

Caractérisation de la géochimie des eaux souterraines et des facteurs la contrôlant dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord



Ombeline GHESQUIÈRE

Directeur : Romain CHESNAUX

Co-directeur : Alain ROULEAU

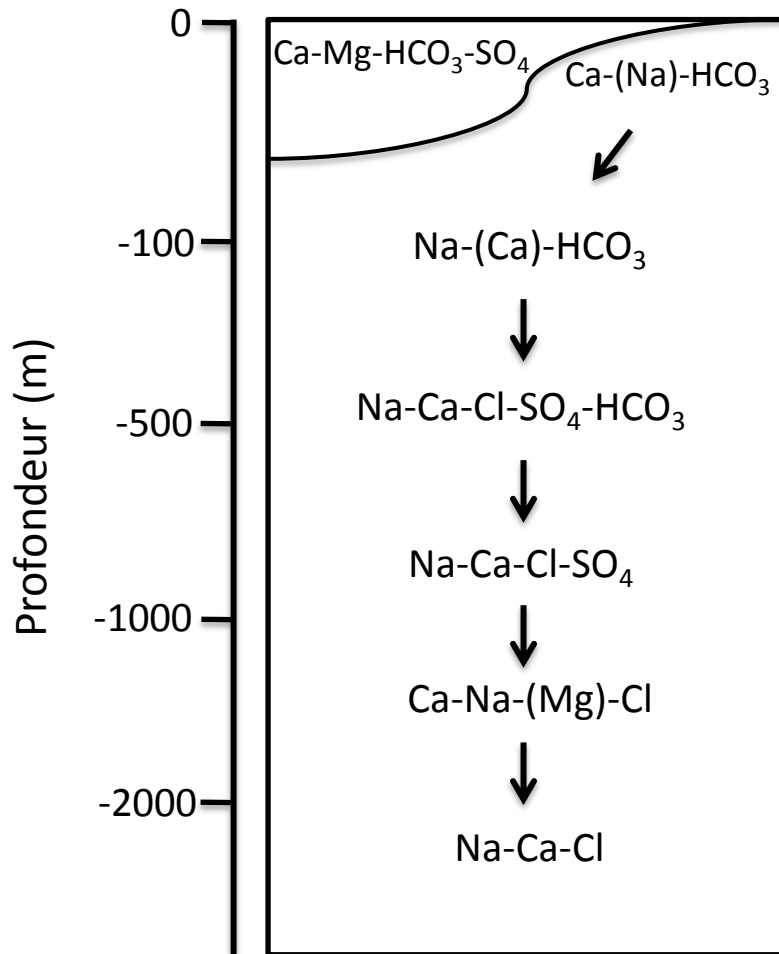
25 mai 2015



Association francophone
pour le savoir

A c f a s

INTRODUCTION : La caractérisation hydrogéochimique de l'eau souterraine



Évolution géochimique de l'eau souterraine en fonction de la profondeur dans les roches cristallines (modifié de Gascoyne et Kamineni, 1994).

- Le **facies chimique** des eaux souterraines répond à un **déterminisme** en partie dû à la **nature lithologique** des aquifères et des terrains superficiels traversés par l'eau (*Blum et al., 2011*).
- La caractérisation hydrogéochimique d'un système aquifère implique la **caractérisation géochimique** et **isotopique** de l'eau souterraine, ainsi que des différents **facteurs** inhérents à son cheminement qui peuvent influencer sa composition (*Blum et al., 2011*).
- La mise en relation de la **caractérisation hydrogéochimique** des eaux souterraines et du **contexte hydrogéologique** permettrait une meilleure caractérisation des eaux souterraines, de leur **système d'écoulement** et de leur **évolution**.

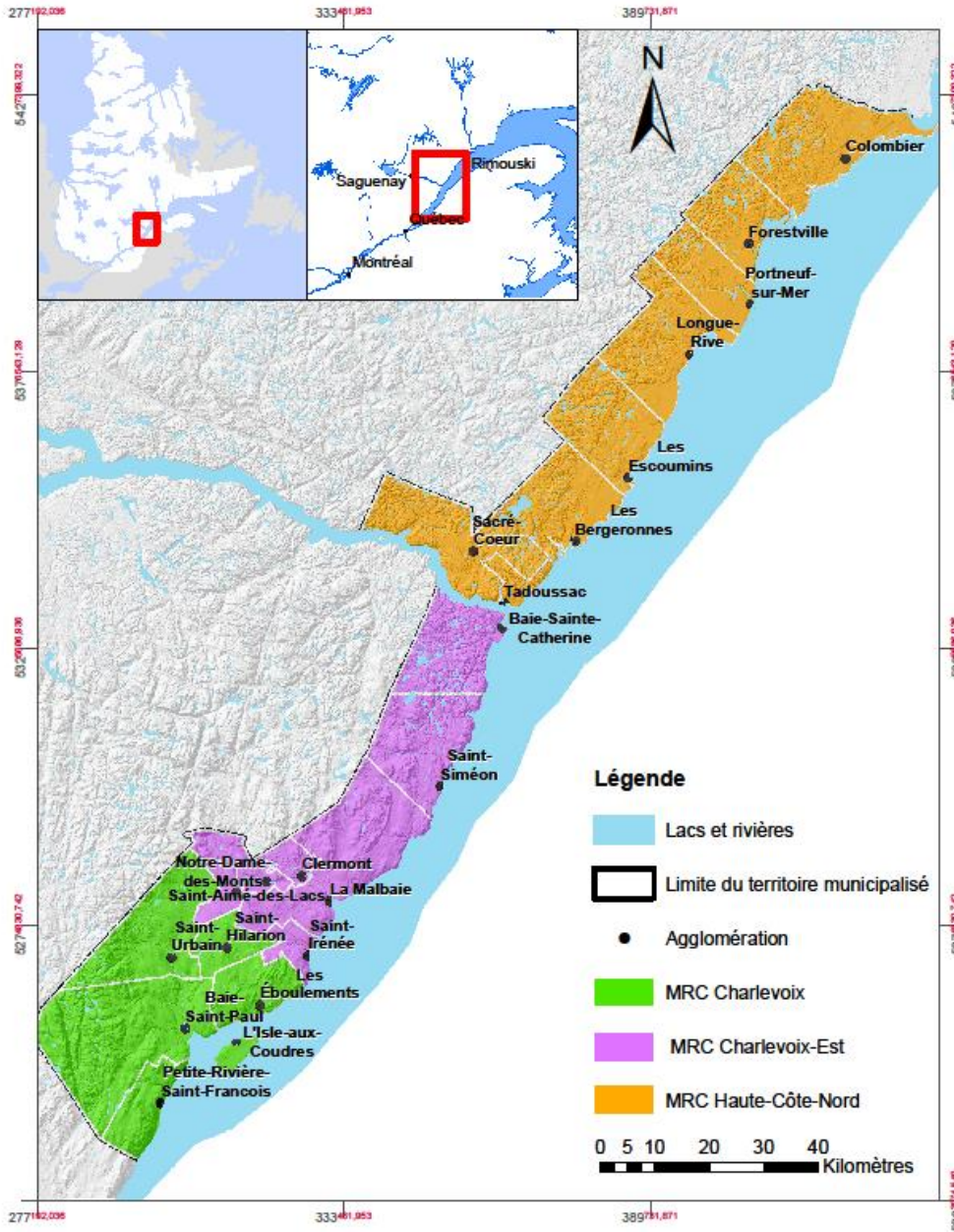
Problématique : Comment mettre en évidence la relation entre le contexte hydrogéologique et la géochimie des eaux souterraines dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord ?

