénéité importante des résistances est observée. Les eaux les moins résistantes sont issues des aquifères granulaires silicatés dont l'extension spatiale est très limitée (points entourés en pointillés rouges). Pour ces puits en particuliers, la comparaison avec la carte DRASTIC n'est pas pertinente car celle-ci ne représente que les aquifères au roc (Larocque *et al.*, 2013). Pour les aquifères au roc, principalement carbonatés, la résistance des ressources en eau est moyenne à forte ce qui soutient le fait que sur cette partie du territoire le roc contient des eaux provenant des écoulements régionaux dont les temps de séjours sont suffisamment longs pour annihiler tout impact de recharge locale dont les quantités sont très faibles voir nulles sur certains secteurs. De ce fait, quelle que soit la vulnérabilité caractérisée par DRASTIC, la ressource sous-jacente a un potentiel de dilution important.

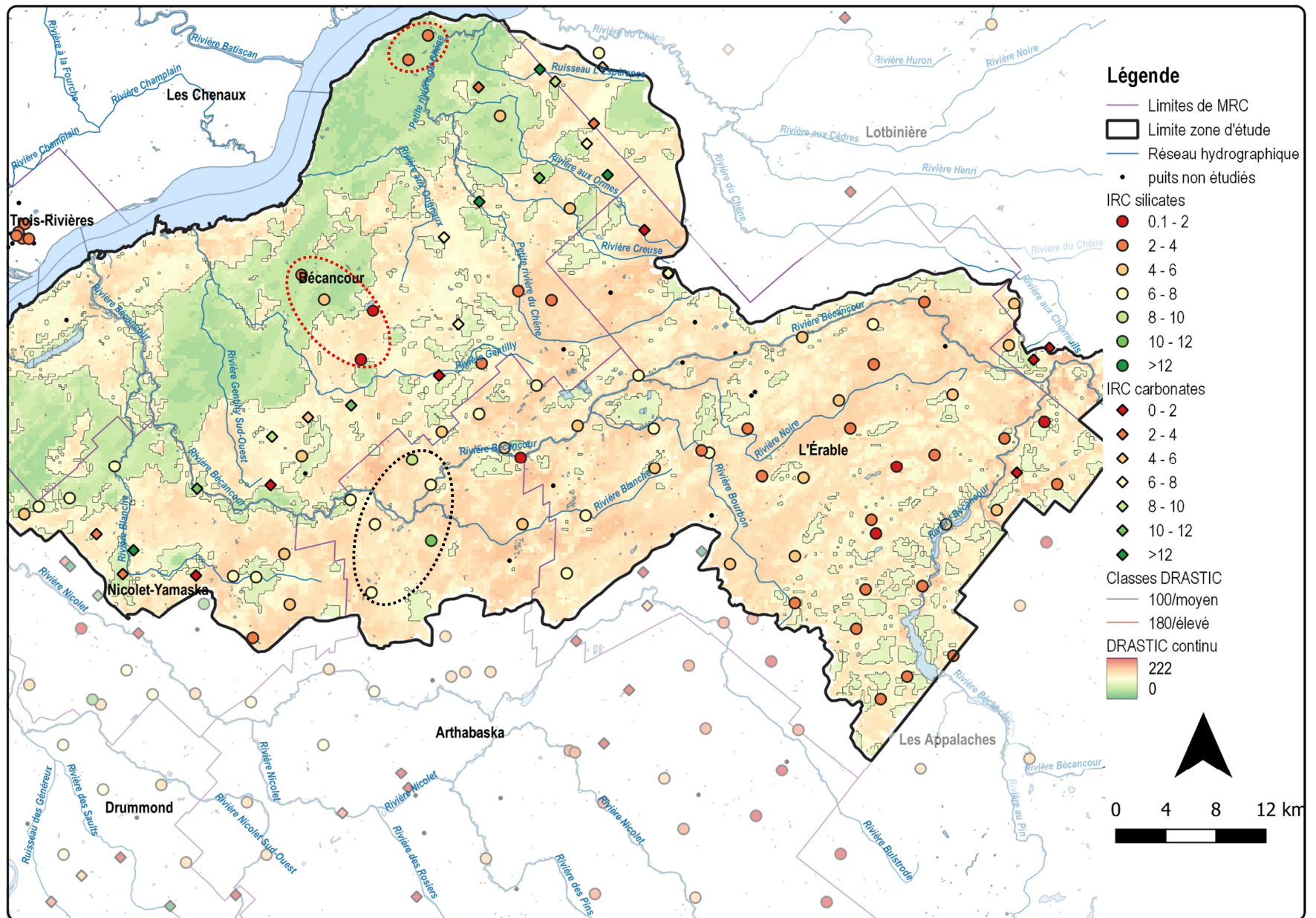


Figure 122: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES BEC

### 3.2.5 Chaudières-Appalaches (PACES CA)

Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 125

Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 114

Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 104

Le PACES Chaudières-Appalaches couvre un territoire de 14 600 km<sup>2</sup> au sud du fleuve Saint-Laurent. Dans la continuité de la région de la Bécancour, la région Chaudières-Appalaches est à cheval sur les provinces de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches, avec la présence de la faille Logan comme séparation physique des deux provinces. Sur cette région la Plate-forme du Saint-Laurent composée de roches calcaires et de shales est très minoritaire puisqu'elle ne recouvre que la pointe sud-ouest du territoire. En revanche, les roches appalachiennes sont largement présentes avec des lithologies très différentes en fonction des périodes orogéniques dont elles proviennent (grès, shales, schistes, quartzites). Ce socle rocheux est recouvert de couches quaternaires d'origine marine dans le tiers nord-ouest, parallèle au fleuve Saint-Laurent, ou glaciaire pour la partie des Hautes-Terres appalachiennes. Des formations alluvionnaires et sableuses reposent au sommet de la stratigraphie régionale. Ces dépôts quaternaires, majoritairement perméables, en dehors du secteur des Basses-Terres, permet aux nappes d'eau souterraines d'être principalement libres (Figure 123). Le système de recharge du secteur se fait donc de manière directe dans les zones d'affleurement pour les aquifères granulaires et les aquifères rocheux de la région des Appalaches. Le secteur de la Plate-forme du Saint-Laurent ainsi que les secteurs captifs du socle appalachien sont alimentés de manière indirecte, soit par des écoulements souterrains régionaux venant des Hautes-Terres, soit par de l'infiltration verticale au travers des dépôts meubles quaternaires.

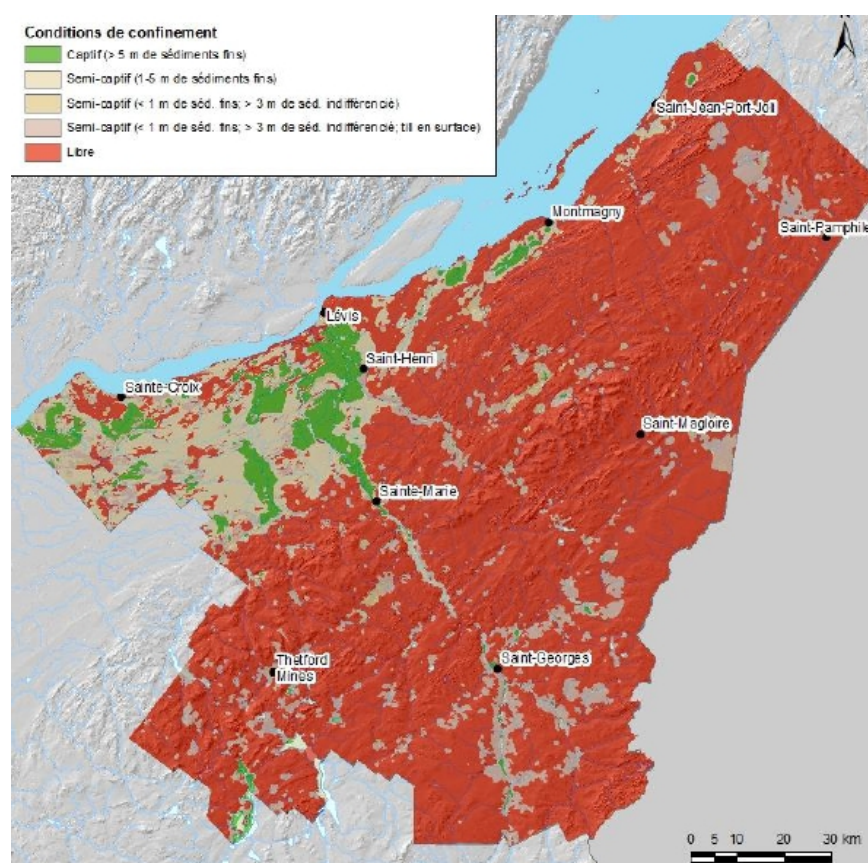


Figure 123: Conditions de confinement des nappes présentes sur le territoire du PACES Chaudières-Appalaches (Lefebvre *et al.*, 2015)

Sur ce territoire, 17 % des puits sont implantés dans les aquifères granulaires locaux, tandis que 83 % sont creusés dans les aquifères rocheux régionaux (Figure 124). Presque la moitié (42 %) de ces puits est en condition de nappe libre, 8 % en conditions semi-captives et 18 % en conditions captives. Les 32 % restant sont considérés comme indéterminés et ont été inclus par défaut avec les aquifères libres. D'un point de vue minéralogique, 65 % des eaux sont prélevées dans des aquifères silicatés, 3 % dans des aquifères carbonatés et 17 % dans des aquifères mixtes silicates/carbonates. À ce stade, 15 % restent de minéralogie indéterminée, principalement les puits installés dans les dépôts meubles issus de l'érosion des roches qui dans cette région peuvent être silicatés ou mixtes.

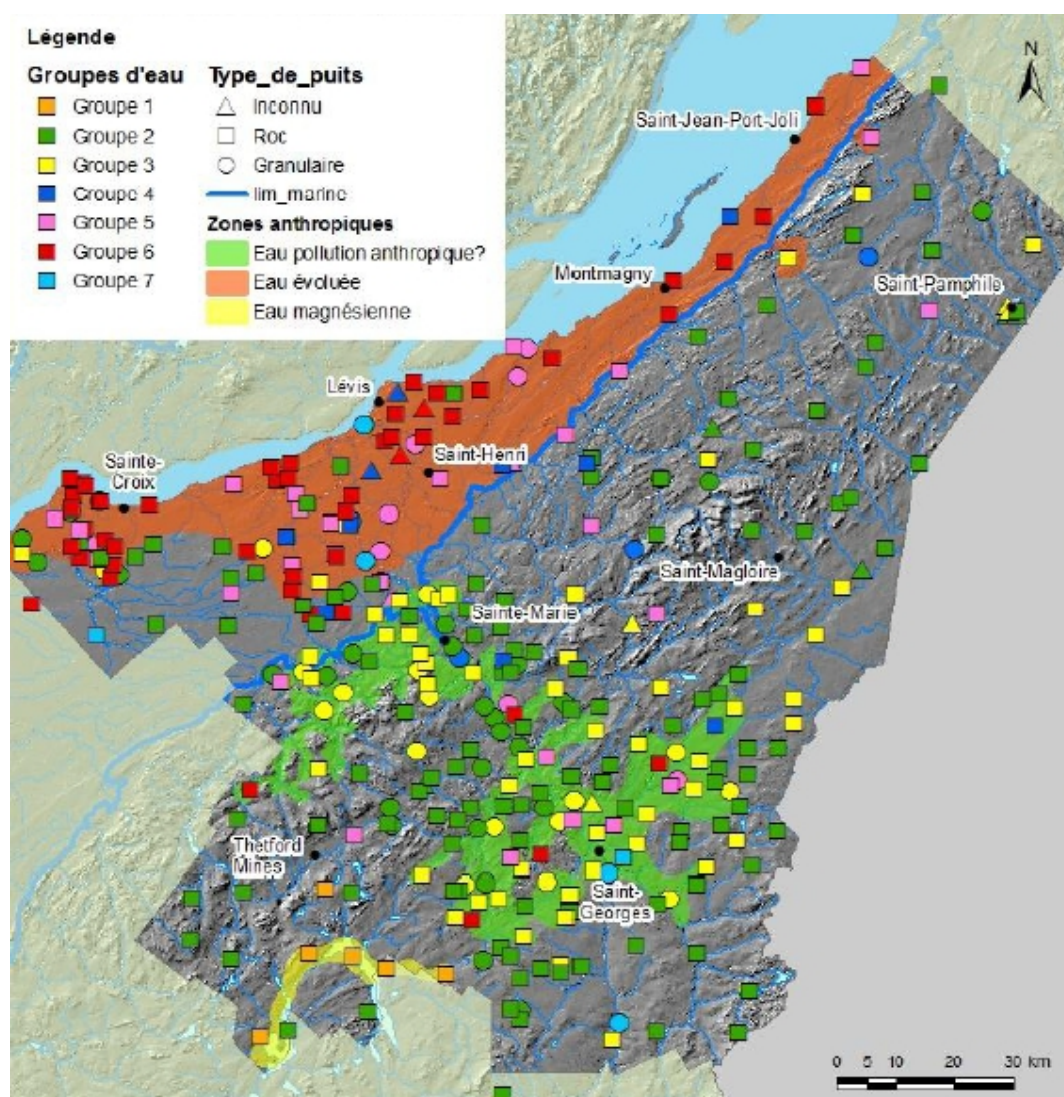


Figure 124: Faciès géochimique des eaux prélevés dans les puits en fonction du type d'aquifère concerné (Lefebvre et al., 2015)

Les eaux souterraines des aquifères granulaires ont des  $IS_{calcite}$  indiquant une saturation vis-à-vis de la calcite dès les parties libres (Figure 125b). La dissolution de carbonates semble dominer la minéralisation de l'eau lors de la recharge. Ce n'est pas le cas des eaux dans le roc où la saturation des eaux souterraines n'est atteinte qu'en partie captive. Pourtant, dans les aquifères rocheux, l'eau acquiert principalement du calcium et des bicarbonates, donnant un faciès de type bicarbonatécalcique dès la partie libre (Figure 125a). Ce faciès résulte ici du processus d'altération des silicates calciques. Les aquifères de nature indéterminée se classent dans le groupe des eaux ayant dissous des



carbonates, démontrant ainsi la disponibilité de ces minéraux dans la matrice. Une partie des eaux des aquifères rocheux et granulaires possèdent un faciès plus évolué de type bicarbonaté-sodique, résultant de la prédominance des échanges cationiques avec les argiles marines et de l'altération des minéraux sodiques.

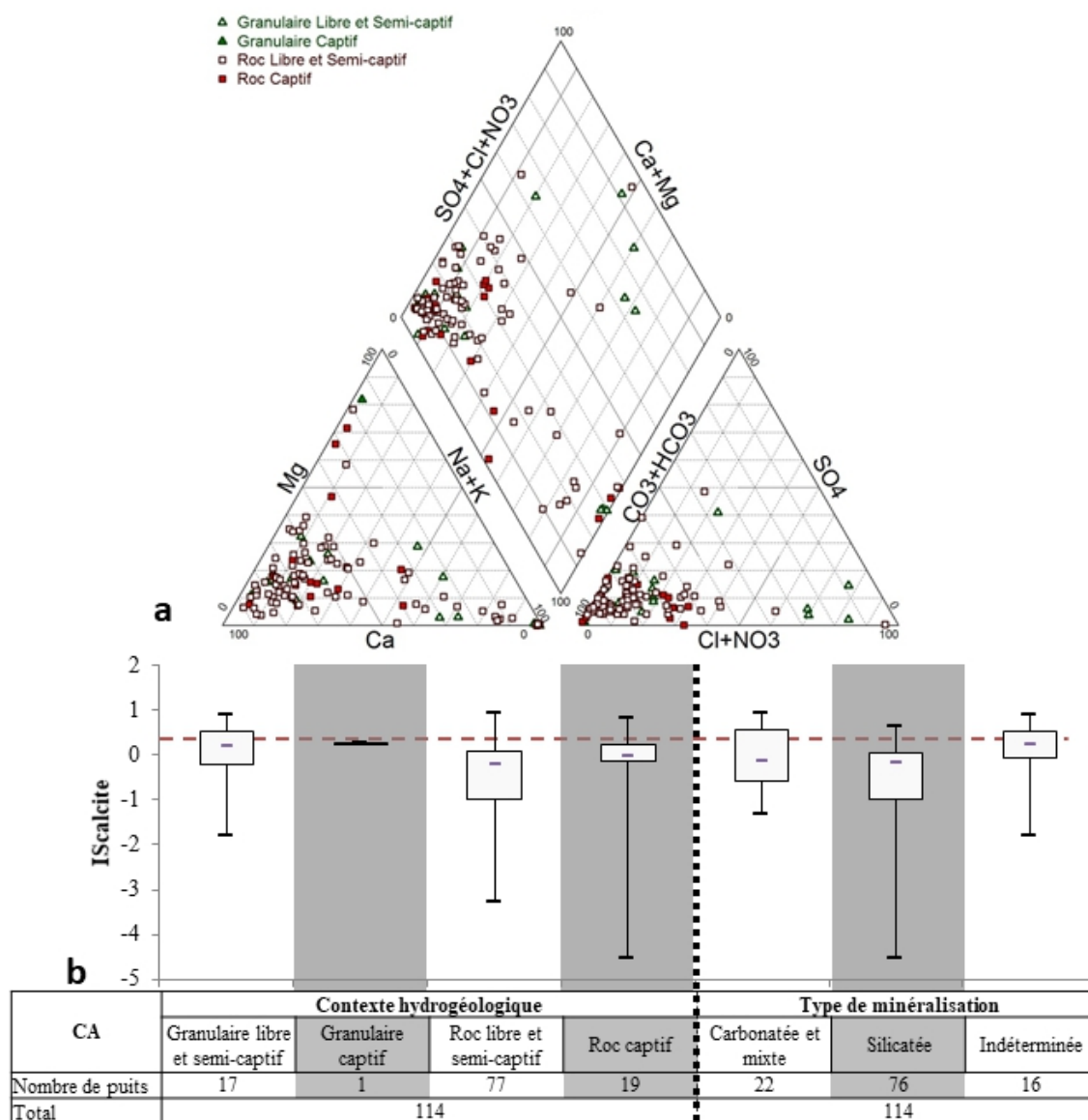


Figure 125: Faciès géochimique des eaux de la région CA représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

Les stades d'évolution chimique des eaux le long des lignes d'écoulement se distinguent dans le DEH, où le passage du faciès bicarbonaté-calcique au faciès bicarbonaté-sodique se fait progressivement le long de la droite d'évolution illustrée par l'échelle d'indice (Figure 126). La position de la majorité des points à l'origine de l'échelle d'indice soutient la dominance de la dissolution des carbonates ou de l'altération des silicates calciques pour les eaux de la région. Dans les milieux silicatés, cette caractéristique est typique des eaux jeunes. Cependant, au sein de ce groupe, il est possible de suivre le cheminement de l'eau grâce à la relation entre l' $IS_{calcite}$  et les teneurs en silice et en TAC. Les points représentatifs des eaux les plus récentes n'ayant pas encore atteint l'équilibre avec la calcite, s'étendent sur une gamme d'indices allant de 2 à 8, tandis que les eaux à l'équilibre avec la calcite

s'étendent sur des valeurs comprises entre 6 et 10 (Figure 127). Le couplage du DEH et de ces représentations basées sur l' $IS_{\text{calcite}}$  permet d'obtenir des IRC allant de 1 à 6 pour les eaux au faciès bicarbonaté-calcique et des IRC de 6 à 10 pour les eaux plus évoluées. Pour les eaux en milieu carbonaté, les indices basés sur le DEH vont de 0 à 11 avec une majorité comprise entre 0 et 2, ce qui indiquerait des temps de transit assez courts également.

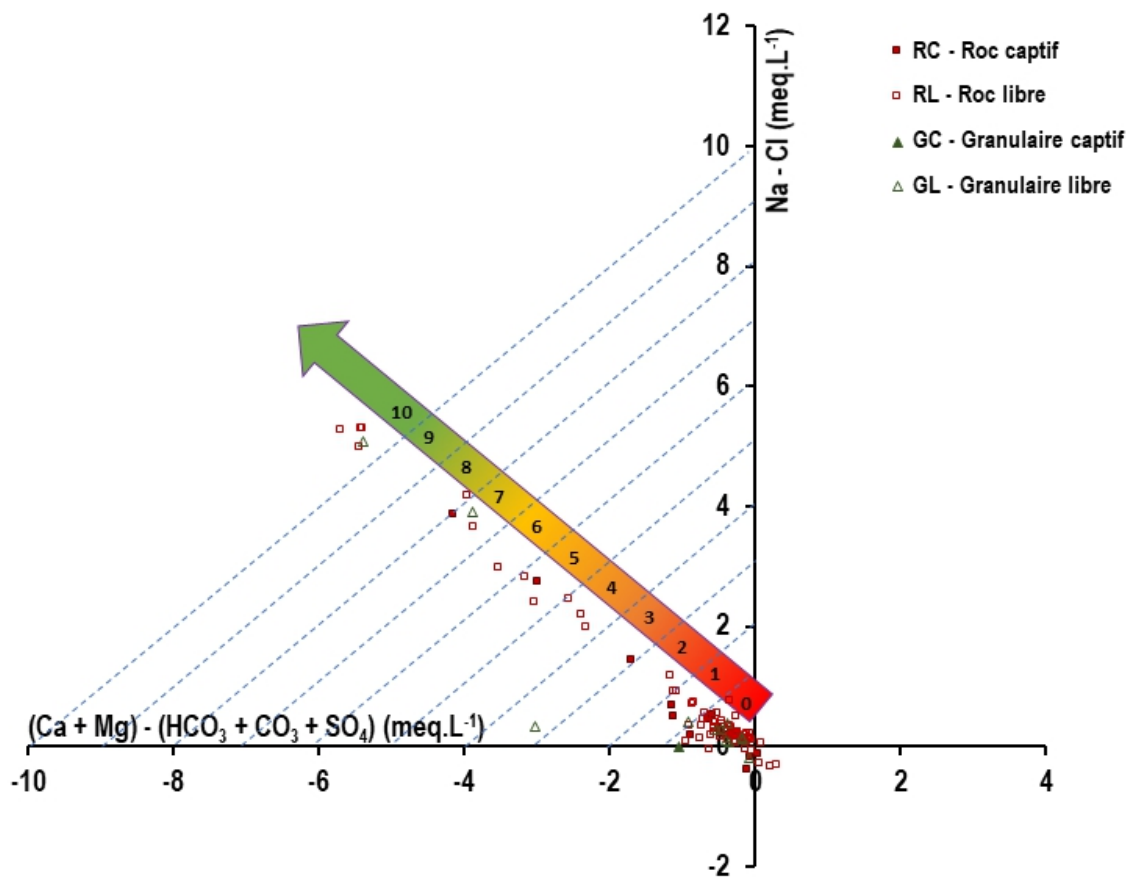
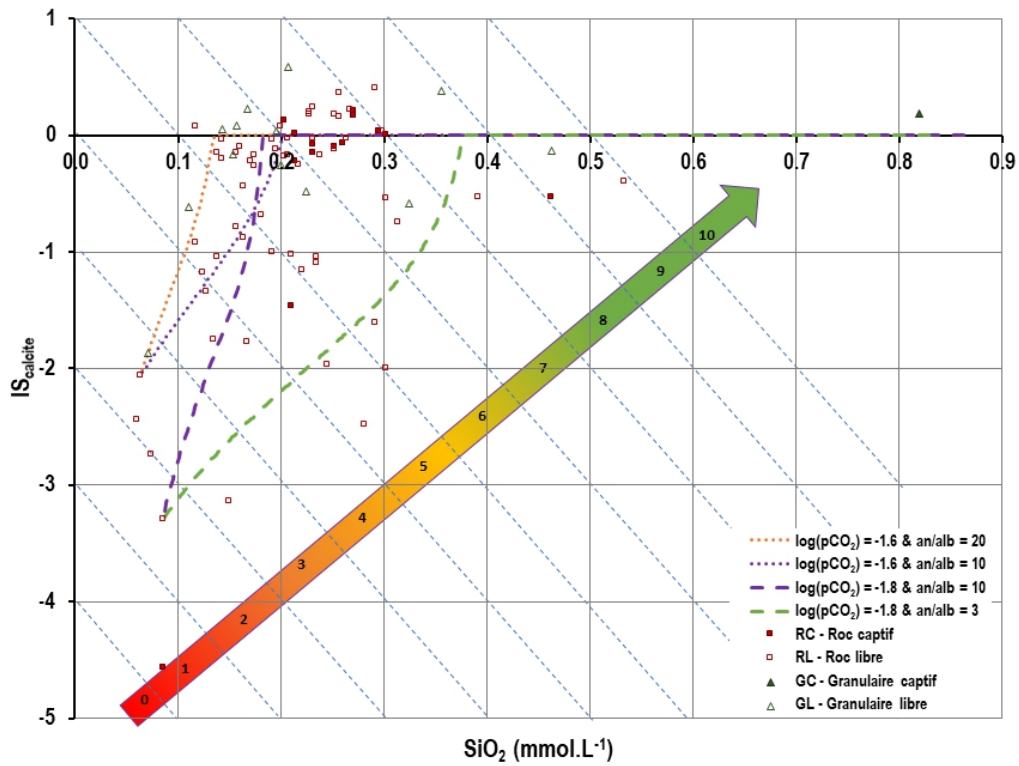
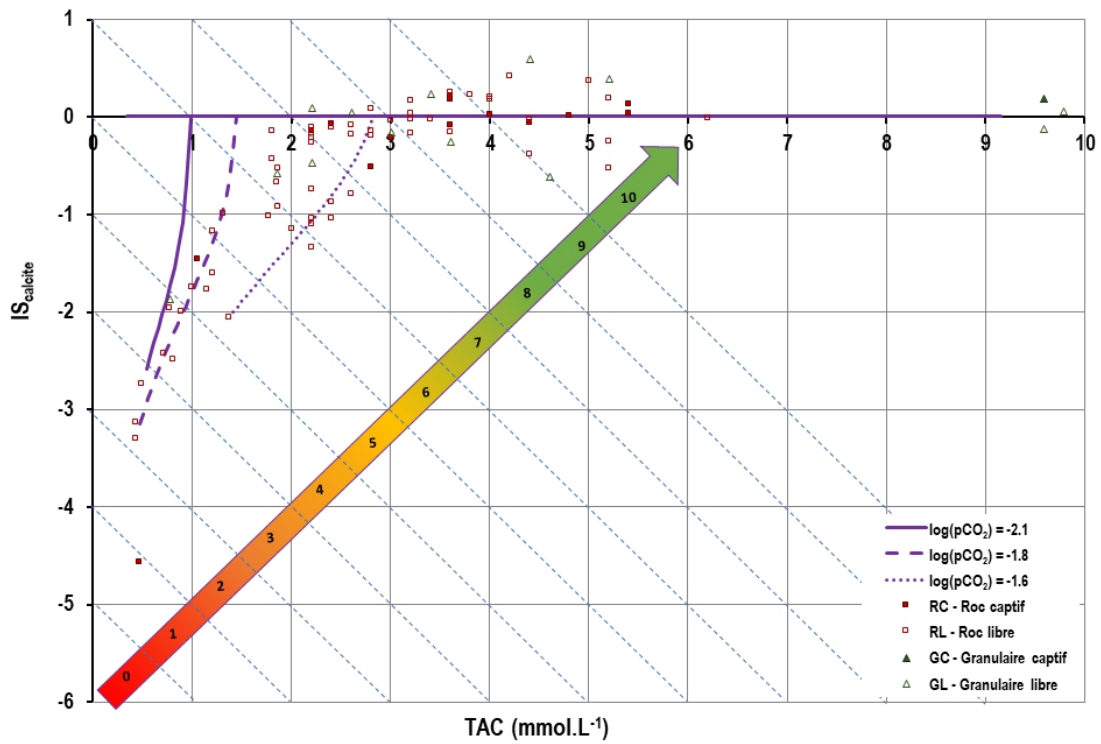