Caractérisation **géologique** et **géomorphologique** des régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord

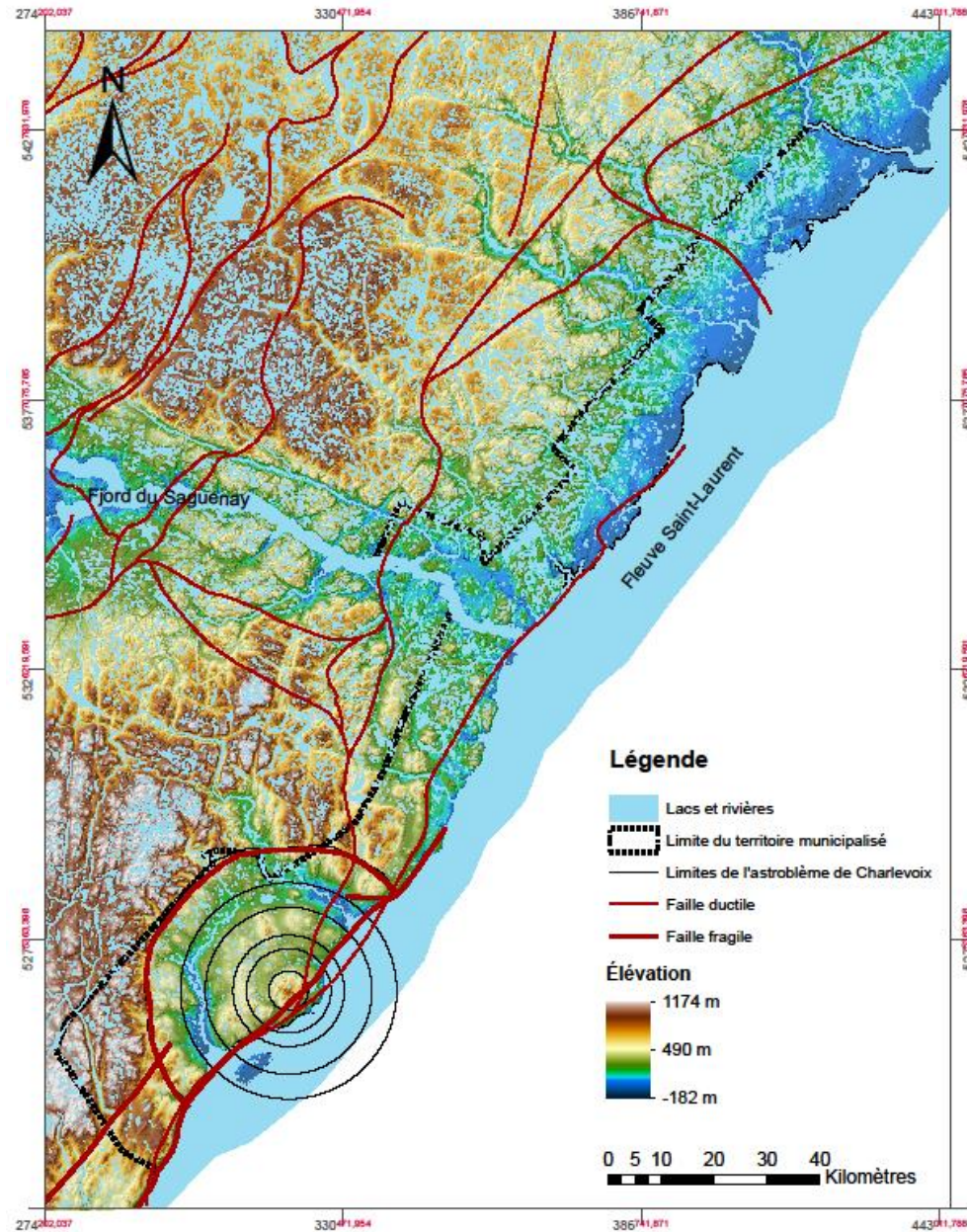
Caractérisation de la **composition géochimique** et **isotopique** des eaux souterraines

Relation entre l'**hydrogéo-dynamisme** et la **genèse géochimique**

→ Méthodes d'analyse graphique, statistique descriptive et multivariée (ASM)

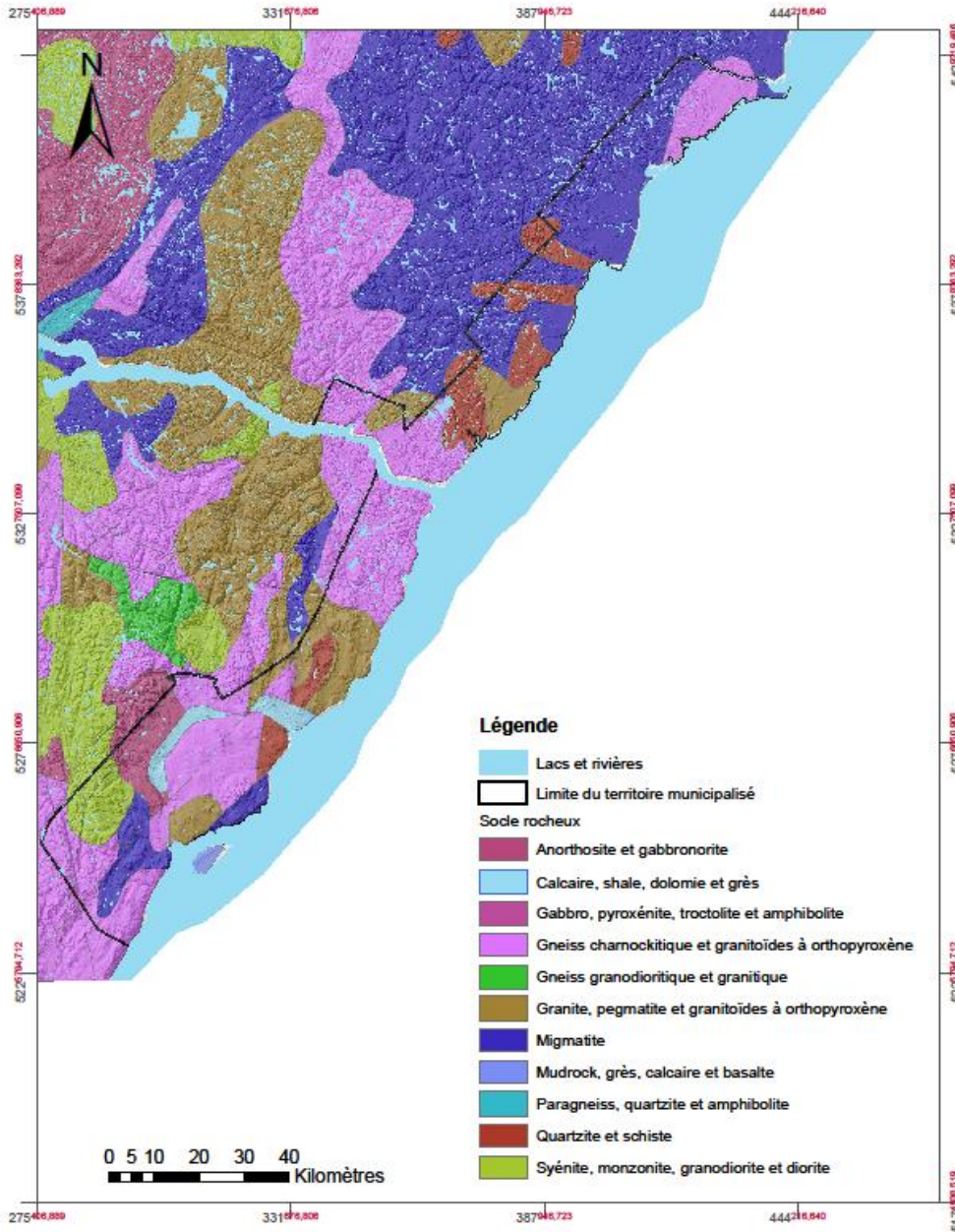


- Rive nord du fleuve Saint-Laurent
 - Superficie de 4500 km²



- Rive nord du fleuve Saint-Laurent
- Superficie de 4500 km²

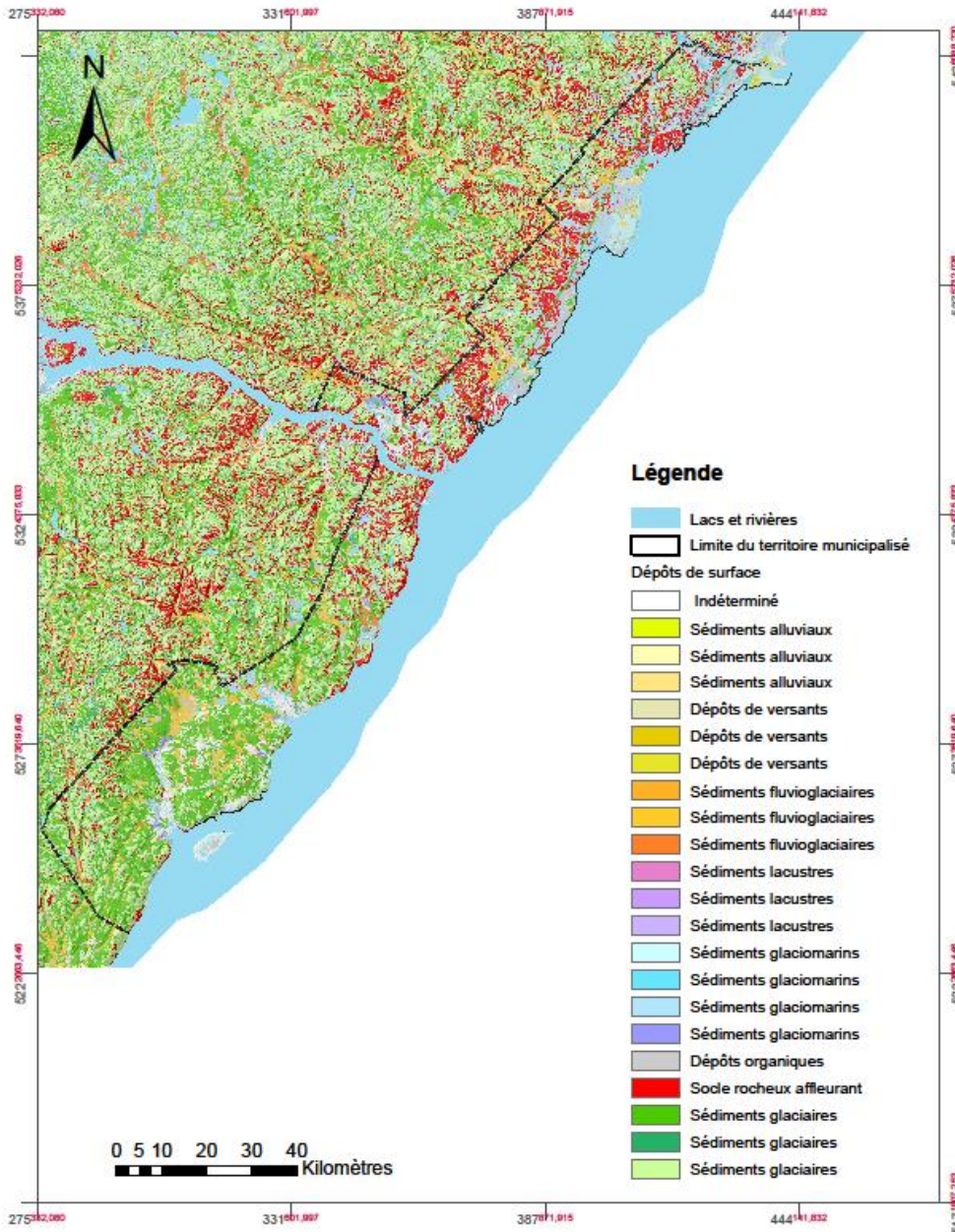
- Astroblème de Charlevoix
- Rift Saint-Laurent
- Fjord du Saguenay