Figure 126: Faciès chimique des puits du PACES CA représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée



**a**



**b**

Figure 127: Saturations des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES CA (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

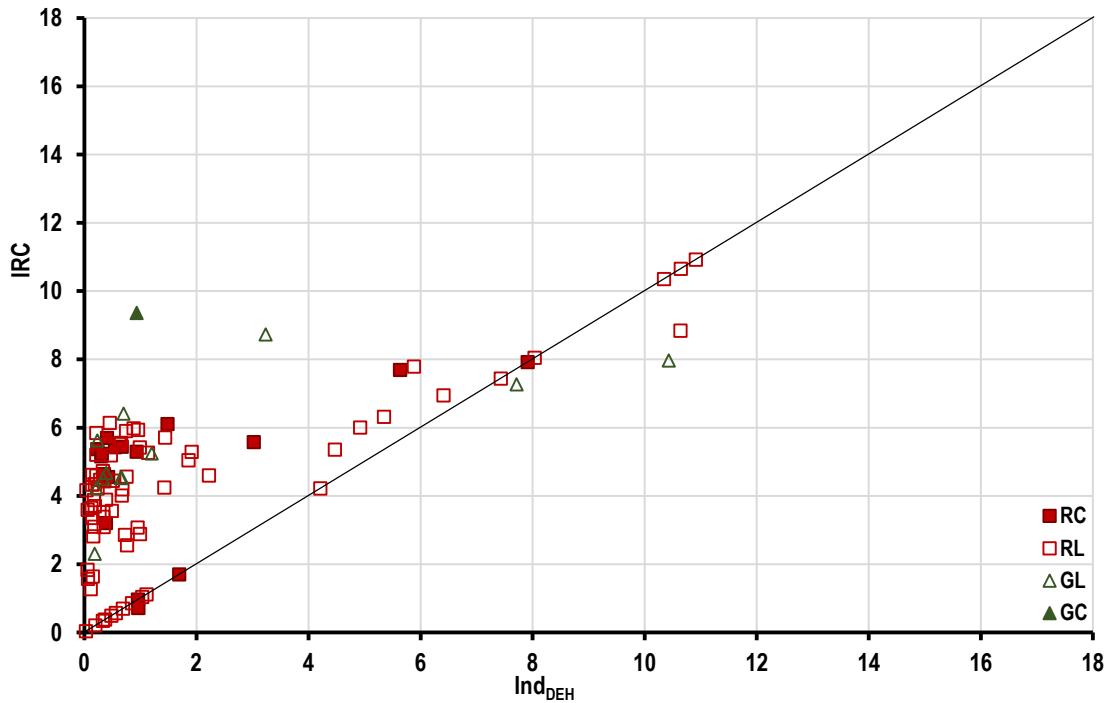


Figure 128: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

Sur le territoire de la région Chaudières-Appalaches, les indices DRASTIC sont plus homogènes que dans les régions voisines, avec des valeurs qui indiquent majoritairement une vulnérabilité moyenne (indices entre 100 et 170, Figure 128). Seules quelques différences entre les fonds de vallée moins vulnérables et les hauteurs plus vulnérables sont perceptibles. Les IRC sont quant à eux variés avec des ressources peu résistantes au centre de la carte (losanges et points rouges et oranges entourés de pointillés noirs, MRC Bellechasse, des Etchemins et Montmagny) et des ressources plus résistantes au bord du fleuve Saint-Laurent ainsi que dans la MRC des Appalaches au sud-ouest de la région (points et losanges verts). Dans cette région en particulier, les IRC paraissent plus sensibles que le DRASTIC en répartissant les masses d'eau prélevées sur une plus large gamme d'évolution, en lien avec le rapport entre la part de recharge locale et la part d'eau plus évoluée au droit de chaque puits. Par ailleurs, puisque les aquifères sont majoritairement libres dans la région, les variations locales de résistance (i.e. proximité entre les points oranges et verts dans la MRC des Appalaches, entourés de pointillés rouges) peuvent s'expliquer par l'interception de différentes lignes d'écoulement du même aquifère rocheux régional ou bien par des proportions d'eau de recharge locale différentes selon les secteurs.

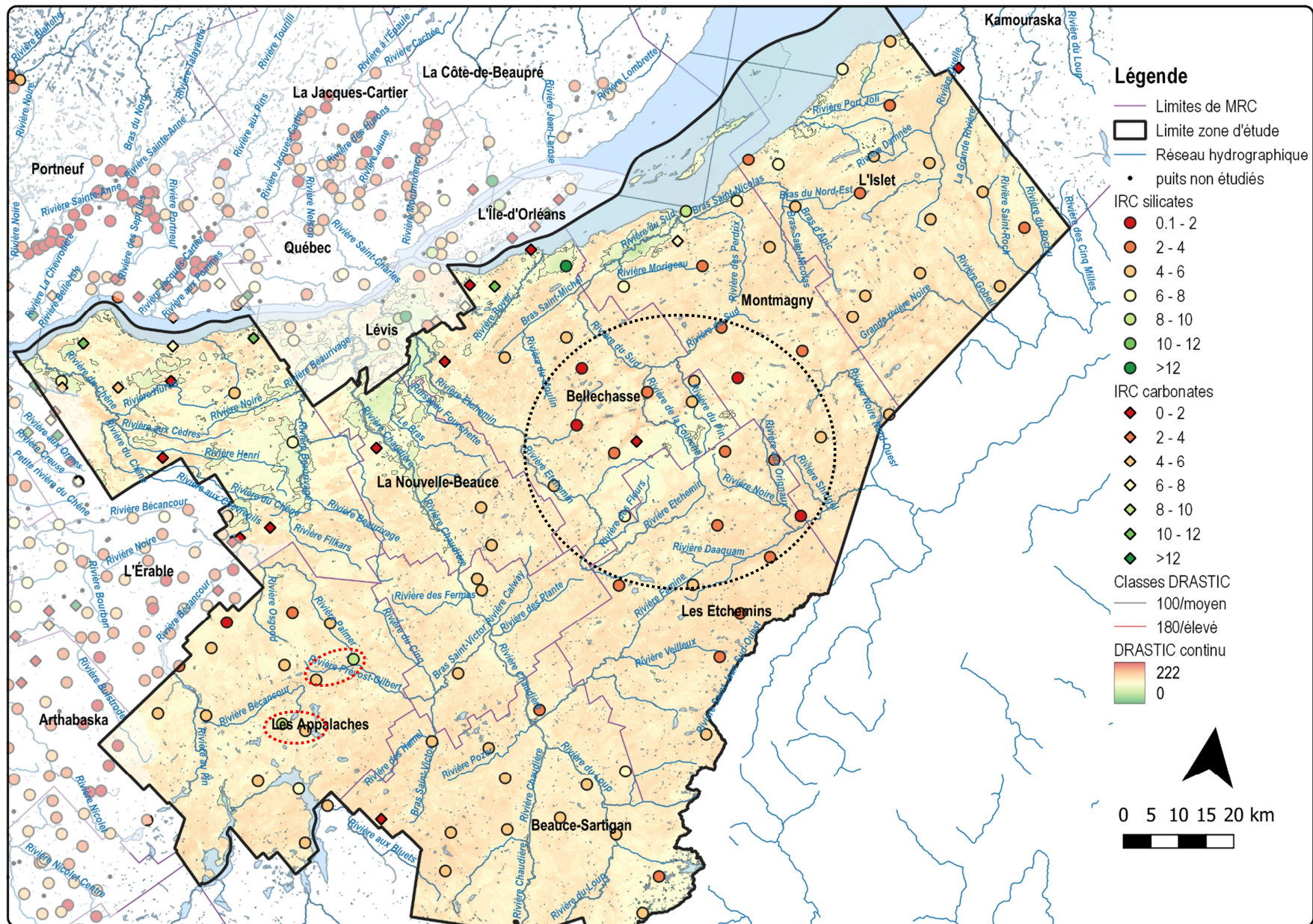


Figure 129: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES CA

### 3.2.6 Nord-Est du Bas Saint-Laurent (PACES NEBSL)

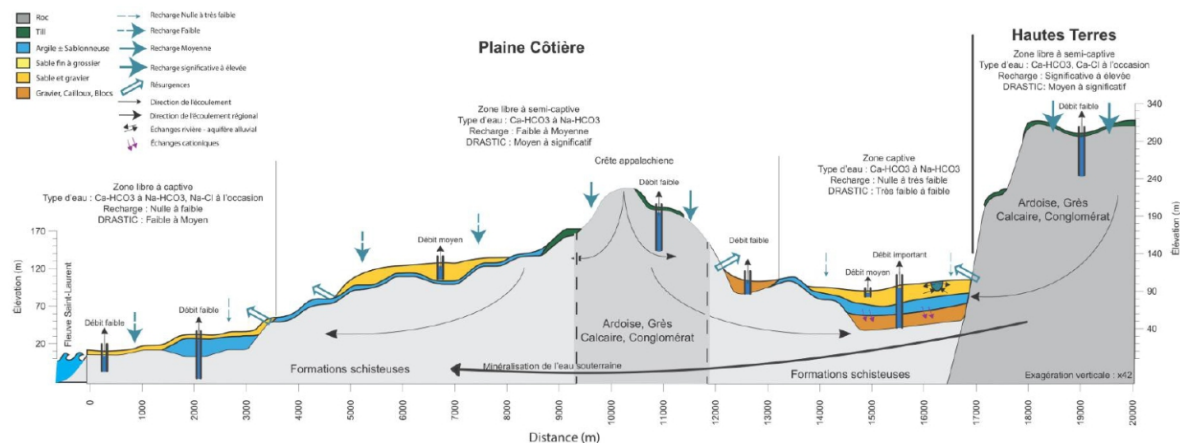
**Nombre de puits échantillonnés totaux de la BD-V1 : 165**

**Nombre de puits échantillonnés conservés dans la BD-V2 : 159**

**Nombre de puits échantillonnés conservés pour le calcul des indices de résistance : 125**

Le PACES Nord Est du Bas-Saint-Laurent couvre un territoire d'environ 4000 km<sup>2</sup> au sud du fleuve Saint-Laurent. Ce territoire est intégralement situé dans la Province géologique des Appalaches, qui y est séparée en deux zones distinctes par la faille normale Neigette. Au nord de cette faille le socle rocheux est constitué principalement de roches Cambro-Ordoviciennes en partie carbonatées (grès, schistes, siltite, calcaires, conglomérats...). Au sud de la faille, le socle rocheux est constitué de roches Siluro-Dévonniennes composées de mudrock, grès et calcaires. Au-dessus de ce socle, des dépôts meubles quaternaires se répartissent sur le territoire et sont regroupés en quatre grandes familles : les altérites, les sédiments glaciaires et fluvioglaciaires, les sédiments marins de la mer de Goldthwait et les dépôts glaciaires. Ils se retrouvent principalement dans les vallées et les dépressions lacustres ainsi que le long du fleuve à des topographies proches ou inférieures au niveau marin. Pour la caractérisation hydrogéologique, le territoire a été divisé en deux parties (Figure 130) :

- les Hautes-Terres qui constituent une zone de recharge préférentielle des aquifères rocheux à l’affleurement et alimentent par des flux souterrains profonds les aquifères rocheux et granulaires avec lesquels ils sont en interaction en contrebas.
- la Plaine Côtière, où s’alternent des secteurs de recharge et de décharge des eaux souterraines, avec la présence à l’affleurement des aquifères granulaires mais aussi des aquifères rocheux au niveau de la crête appalachienne.



**Figure 130: Coupe de synthèse du contexte hydrogéologique du PACES NEBSL (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015)**

Sur ce territoire, 1/3 des puits prélevés se situent dans des aquifères granulaires, tandis que les 2/3 restant sont dans le roc (Figure 131). La majorité (65 %) se trouve en contexte de nappe libre, seulement 13 % sont en milieu semi-captif et 22 % en milieu captif. D’un point de vue minéralogique, aucun puits ne prélève d’aquifère uniquement constitués de carbonates, mais 38 % prélèvent dans des aquifères mixtes et 50 % dans des aquifères silicatés. Les puits restants se situent dans des aquifères granulaires à la minéralogie indéterminée.

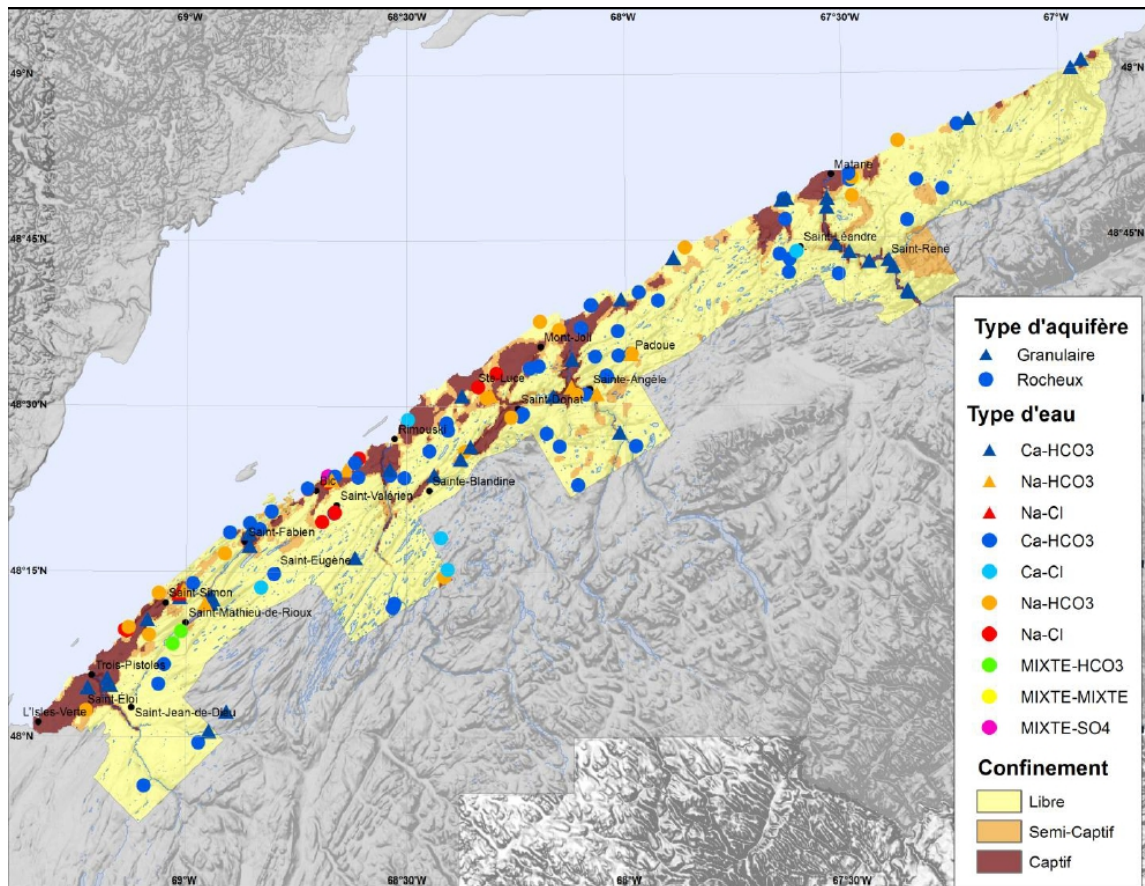


Figure 131: Spatialisation des types d'eau rencontrés dans les puits prélevés en fonction du type d'aquifère et des conditions de confinement du roc (Buffin-Bélanger et al., 2015)

La présence de roches carbonatées dans le roc au niveau des aires de recharge (Crête appalachienne et Hautes-Terres) permet à la dissolution de carbonates de s'imposer comme processus majoritaire de la minéralisation de la plupart des eaux de la région. Cette hypothèse est soutenue par un faciès des eaux très majoritairement bicarbonaté-calcique couplé à la saturation d'une grande partie des eaux analysées vis-à-vis de la calcite (Figure 131 ; Figure 132). Les eaux présentes dans les aquifères libres sont moins saturées que dans les aquifères captifs, démontrant une progression du processus d'équilibration avec les carbonates depuis les aires de recharge, vers les parties plus profondes. Dans le cas des aquifères silicatés, le faciès bicarbonaté-calcique résulte de l'altération des feldspaths calciques. Les eaux des aquifères indéterminés ont des indices de saturation très variés, autour d'une valeur médiane identique à celle des aquifères silicatés. Il est donc possible que la plupart soient dépourvus de carbonates.

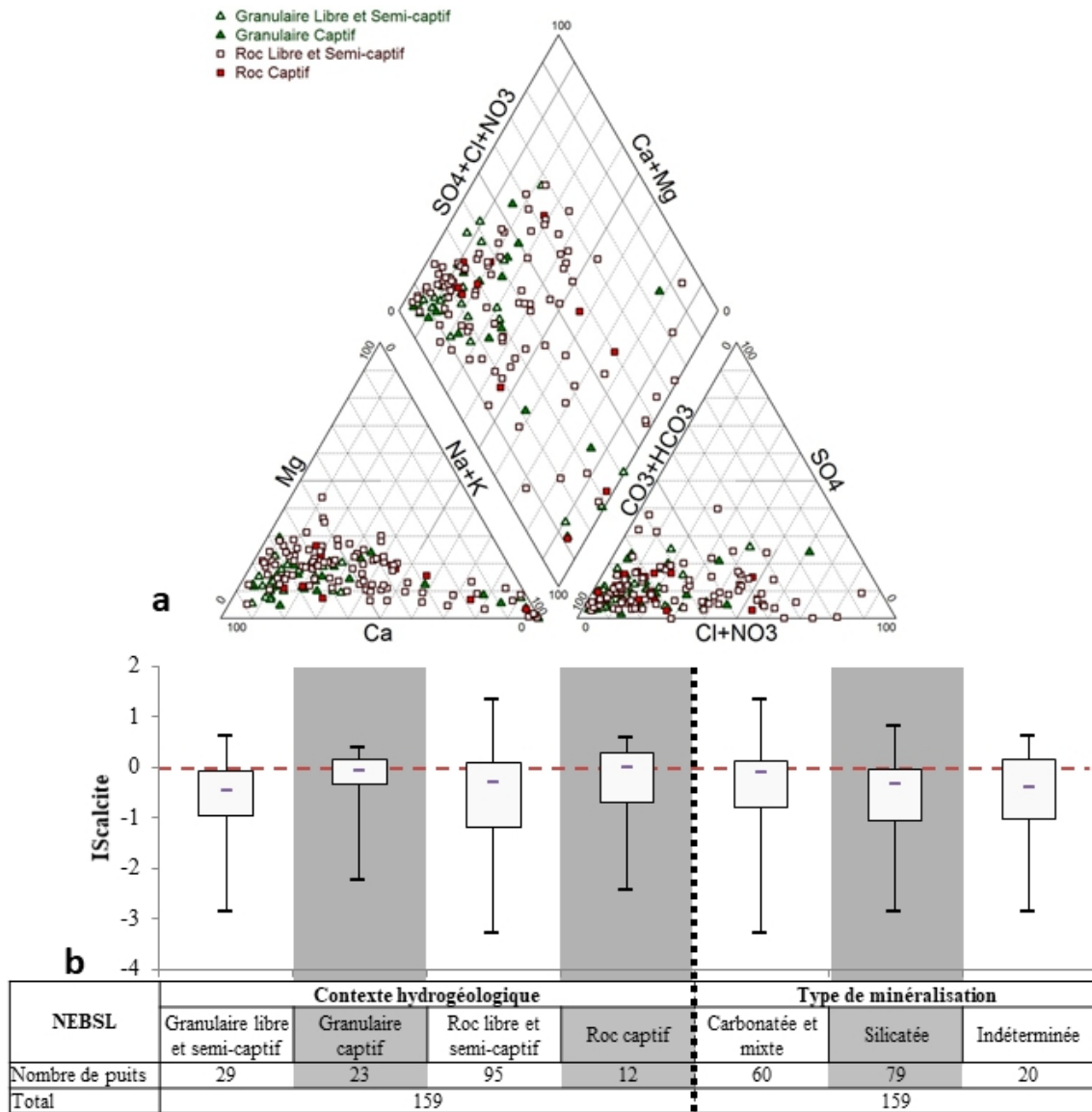


Figure 132 : Faciès géochimique des eaux de la région NEBSL représenté par un diagramme de PIPER (a) et analyse statistique des  $IS_{calcite}$  en fonction des contextes hydrogéologiques et du type de minéralisation rencontrés (b)

La répartition des points dans le DEH soutient la prédominance de la dissolution des carbonates ou de l'altération des silicates calciques pour la majorité des eaux puisque les points se retrouvent principalement à l'origine des axes du graphique (Figure 133). Un certain nombre de points illustrent l'évolution chimique associée au changement de processus dominant incluant l'altération des minéraux sodiques et l'échange cationique avec les argiles marines présentes dans la Plaine Côtière. La part significative de points évolués le long de l'échelle d'indice représentant des eaux des aquifères granulaires correspond bien au contexte géologique local où certains aquifères granulaires de la Plaine Côtière sont alimentés par des écoulements souterrains régionaux provenant des aquifères rocheux. Malgré leur extension locale, ces aquifères peuvent donc renfermer des eaux dont le temps de séjour moyen est plus long que s'ils étaient alimentés uniquement par la pluie directe.

Dans les milieux silicatés, l'hypothèse d'une alimentation régionale des aquifères granulaires est soutenue par la chimie des eaux, plus minéralisée que certaines nappes présentes dans le roc, mais qui n'ont pour autant pas encore toutes atteint la saturation vis-à-vis de la calcite, excluant par ce fait la



présence potentielle de minéraux carbonatés dans la matrice (Figure 134). La minéralisation globale de ces aquifères reste faible, illustrée par les teneurs en silice, reflétant des faibles taux d'altération des minéraux.

Les indices de résistance obtenus pour cette région sont dans l'ensemble assez faibles avec près des  $\frac{3}{4}$  des ressources étudiées ayant des indices inférieurs à 6 en milieu carbonaté comme en milieu silicaté (Figure 135). Les eaux les plus résistantes sont majoritairement en milieu silicaté.

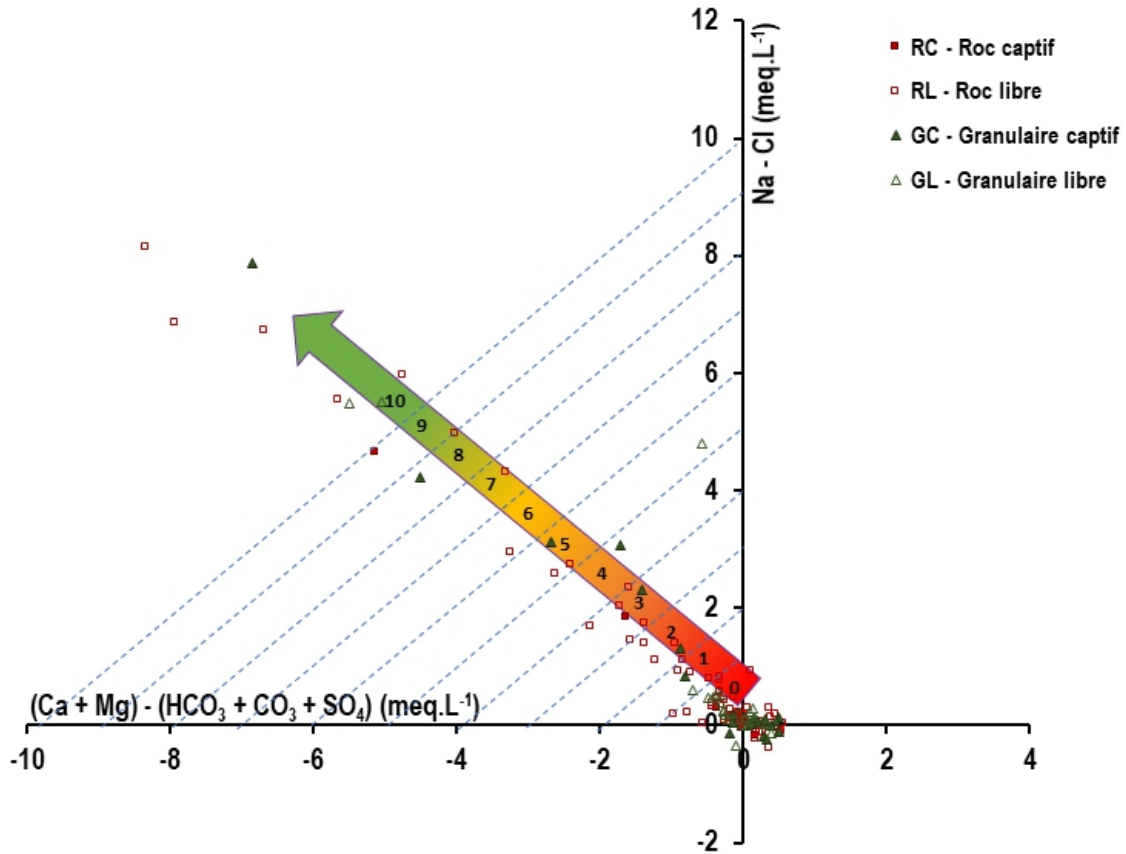


Figure 133: Faciès chimique des puits du PACES NEBSL représentés dans le DEH avec l'échelle d'indice de résistance associée