- Rive nord du fleuve Saint-Laurent
- Superficie de 4500 km²

- Astroblème de Charlevoix
- Rift Saint-Laurent
- Fjord du Saguenay

- Trois provinces géologiques
- Socle rocheux Précambrien
- **Cinq familles de roches**

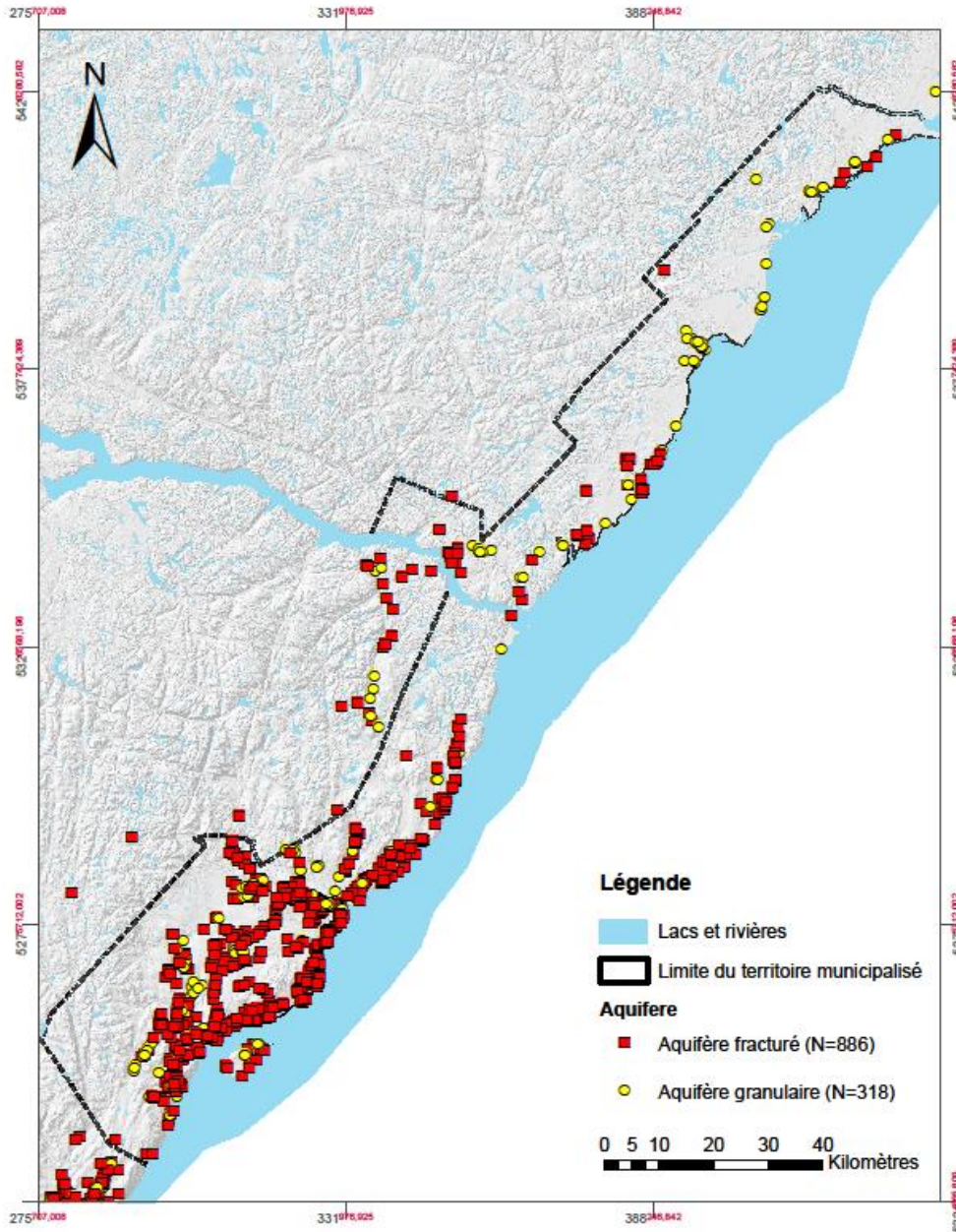


- Rive nord du fleuve Saint-Laurent
- Superficie de 4500 km²

- Astroblème de Charlevoix
- Rift Saint-Laurent
- Fjord du Saguenay

- Trois provinces géologiques
- Socle rocheux Précambrien
- **Cinq familles de roches**

- Dépôts de surface du Quaternaire
- **Abondance des dépôts glaciaires**



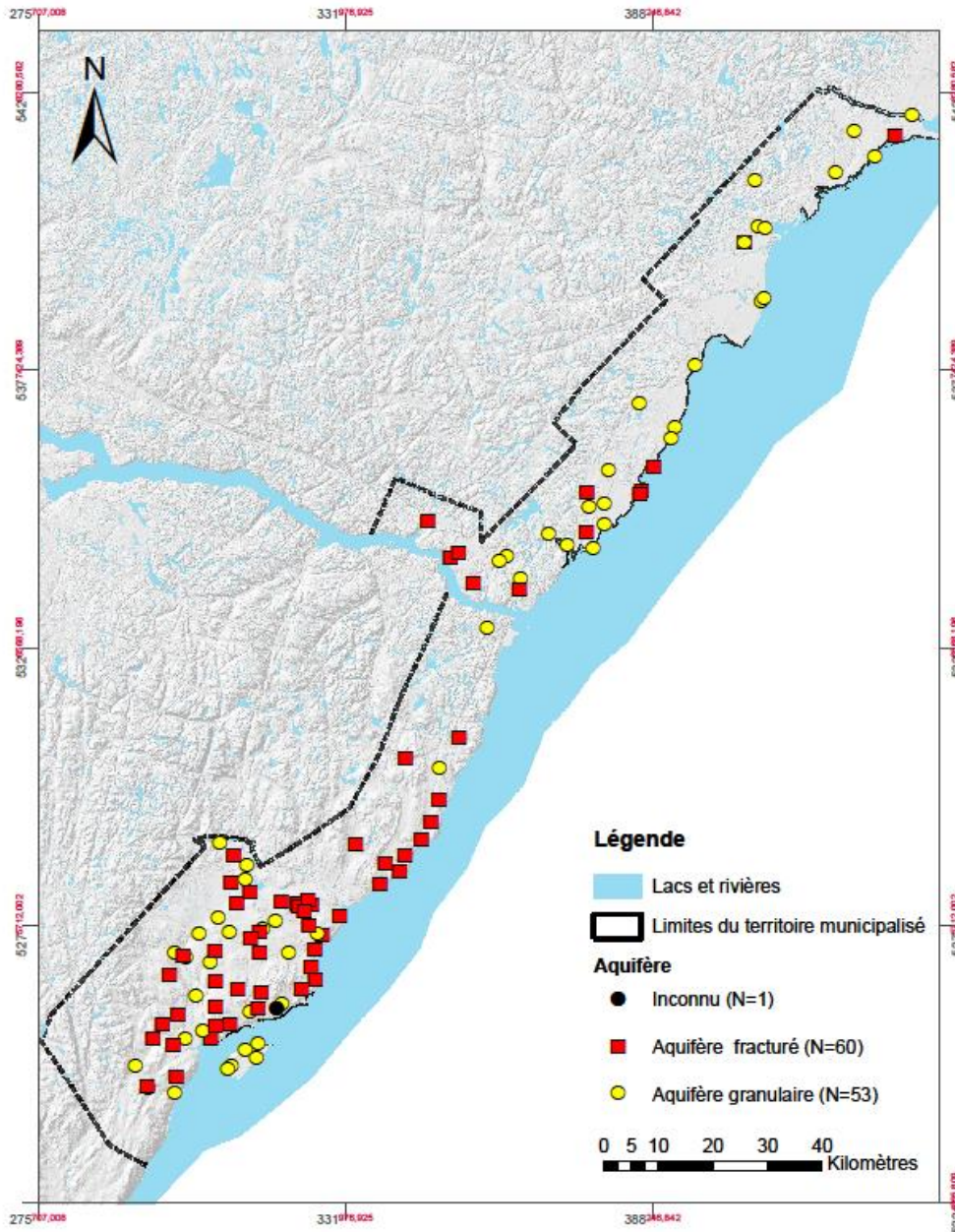
- Rive nord du fleuve Saint-Laurent
- Superficie de 4500 km²