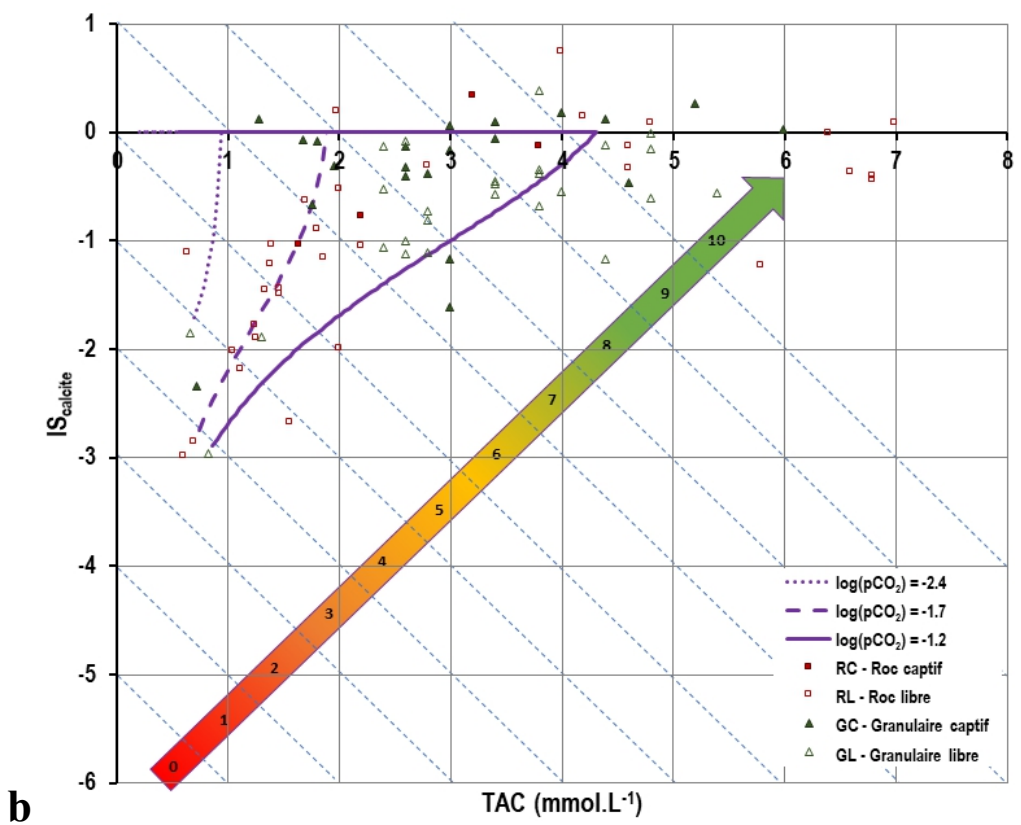
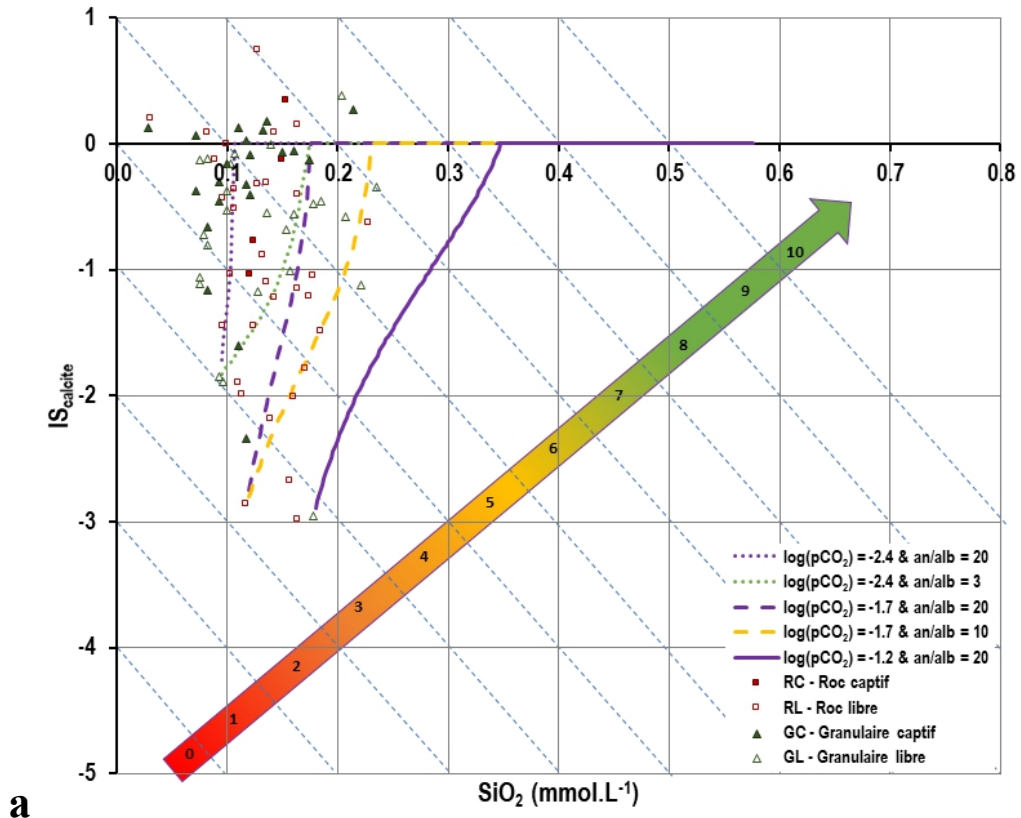


Figure 134: Saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite observées dans la région PACES NEBSL (points) et modélisées pour différents contextes géologiques sous PHREEQC (courbes) en fonction des teneurs en silice dissoute (a) et en TAC (b) avec leurs échelles de sous-indice de résistance

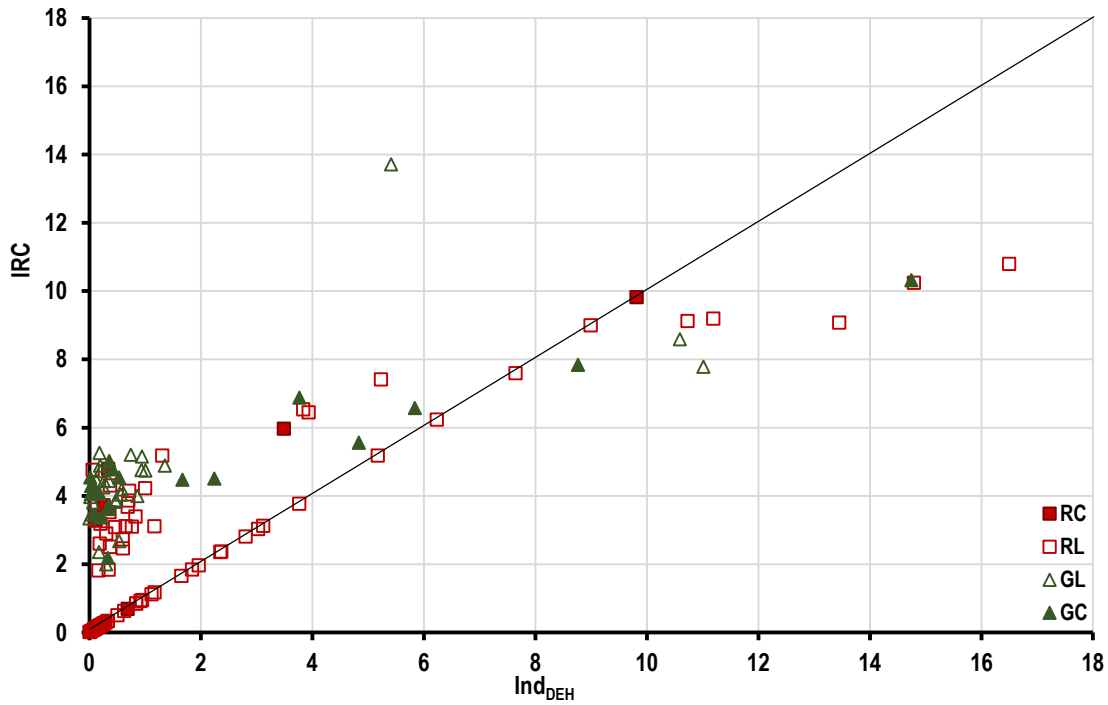


Figure 135: Comparaison des indices de résistance chimique calculés par la méthode globale (IRC) et par la méthode d'exploitation du DEH ( $Ind_{DEH}=IRC_{carbonates}$ )

Les ressources en eaux sont majoritairement peu résistantes (IRC faibles) quel que soit le secteur concerné, ce qui s'explique par la configuration très étroite de la région qui limite l'expansion des aquifères et donc les trajets de l'eau le long des lignes d'écoulements en souterrain (Figure 136). Dans les vallées, les ressources semblent plus résistantes que sur les Hautes-Terres où les eaux de recharge dominent largement la part de ressource exploitée. Sur certains secteurs de la MRC Les Basques, des IRC très variés se retrouvent dans la même zone locale caractérisée par un indice DRASTIC moyen (points entourés de pointillés noirs). Ce cas particulier pourrait s'expliquer par l'interception de lignes d'écoulements de différentes profondeurs d'une même ressource en eau. Plus la ligne interceptée est profonde, plus le temps de séjour moyen de l'eau est long et donc plus la résistance se retrouve importante.

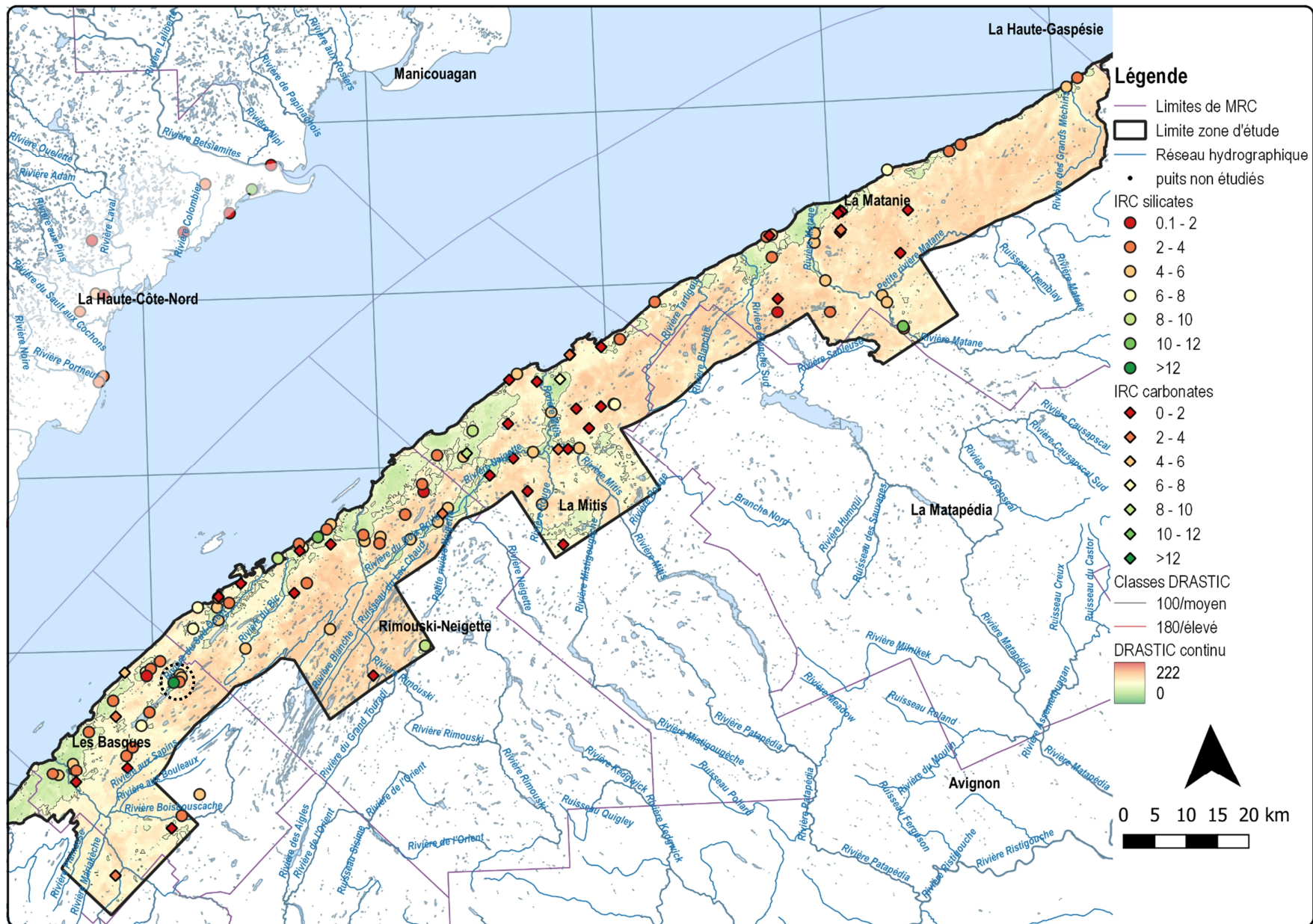


Figure 136: Carte comparative des indices de résistance chimique des ressources en eau (IRC) et de l'indice DRASTIC-PACES NEBSL

## 4 Discussion

### 4.1 Les grandes familles de systèmes aquifères

Le travail réalisé puits par puits sur les PACES a permis de tester les indices et discuter brièvement de la concordance des différents indicateurs avec la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de la région. Certaines familles de comportement ressortent de cette description, nous avons essayé de les faire transcrire dans cette partie du rapport.