- Astroblème de Charlevoix
- Rift Saint-Laurent
- Fjord du Saguenay

- Trois provinces géologiques
- Socle rocheux Précambrien
- **Cinq familles de roches**

- Dépôts de surface Quaternaire
- **Abondance des dépôts glaciaires**

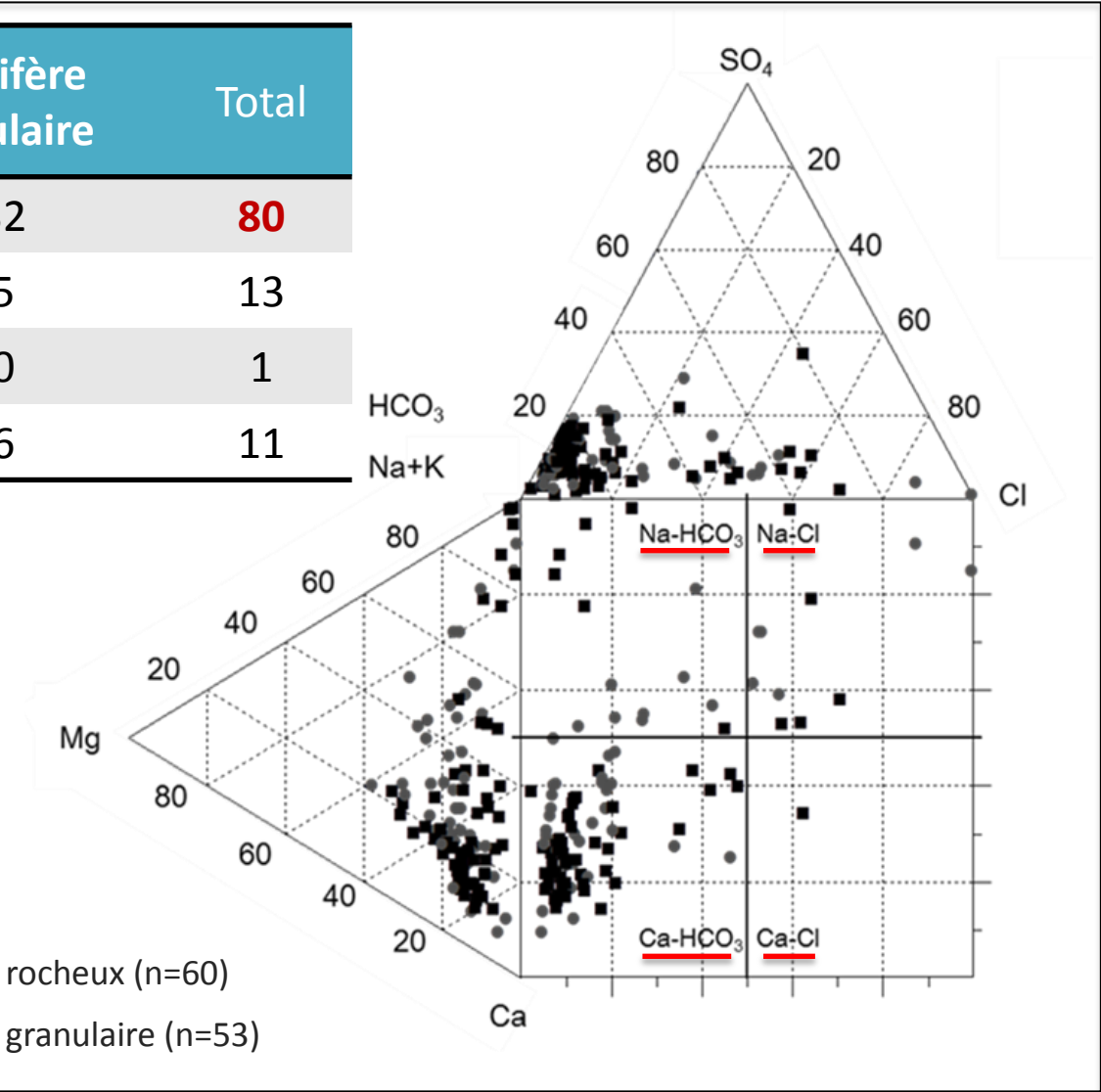
- **Milieu aquifère rocheux (n=886)**
- **Milieu aquifère granulaire (n=318)**



- Échantillonnage :
 - 114 stations et 147 échantillons
- Paramètres physico-chimiques :
 - Mesurés *in situ*
 - Analysés en laboratoire
- Contrôle qualité :
 - Échantillons duplicatas
 - Calcul de la balance ionique
- Analyses :
 - 105 échantillons sélectionnés
 - ASM : 9 paramètres chimiques; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Sr^{2+} et Si^{4+}

	Aquifère rocheux	Aquifère granulaire	Total
Ca-HCO ₃	48	32	80
Na-HCO ₃	8	5	13
Ca-Cl	1	0	1
Na-Cl	5	6	11