#### **Aquifères granulaires de faible extension**

Qu'ils soient d'origine glaciaire, fluvio-glaciaire, glacio-marins ou deltaïques, les aquifères granulaires ont pour point commun une faible extension spatiale, un caractère limitant pour leur capacité de dilution des pollutions potentielles. Cela se traduit par des IRC moyens relativement faibles : 75 % des puits caractérisés présentent des IRC inférieurs à 6. Les eaux des aquifères granulaires libres, moins protégés, ont des IRC moyens de 3,6 contre 4,9 dans les aquifères granulaires captifs.

Trois régions dépendent principalement de ces aquifères granulaires pour leur alimentation en eau potable: la Mauricie (79 % des captages), la MRC de Portneuf (67 % des captages) et le Saguenay-Lac-Saint-Jean (53 % des captages). Dans ces régions, les IRC obtenus pour les eaux des aquifères granulaires sont respectivement en moyenne de 2,6, 2,0 et 3,4. La correspondance entre IRC et indices DRASTIC au droit des puits est assez bonne (Figure 67 ; Figure 74 ; Figure 88). Les circulations rapides dans les aquifères granulaires renforcent le poids des circulations et recharge en amont hydraulique dans le calcul de l'indice chimique. En considérant ce type de circulation, l'indice DRASTIC localisé au droit du captage ne semble pas être le meilleur indicateur. Il serait plus pertinent de considérer la distribution des indices DRASTIC sur l'ensemble de la zone d'alimentation du captage.

D'une façon générale, les aquifères granulaires situés au nord du fleuve Saint-Laurent sont significativement moins résistants (IRC moyens de 3,6) que les aquifères granulaires situés au sud (IRC moyens de 4,9). Cette distribution des IRC rend compte des modes d'alimentation (recharge) de ces aquifères. Au nord, dans la Province de Grenville, la plupart des aquifères granulaires exploités sont des aquifères superficiels où la pluie constitue la recharge principale. En revanche dans les Basses-Terres du Saint-Laurent situées au sud du fleuve, la part de recharge provient de flux souterrains des Hautes-Terres des Appalaches (drainance ascendante). Une particularité que l'on trace heureusement avec la chimie de l'eau des aquifères granulaires. Ainsi, pour les régions du sud du fleuve, l'eau issue des aquifères granulaires présente souvent des minéralisations plus avancées que l'eau de la plupart des puits des aquifères au roc qui les alimentent par drainance ascendante. Dans ce contexte, la méthode d'indice géochimique est parfaitement adaptée puisqu'elle permet de mettre en évidence l'impact des modes de recharge sur la résistance chimique des ressources.

En milieu granulaire, l'hydrogéologue anticipe une ressource en eau plus particulièrement vulnérable. Si l'absence de nitrate ne peut être un critère car leur répartition dépend des types d'activités sur les aires de recharge, leur présence est un indicateur potentiel de vulnérabilité. La comparaison avec les IRC des eaux des milieux granulaires montre que toutes les ressources ayant des teneurs en nitrates significatives ont des IRC entre 0 et 7 (Figure 137). Les teneurs en nitrates les plus élevées sont associées aux indices de résistance chimique les plus faibles, confirmant la pertinence de l'IRC.

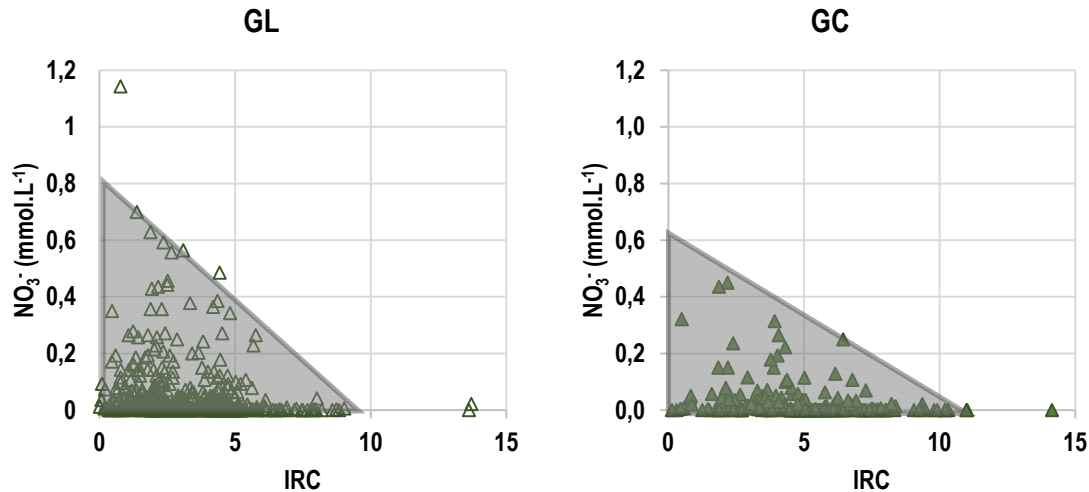


Figure 137 : Répartition des teneurs en nitrates dans les aquifères granulaires libres (à gauche) et captifs (à droite) des régions étudiées en fonction des IRC

#### Aquifères ayant les IRC les plus importants

Les aquifères au roc de la Plate-forme du Saint-Laurent se situent en aval hydraulique de tous les écoulements souterrains régionaux. Les eaux contenues dans ces aquifères devraient avoir les résistances les plus fortes, en raison de leurs longs parcours en milieu souterrain et des extensions régionales des nappes considérées.

Les régions situées majoritairement sur la Plate-forme du Saint-Laurent, à savoir Vaudreuil-Soulanges (VS), Basses-Laurentides (BL), Châteauguay (CH) et la Montérégie Est (ME), présentent en effet les eaux dont les IRC sont les plus élevés (maximums respectivement de 21,7, 17,9, 18,6 et 24,6, Figure 138). En raison de la présence d'aquifères granulaires locaux et de secteurs de recharge des aquifères au roc (collines Montérégiennes, Hautes-Terres des Appalaches...) ces régions montrent les gammes de variation d'IRC les plus importantes. Les IRC coïncident généralement bien avec les indices DRASTIC au droit des puits ou en amont hydraulique proche, confirmant les modèles conceptuels d'écoulement développés lors des PACES (Figure 51 ; Figure 58 ; Figure 101 ; Figure 108). Les seules exceptions correspondent aux puits pour lesquels une recharge forcée des aquifères par les activités humaines est suspectée (infiltration induite par l'irrigation agricole, filtration sur berge...) mais pour lesquels nous manquons d'information. Au niveau de l'impact des activités anthropiques sur les ressources en eau de ces quatre régions, le traceur le plus communément analysé reste les nitrates. Ces ions dissous se retrouvent dans les ressources aux IRC inférieurs à 7, ce qui est cohérent avec les observations réalisées sur les secteurs dominés par les ressources en eaux jeunes des aquifères granulaires (Figure 139). Il est à noter que du fait de l'échelle des figures, les hétérogénéités des indices DRASTIC ne sont pas toujours bien visibles (Figure 101 par exemple), et une lecture trop rapide pourrait induire le lecteur à penser que les deux familles d'indices ne s'accordent pas.

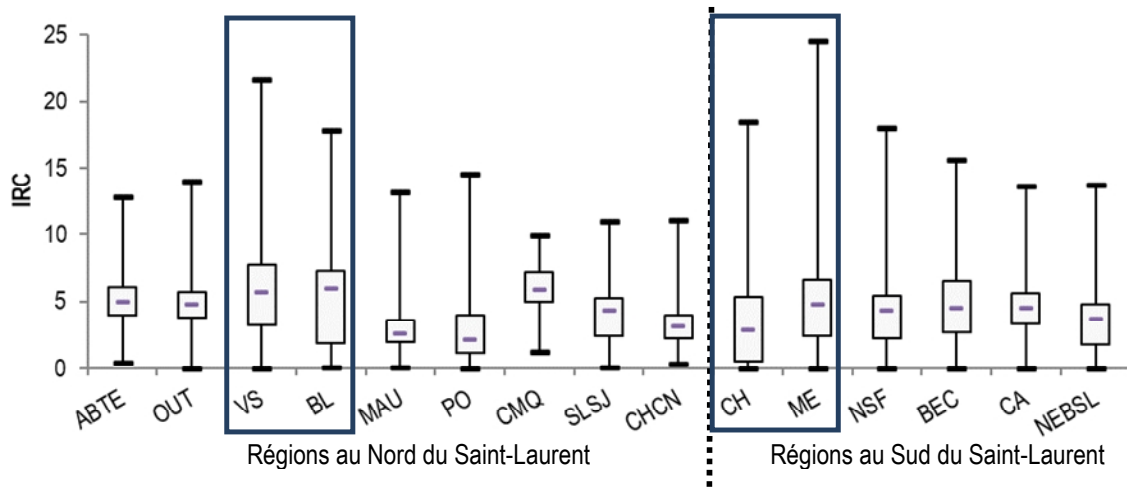


Figure 138: Répartition des gammes d'IRC par région étudiée

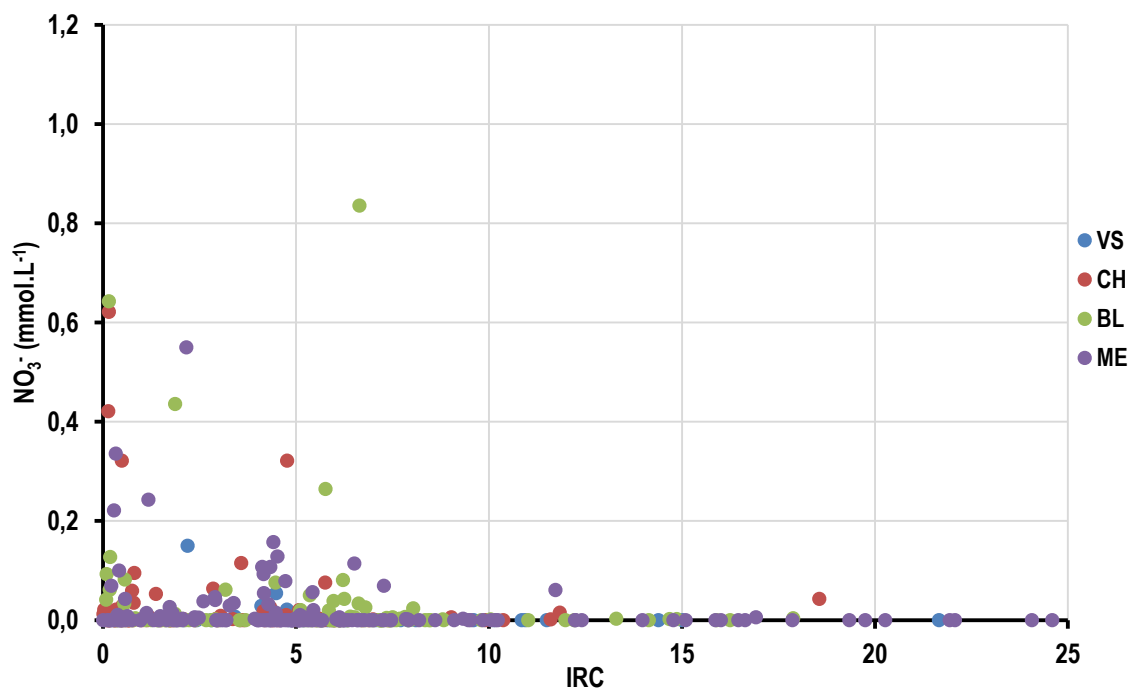


Figure 139: Évolution des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  dans les eaux souterraines en fonction des IRC calculés pour les régions contenant les lignes d'écoulement souterrain les plus longues

### Cas particuliers des puits en périphérie d'eaux de surfaces (rivières et lacs)

Dans le contexte québécois où le réseau hydrographique de surface est extrêmement développé, il existe une part significative de puits de la base de données se trouvant à proximité d'eau de surface (distance inférieure à 500 m entre les puits et les étangs, lacs ou rivières). Cette proximité est propice à une recharge des eaux souterraines par les eaux de surfaces, induite notamment par l'activité des puits, couramment nommée filtration sur berge (FSB, (Masse-Dufresne *et al.*, 2019)). Une étude récente basée sur du traitement de systèmes d'informations géographiques a permis de mettre en évidence la

fréquence de ces contextes au Québec, en particulier sur les secteurs des Basses-Laurentides, de Vaudreuil-Soulanges et de Nicolet-Saint-François (Patenaude *et al.*, 2020). Les eaux prélevées dans ces puits présentent des résistances faibles à moyennes (IRC compris entre 0 et 8), soutenant l'occurrence de cette recharge locale par les eaux de surfaces. L'approche géochimique de l'IRC paraît très pertinente dans ce contexte d'identification des sites soumis à la filtration sur berge. L'échelle de résistance, et sa variabilité temporelle, pourrait représenter un outil complémentaire d'estimation de la part de mélange des eaux souterraines et de surface au droit de ces puits.