→ **Ca-HCO₃** : facies chimique dominant



Analyse graphiques : Diagramme de Durov (1948) et facies chimique

Analyses statistiques multivariées:
Analyse hiérarchique en grappes

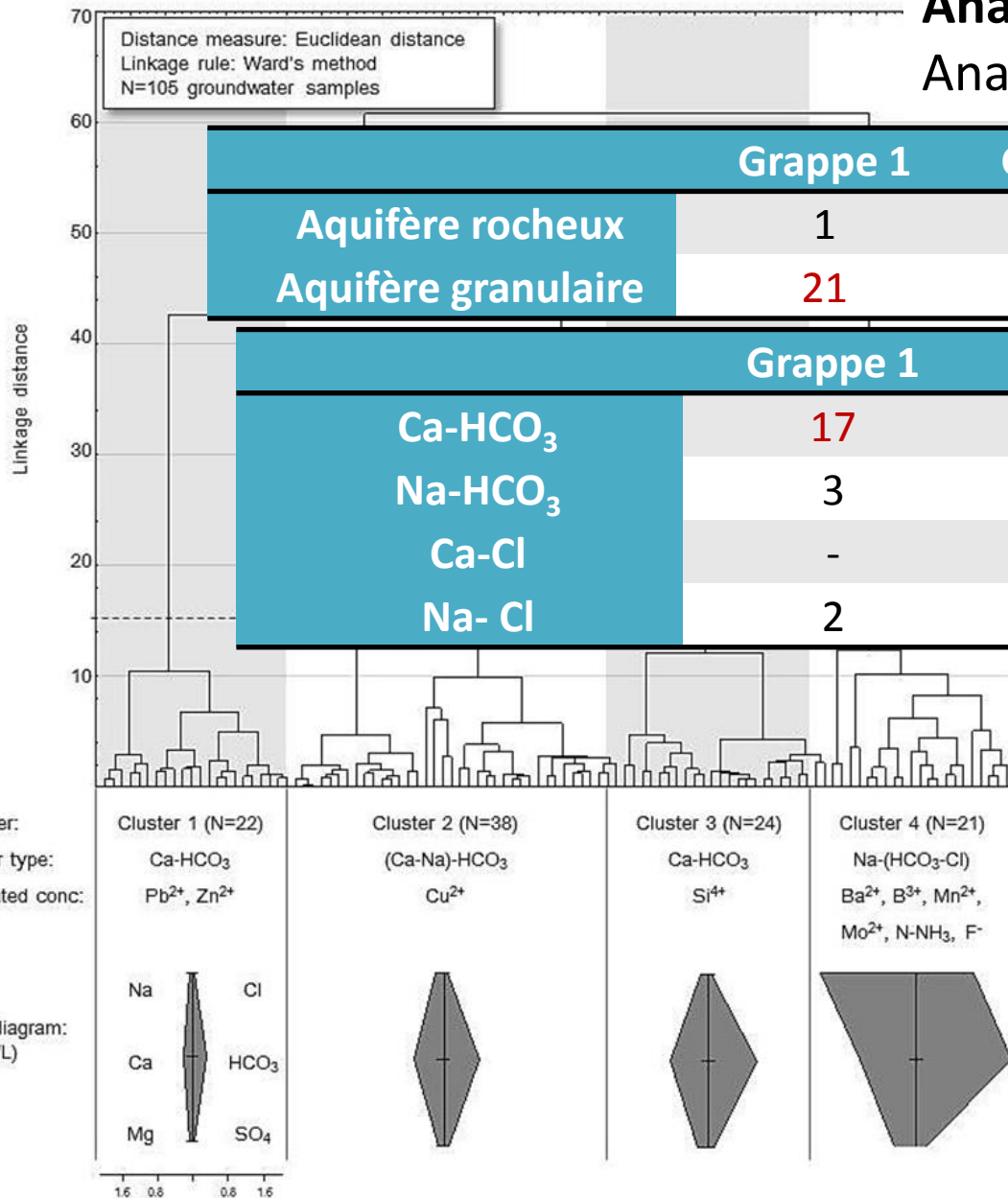


Diagramme de Stiff (1951):

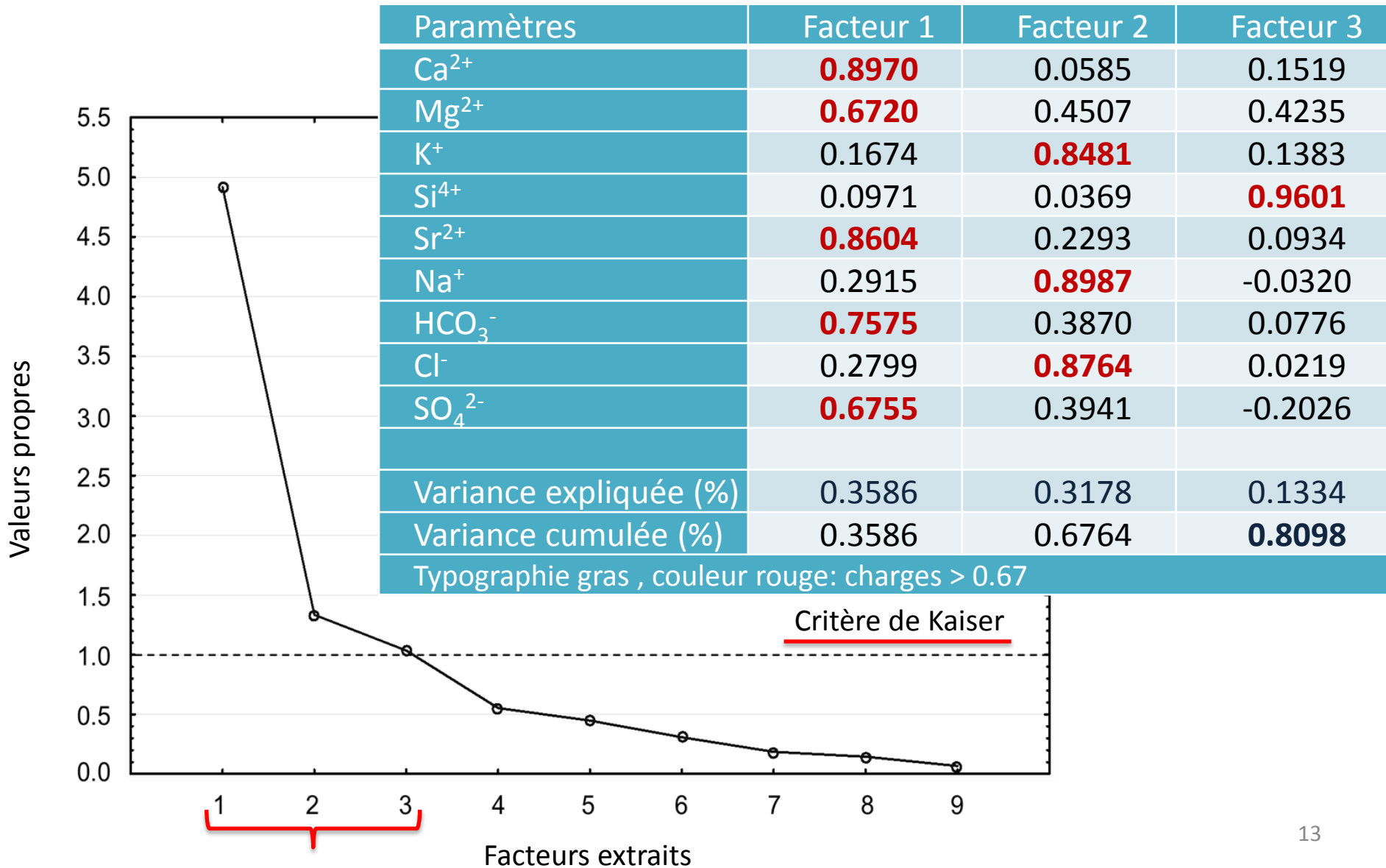
→ Facies chimique

→ Concentration

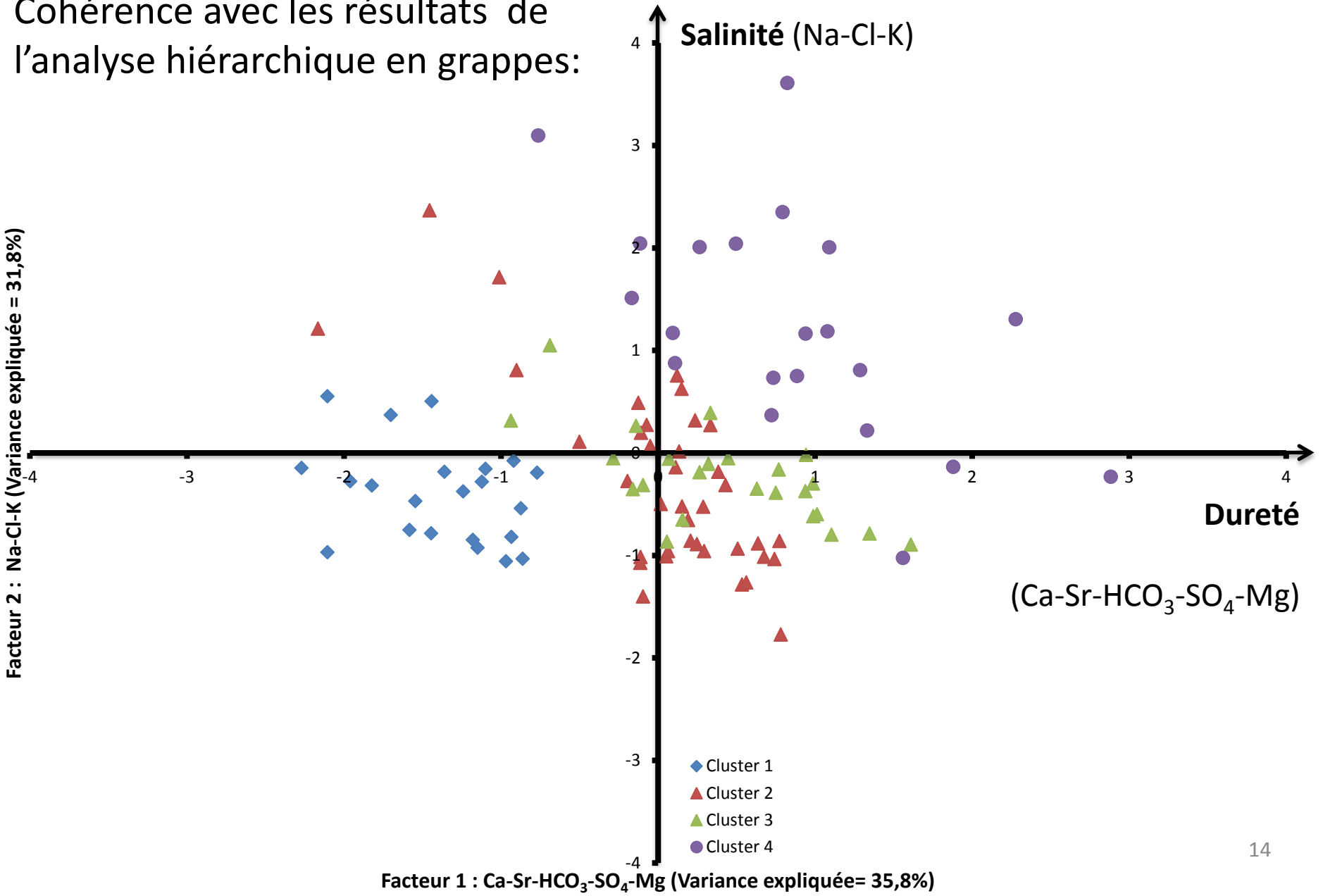
Calcul de la valeur médiane: Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

Paramètres	Grappe 1	Grappe 2	Grappe 3	Grappe 4
N	N = 22	N = 38	N = 24	N = 21
Paramètres physiques				
Température (°C)	8.94	7.68	7.345	7.63
pH	<u>6.185</u>	7.625	7.26	7.61
Oxygène dissous O ₂ (mg/L)	8.305	3.645	0.63	<u>0</u>
Total Solides Dissous TSD (mg/L)	<u>24.5</u>	61	71.5	215
Profondeur du puits (m)	<u>2.75</u>	65.00	45.50	54.00
N: Nombre d'échantillons; typographie gras : valeurs maximales; typographie soulignée : valeurs minimales				