## 4.2 Applicabilité et limites de la méthode d'indice de résistance géochimique

### Complémentarité des approches DRASTIC et IRC

La méthode DRASTIC est basée sur sept paramètres physiques des aquifères et des nappes (niveau piézométrique, recharge, type de sol, pente, perméabilité, lithologie de l'aquifère et impact de la zone non saturée). Chaque paramètre est défini spatialement pour obtenir une vision 1D verticale de la vulnérabilité de la nappe sous-jacente en un endroit donné. La plupart des paramètres pouvant être extrapolés entre deux puits, les cartes de vulnérabilité DRASTIC permettent d'identifier la vulnérabilité intrinsèque rapprochée autour de chaque puits et par interpolation, l'évolution de la vulnérabilité sur les aires de protection des puits (Figure 140).

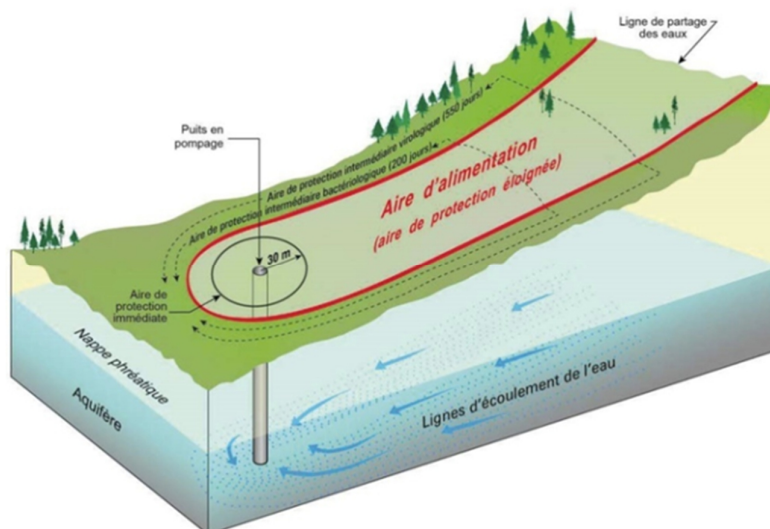


Figure 140 : Schéma de définition des aires de protection immédiate et éloignées des puits (MELCC)

Complémentaire à l'information donnée par DRASTIC, l'IRC donne une indication sur la distribution de la vulnérabilité héritée du parcours de l'eau au sein de la zone d'alimentation du captage. L'approche géochimique intègre l'évolution le long des lignes d'écoulement et la distribution des aires de recharges à proximité des puits étudiés. Lorsque les milieux sont hétérogènes (spatialement), il devient évident qu'une approche 1D verticale (DRASTIC) ne peut être comparée à une approche (2D) intégratrice de la distribution de la recharge et des écoulements (IRC). Pour aller de l'avant dans ce processus de comparaison des deux indices, il serait intéressant de travailler sur un indice DRASTIC intégré sur l'ensemble de l'aire d'alimentation des captages. Mais cette approche n'a pas pu être tentée avec les moyens à notre disposition dans le cadre de cette étude.



L'IRC est un indice sensible à des paramètres tels que l'intensité des déséquilibres eau – roche, les paramètres de forme (surfaces spécifiques, porosité efficace). Il est donc difficile de comparer les valeurs d'IRC d'un site à l'autre, les paramètres régissant les cinétiques de réaction chimique n'étant pas conservés.

### Exemples les plus cohérents pour l'utilisation des indices

Sur l'ensemble des étapes de traitement et de modélisation qui composent la méthode des indices de résistance chimique, les sites qui ont démontré la meilleure adéquation avec l'approche IRC sont le Saguenay-Lac-Saint-Jean, Charlevoix-Haute-Côte-Nord, MRC de Portneuf et la Bécancour. D'une part, ces 4 régions font parties de celles qui ont subi le moins de pertes lors des deux phases de tri de données, ce qui a permis de conserver une couverture spatiale maximale (Tableau 4). D'autre part, ces régions possédaient suffisamment de données sur les ressources les plus jeunes, permettant de contraindre de manière satisfaisante les modélisations et de valider l'approche géochimique. La prédominance des milieux silicatés a été un facteur facilitant complémentaire, et la représentativité de tous les types de contextes hydrogéologiques était maintenue.

**Tableau 4 : Bilan du nombre de puits conservés pour les calculs d'IRC par rapport aux données disponibles initialement pour chaque région étudiée**

	Région étudiée	Nombre de Puits			Taux de conservation
		BD-V1	BD-V2	IRC calculé	
<b>Rive Nord</b>	ABTE	424	417	401	95%
	OUT	139	128	102	73%
	VS	48	46	40	83%
	BL	146	142	122	84%
	MAU	243	153	128	53%
	PO	100	94	79	79%
	CMQ	129	105	90	70%
	SLSJ	283	277	238	84%
	CHCN	105	105	101	96%
<b>Rive Sud</b>	CH	144	130	103	72%
	ME	242	208	174	72%
	NSF	191	180	152	80%
	BEC	117	107	99	85%
	CA	125	114	104	83%
	NEBSL	165	159	125	76%

### Limites de la méthode

Dans la majorité des cas, la méthodologie développée dans ce projet est adaptée et cohérente avec les contextes locaux des puits autant qu'avec la perception des fonctionnements hydrogéologiques régionaux et des modes d'alimentation des différents aquifères. Il existe néanmoins des points de vigilance à considérer pour perfectionner la méthode.

Tout d'abord, la représentativité des puits est très importante, car elle permet de caractériser l'ensemble des ressources depuis les zones de recharges jusqu'aux secteurs profonds les plus en aval des aquifères. Dans certains secteurs tels qu'à Vaudreuil-Soulanges ou encore dans les Basses-Laurentides, le manque de données concernant les eaux les plus récentes n'a pas permis de réaliser les

modélisations permettant de valider l'impact des interactions eau – roche dans l'évolution de la chimie des eaux.

D'autre part, dans certaines régions comme la Communauté Métropolitaine de Québec ou la Mauricie, les puits échantillonnés sont concentrés dans les fonds de vallée, laissant une portion importante du territoire sans connaissance. Aujourd'hui, la connaissance acquise est centrée sur les secteurs d'activité, ce qui correspond aux enjeux actuels. Dans la perspective de la protection à long terme des ressources, et avec le contexte d'extension des zones urbaines que le Québec connaît, il est primordial de pouvoir compléter les cartes actuelles avec l'acquisition de données sur les secteurs non couverts par les puits de la base de données utilisée ici.

Enfin, dans les milieux carbonatés, la minéralisation des eaux est trop rapide pour permettre d'obtenir la même sensibilité (distribution de l'indice) sur les temps de parcours de l'eau dans les aquifères. La méthode actuelle permet de donner une appréciation sur les résistances minimales des ressources carbonatées, mais un décalage significatif est fréquemment observé entre les indices DRASTIC et les IRC. L'indice IRC est généralement plus pénalisant dans ce contexte, c'est-à-dire qu'il sous-estime la résistance de la masse d'eau.

Des données isotopiques additionnelles et complémentaires à la base de données actuelle ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ ) et/ou de traceurs de temps ( $^3\text{H}$ ,  $\text{SF}_6$ , CFCs) permettraient sûrement de renforcer la méthodologie en apportant des indications complémentaires sur la recharge des eaux et les conditions de minéralisation. À l'échelle de cette étude, ce travail prospectif n'a pas pu être réalisé, mais il serait recommandé de l'envisager pour l'ensemble des régions situées sur la Plate-forme du Saint-Laurent et la Province des Appalaches.

## 5 Conclusion

Sur les vingt dernières années, de nombreuses études ont été réalisées sur les ressources en eau du Québec afin d'acquérir les connaissances nécessaires à leur protection et leur gestion durable. La compréhension du fonctionnement des ressources en eau s'est améliorée mais de nombreuses incertitudes demeurent notamment sur l'occurrence des pollutions des eaux souterraines et leur cause. Pressentie comme une approche complémentaire aux outils couramment utilisés pour améliorer la caractérisation de la vulnérabilité des ressources en eau, la méthode d'indice géochimique testée sur le bassin versant de la Bécancour (Meyzonat *et al.*, 2016) a été reprise, développée et adaptée dans ce projet afin d'évaluer sa pertinence pour les régions du sud du Québec.

Pour ce faire, cette étude s'est basée sur une base de données géochimique du MELCC structurée par l'équipe de V. Cloutier nommée ici BD-V1. Cette base de données contenait 66 champs et 2608 puits analysés regroupant 13 projets PACES et 3 projets Pré-PACES. Cette base de données a été validée et modifiée par l'équipe de V. Cloutier afin de réaliser une synthèse géochimique à l'échelle du Québec.

Afin de rencontrer les objectifs spécifiques de la présente étude, un traitement des données géochimiques disponibles a été fait selon des critères propres à l'étude. Des incohérences dans certaines données ont nécessité de faire des homogénéisations (CE) et des corrections (température). Pour faciliter le traitement des analyses, des changements d'unités ont été réalisés (TAC,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ , HS). Un travail important sur le calcul des balances ioniques a été fourni pour tenter de conserver un maximum d'analyses tout en définissant les limites d'acceptabilité les plus pertinentes. À l'issue de cette étape, toutes les analyses qui comportaient des lacunes de données chimiques (pH, TAC, ions majeurs), ou bien une balance ionique supérieure à 10 % pour des minéralisations totales supérieures à  $200 \text{ mg.L}^{-1}$  ont été exclues. 244 échantillons, soit 9 % de la BD-V1 ont ainsi été écartés.

La nécessité d'exclure certaines données résulte potentiellement d'un contrôle insuffisant de la qualité des données au moment des prélèvements, ou de problèmes analytiques, de saisie, de transfert ou de regroupement. L'utilisation d'un outil tel que le logiciel libre Diagrammes (développé par le laboratoire d'hydrologie de l'université d'Avignon) permet un contrôle rapide de la qualité des résultats d'analyses. Des échanges les laboratoires accrédités seraient bénéfiques pour standardiser l'ajout des erreurs sur les mesures aux rapports officiels d'analyses.

L'adaptation de la méthode d'indice géochimique s'est appuyée sur les processus majeurs contrôlant la minéralisation de l'eau en milieu souterrain, à savoir (i) l'altération chimique des roches, (ii) la précipitation des minéraux, (iii) les échanges cationiques avec les argiles et (iv) les mélanges de masses d'eau. La caractérisation de l'impact combiné des quatre processus sur la chimie des eaux s'est basée sur le diagramme d'évolution chimique (DEH). Cette approche s'étant avérée peu sensible pour les eaux aux temps de séjour faibles, des outils complémentaires ont été développés, basés sur la dynamique d'altération des minéraux. L'impact de ce processus a pu être évalué dans les milieux silicatés par des modélisations (PHREEQC) reproduisant les évolutions chimiques des eaux en fonction (i) des  $p\text{CO}_2$  acquises lors de la recharge et (ii) des minéraux présents dans les aquifères. À l'exception des régions Vaudreuil-Soulanges et Basses-Laurentides, les modélisations ont pu être réalisées sur l'ensemble des secteurs étudiés pour valider les indices proposés. Les  $p\text{CO}_2$  rencontrées sont généralement comprises entre  $10^{-2.5}$  et  $10^{-1}$  mais peuvent atteindre localement des extrêmes tels que  $10^{-3.1}$  (Bécancour) et  $10^{-0.6}$  (Saguenay-Lac-Saint-Jean). La géologie des aquifères a été contrainte par le ratio entre anorthite et albite qui constituent les pôles calciques et sodiques des minéraux silicatés les plus sensibles à l'altération chimique. Ce ratio a varié de 3 pour les aquifères dominés par l'altération des minéraux sodiques à 30 pour aquifères dominés par l'altération des minéraux calciques. L'évolution de la minéralisation des eaux associées à ces modélisations a été suivie grâce à la mise en relation de l' $\text{IS}_{\text{calcite}}$  avec les teneurs en silice dissoute et en TAC. La modélisation réalisée sous PHREEQC a permis de confirmer la pertinence du calcul des sous-indices. Cette étape franchie, il ne sera pas nécessaire de poursuivre ces modélisations pour le calcul des indices sur de nouveaux captages dans ces régions à l'avenir.

L'indice de résistance chimique (IRC) obtenu s'est avéré pertinent sur l'ensemble des régions concernées. Souvent en concordance avec l'indice DRASTIC, il complète l'information DRASTIC en étant le reflet de l'impact de la distribution de la recharge et des écoulements sur la ressource en eau où qu'elle soit. De ce fait, il a notamment permis de mettre en évidence :

- (i) les ressources impactées par des secteurs de recharge en amont,
- (ii) l'impact des eaux de surface sur les puits situés à proximité,
- (iii) la différence des modes de recharge dominants des aquifères granulaires entre le nord et le sud du fleuve Saint-Laurent.

Grâce au couplage des sous-indices dans les milieux silicatés, l'IRC possède la sensibilité suffisante pour caractériser efficacement les ressources en eau des aquifères granulaires. Mais il reste pertinent aussi pour les eaux plus anciennes ayant fait un long trajet dans le milieu souterrain. Dans les régions soumises à une forte pression agricole, la comparaison des IRC avec les teneurs en nitrates a donné des résultats très satisfaisants.

L'utilisation de l'IRC est applicable dans tous les contextes hydrogéologiques à condition de veiller à la bonne qualité des données chimiques recueillies, et à la diversité des temps de séjour des eaux prélevées notamment sur les secteurs de recharge pour caler correctement les modèles. La répartition spatiale des puits est importante pour augmenter la représentativité des résultats obtenus. L'homogénéisation des retranscriptions d'informations sur les captages échantillonnés est primordiale

pour limiter les incertitudes sur les contextes hydrogéologiques des puits étudiés. Enfin, une attention accrue doit être portée sur les eaux faiblement minéralisées, fréquentes au Québec et pour lesquelles les incertitudes analytiques peuvent être très importantes. Les rapports d'incertitudes des instruments de mesure devraient être systématiquement associés aux résultats analytiques par les laboratoires et les erreurs reportées pour chaque type d'analyse, surtout si les balances ioniques ne sont pas satisfaisantes ( $|BI| > 5 \%$ ).

## 6 Bibliographie

### Données :

Environnement et Changement climatique Canada (2021) Réseau canadien d'échantillonnage des précipitations et de l'air (RCEPA), Toronto, Ontario, Canada. Fichier de données : AtmosphericPrecipitationChemistry-MajorIons-CAPMoN-AllSites-2015.csv, généré le 2017-05-09. Consulté le [2021-02-20] sur le portail du Gouvernement ouvert du Canada à l'adresse ouvert.canada.ca.

### Articles et livres :

- Adimalla, N., Qian, H. et Nandan, M. J. (2020, Dec 15). Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: A case study from hard rock terrain of south India. *Ecotoxicol Environ Saf*, 206, 111217. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111217
- Aller, L., Lehr, J., Petty, R. et Bennett, T. (1987). Drastic: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *Journal of the Geological Society of India*, 29(1), 23-37.
- Appelo, C. et Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* - 2nd edition. *CRC Press*, 649.
- Appelo, C. A. J. et Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution* CRC press.
- Arnoux, M., Barbecot, F., Gibert-Brunet, E., Gibson, J. et Noret, A. (2017a). Impacts of changes in groundwater recharge on the isotopic composition and geochemistry of seasonally ice-covered lakes: insights for sustainable management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5875-5889. doi: 10.5194/hess-21-5875-2017
- Arnoux, M., Barbecot, F., Gibert-Brunet, E., Gibson, J., Rosa, E., Noret, A. et Monvoisin, G. (2017b). Geochemical and isotopic mass balances of kettle lakes in southern Quebec (Canada) as tools to document variations in groundwater quantity and quality. *Environmental Earth Sciences*, 76(3). doi: 10.1007/s12665-017-6410-6
- Barbecot, F. (2020a). Renforcement de la protection des puits municipaux en lien avec l'utilisation de pesticides. *Rapport bibliographique, GEOTOP-UQAM*, 66p.
- Barbecot, F. (2020b). Renforcement de la protection des puits municipaux en lien avec l'utilisation de pesticides. *Rapport prospectif, UQAM - GEOTOP*, 28p.
- Beaudry, C., Lefebvre, R., Rivard, C. et Cloutier, V. (2018). Conceptual model of regional groundwater flow based on hydrogeochemistry (Montérégie Est, Québec, Canada). *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(2), 152-172. doi: 10.1080/07011784.2018.1461579
- Blanchette, D. (2006). *Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada*. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

- Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M. et Cloutier, V. (2010). Groundwater Quality, Geochemical Processes and Groundwater Evolution in the Chateauguay River Watershed, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 503-526. doi: 10.4296/cwrj3504503
- Bondu, R., Cloutier, V., Rosa, E. et Roy, M. (2019). Synthèse Géochimique - Rapport final. *Rapport déposé au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques*, 34.
- Bondu, R., Cloutier, V., Rosa, E. et Roy, M. (2020). An exploratory data analysis approach for assessing the sources and distribution of naturally occurring contaminants (F, Ba, Mn, As) in groundwater from southern Quebec (Canada). *Applied Geochemistry*, 114. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.104500
- Brantley, S. L., Kubicki, J. D. et White, A. F. (2008). *Kinetics of water-rock interaction* (vol. 168) Springer.
- Buffin-Bélanger, T., Chaillou, G., Cloutier, C.-A., Touchette, M., Héту, B. et McCormack, R. (2015). Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) : Rapport final. 199.
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., . . . Lavoie, D. (2013). Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. *Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R1433*, 283.
- CERM-PACES. (2013). Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la région Saguenay-Lac-Saint-Jean. . *Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi.*, 248.
- CERM-PACES. (2015). Résultats du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines des territoires municipalisés de Charlevoix, de Charlevoix-Est et de La Haute-Côte-Nord. *Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi.*, 294.
- Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes* CRC press.
- Cloutier, V. (2004). Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des basses terres du Saint Laurent, Québec, Canada. *Thèse de doctorat, INRS-Eau, Terre & Environnement, Québec, Canada.*
- Cloutier, V., Blanchette, D., Dallaire, P.-L., Nadeau, S., Rosa, E. et Roy, M. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1). *Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P001. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*, 135.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M. M., Bourque, É. et Therrien, R. (2006). Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 573-590. doi: 10.1007/s10040-005-0002-3

- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M. M. et Therrien, R. (2009). Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 59(5), 977-994. doi: 10.1007/s12665-009-0091-8
- Cloutier, V., Rosa, E., Nadeau, S., Dallaire, P.-L., Blanchette, D. et Roy, M. (2015). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2). *apport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P002.R3. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*, 313.
- Corcho Alvarado, J. A., Barbecot, F. et Purtschert, R. (2008). Ambient vertical flow in long-screen wells: a case study in the Fontainebleau Sands Aquifer (France). *Hydrogeology Journal*, 17(2), 425-431. doi: 10.1007/s10040-008-0383-1
- Darling, W. G., Gooddy, D. C., MacDonald, A. M. et Morris, B. L. (2012). The practicalities of using CFCs and SF6 for groundwater dating and tracing. *Applied Geochemistry*, 27(9), 1688-1697. doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.005
- Dauphiné, A. et Provitolo, D. (2013). *Risques et catastrophes: Observer, spatialiser, comprendre, gérer* Armand Colin.
- Domenico, P. A. et Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (vol. 506) Wiley New York.
- Ghesquière, O., Walter, J., Chesnaux, R. et Rouleau, A. (2015, 2015/09/01/). Scenarios of groundwater chemical evolution in a region of the Canadian Shield based on multivariate statistical analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 246-266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.004>
- Gillon, M., Barbecot, F., Gibert, E., Corcho Alvarado, J. A., Marlin, C. et Massault, M. (2009). Open to closed system transition traced through the TDIC isotopic signature at the aquifer recharge stage, implications for groundwater 14C dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(21), 6488-6501. doi: 10.1016/j.gca.2009.07.032
- Gillon, M., Barbecot, F., Gibert, E., Plain, C., Corcho-Alvarado, J. A. et Massault, M. (2012). Controls on 13C and 14C variability in soil CO2. *Geoderma*, 189-190, 431-441. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.06.004
- Gooddy, D. C., Darling, W. G., Abesser, C. et Lapworth, D. J. (2006). Using chlorofluorocarbons (CFCs) and sulphur hexafluoride (SF6) to characterise groundwater movement and residence time in a lowland Chalk catchment. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), 44-52. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.011
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*.
- Larocque, M., Gagne, S., Barnetche, D., Meyzonnat, G., Graveline, M.-H. et Ouellet, M.-A. (2015a). Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. *Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*, 258.

- Larocque, M., Gagne, S., Tremblay, L. et Meyzonnat, G. (2013). Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport Final. *Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs*, 219.
- Larocque, M., Meyzonnat, G., Ouellet, M.-A., Graveline, M.-H., Gagne, S., Barnetche, D. et Dormer, S. (2015b). Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil Soulanges *Rapport scientifique. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques*, 202.
- Larose-Charette, D., Lefebvre, R., Fagnan, N., Michaud, Y. et Therrien, R. (2000). *Groundwater flow dynamics in unconfined deltaic aquifers of the Portneuf area, Quebec, Canada*
- Leblanc, Y., Légaré, G., Lacasse, K., Parent, M. et Campeau, S. (2013). Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie. *Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières*, 134.
- Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., . . . Molson, J. (2015). Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. *Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015*, 246.
- Légaré-Couture, G., Leblanc, Y., Parent, M., Lacasse, K. et Campeau, S. (2017). Three-dimensional hydrostratigraphical modelling of the regional aquifer system of the St. Maurice Delta Complex (St. Lawrence Lowlands, Canada). *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(2), 92-112. doi: 10.1080/07011784.2017.1316215
- Margat, J. et Van der Gun, J. (2013). *Groundwater around the world: a geographic synopsis* Crc Press.
- Masse-Dufresne, J., Baudron, P., Barbecot, F., Patenaude, M., Pontoreau, C., Proteau-Bédard, F., . . . Barbeau, B. (2019). Anthropogenic and Meteorological Controls on the Origin and Quality of Water at a Bank Filtration Site in Canada. *Water*, 11(12). doi: 10.3390/w11122510
- MDDELCC, Direction générale des politiques de l. e. Direction de l. aménagement et des eaux s. (2015). *Couverture territoriale du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)*.
- Méjean, P., Pinti, D. L., Larocque, M., Ghaleb, B., Meyzonnat, G. et Gagné, S. (2016). Processes controlling 234 U and 238 U isotope fractionation and helium in the groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec: The potential role of natural rock fracturing. *Applied Geochemistry*, 66, 198-209. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.12.015
- Meyzonnat, G. (2012). *Estimation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc de la zone Bécancour (Centre-du-Québec)* Université du Québec à Montréal.



- Meyzonnat, G., Barbecot, F., Alazard, M. et McCormack, R. (2018a). La richesse de la ressource en eau du Québec. *Géologues*, 198, 69-75.
- Meyzonnat, G., Barbecot, F., Corcho-Alvarado, J. A., Tognelli, A., Zeyen, H., Mattei, A. et McCormack, R. (2018b). High-Resolution Wellbore Temperature Logging Combined with a Borehole-Scale Heat Budget: Conceptual and Analytical Approaches to Characterize Hydraulically Active Fractures and Groundwater Origin. *Geofluids*, 2018, 1-19. doi: 10.1155/2018/9461214
- Meyzonnat, G., Larocque, M., Barbecot, F., Pinti, D. L. et Gagné, S. (2016). The potential of major ion chemistry to assess groundwater vulnerability of a regional aquifer in southern Quebec (Canada). *Environmental Earth Sciences*, 75(1). doi: 10.1007/s12665-015-4793-9
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2013). Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Gouvernement du Québec, Direction de la politique sur les eaux souterraines. . <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>
- Montcoudiol, N., Molson, J., Lemieux, J. M. et Cloutier, V. (2015). A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution in the southern Outaouais Region, Québec, Canada. *Applied Geochemistry*, 58, 62-77. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.007
- November, V. (2006). Le risque comme objet géographique. *Cahiers de géographie du Québec*, 50(141). doi: 10.7202/014868ar
- NRTEE, Canada National Round Table on the Environment and the E. (2010). *Changing Currents: Water sustainability and the future of Canada's natural resource sectors* Ottawa: NRTEE.
- Parkhurst, D. L. et Appelo, C. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report*, 99(4259), 312.
- Parkhurst, D. L. et Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations* (6-A43). [Report]. Reston, VA : Récupéré de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A43>
- Patenaude, M., Baudron, P., Labelle, L. et Masse-Dufresne, J. (2020). Evaluating Bank-Filtration Occurrence in the Province of Quebec (Canada) with a GIS Approach. *Water*, 12(3). doi: 10.3390/w12030662
- Protection des captages : la connaissance de l'âge de l'eau, une donnée clef. (2021). *Actu-environnement le Mensuel*, 410, 22-23.
- Rajput, H., Goyal, R. et Brighu, U. (2020). Modification and optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability and contamination risk assessment for Bhiwadi region of Rajasthan, India. *Environmental Earth Sciences*, 79(6). doi: 10.1007/s12665-020-8874-z

- Romero-Mujalli, G., Hartmann, J., Börker, J., Gaillardet, J. et Calmels, D. (2019). Ecosystem controlled soil-rock pCO<sub>2</sub> and carbonate weathering – Constraints by temperature and soil water content. *Chemical Geology*, 527. doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.01.030
- Rousseau, A. N., Mailhot, A., Slivitzky, M., Villeneuve, J.-P., Rodriguez, M. J. et Bourque, A. (2004). Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec Niveau des connaissances et axes de recherche privilégier dans une perspective de changements climatiques. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 29(2), 121-134.
- Saby, M., Larocque, M., Pinti, D. L., Barbecot, F., Sano, Y. et Castro, M. C. (2016). Linking groundwater quality to residence times and regional geology in the St. Lawrence Lowlands, southern Quebec, Canada. *Applied Geochemistry*, 65, 1-13. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.10.011
- Simler, R. (2020). Diagrammes (Version 6.7) [Logiciel]. <http://www.lha.univ-avignon.fr/>
- Talbot Poulin, M. C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M. M., Lemieux, J. M., . . . Bérubé, S. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final. *souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013,*, 172.
- Vautour, G., Pinti, D. L., Méjean, P., Saby, M., Meyzonnat, G., Larocque, M., . . . Sano, Y. (2015, 2015/10/15/). 3H/3He, 14C and (U–Th)/He groundwater ages in the St. Lawrence Lowlands, Quebec, Eastern Canada. *Chemical Geology*, 413, 94-106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.08.003>
- Walter, J., Chesnaux, R., Cloutier, V. et Gaboury, D. (2017). The influence of water/rock – water/clay interactions and mixing in the salinization processes of groundwater. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 168-188. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.07.004
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L. et Alley, W. M. (1998). *Ground water and surface water: A single resource* (1139). [Report]. Récupéré de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1139>
- Zeebe, R. E. et Wolf-Gladrow, D. (2001). *CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes* Gulf Professional Publishing.