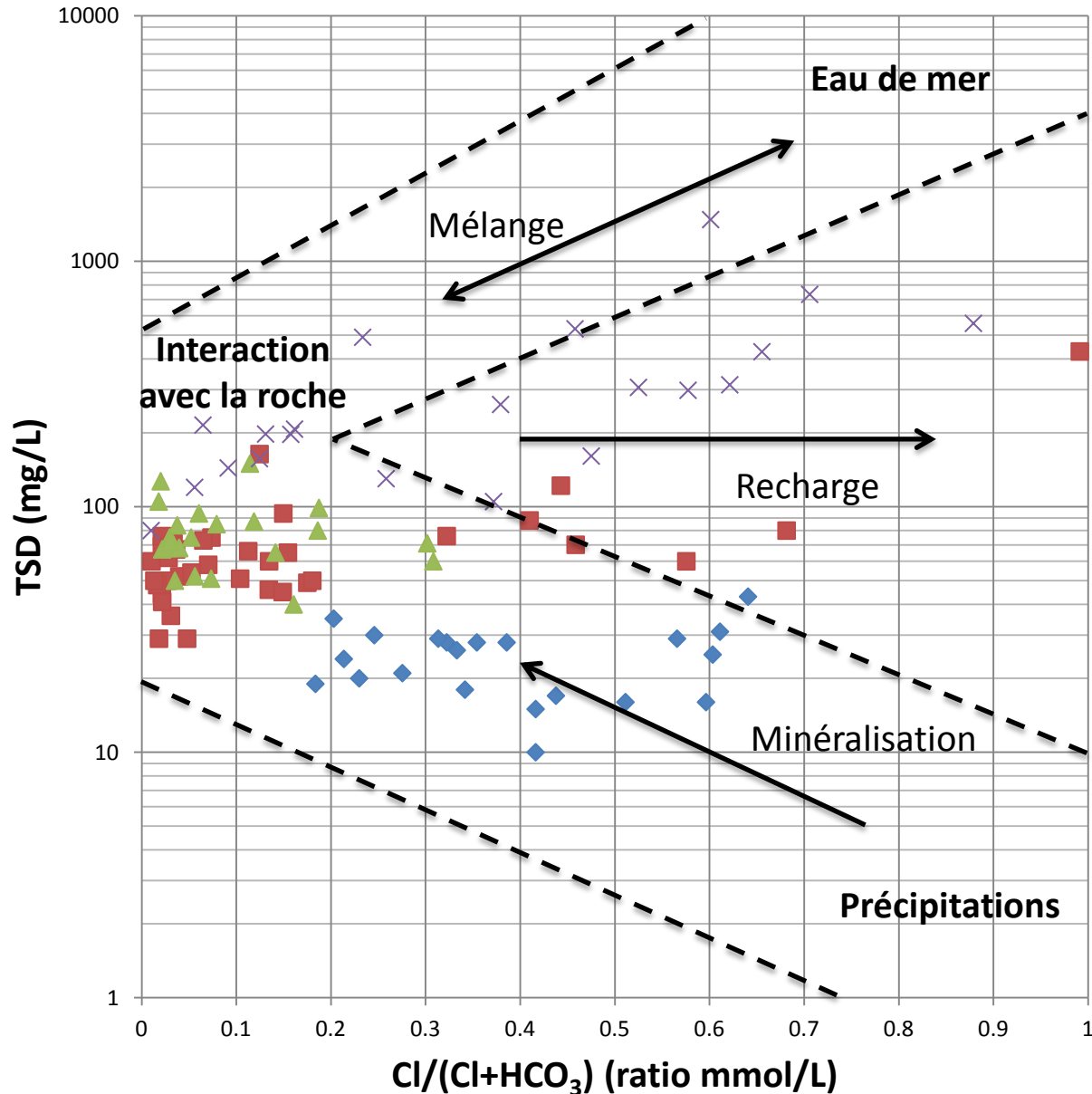
Analyses statistiques multivariées : Analyse factorielle mode-R



Cohérence avec les résultats de l'analyse hiérarchique en grappes:



Interprétation des résultats : Diagramme de Gibbs (1970)

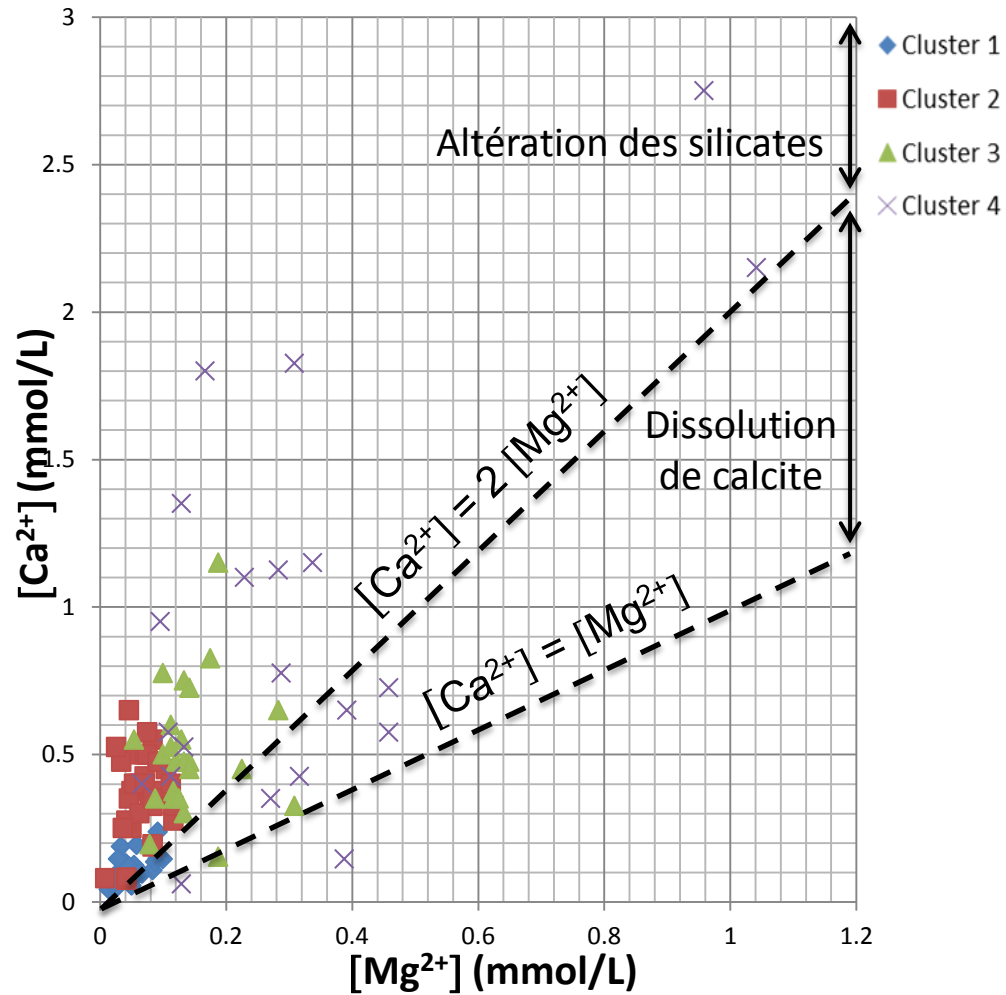
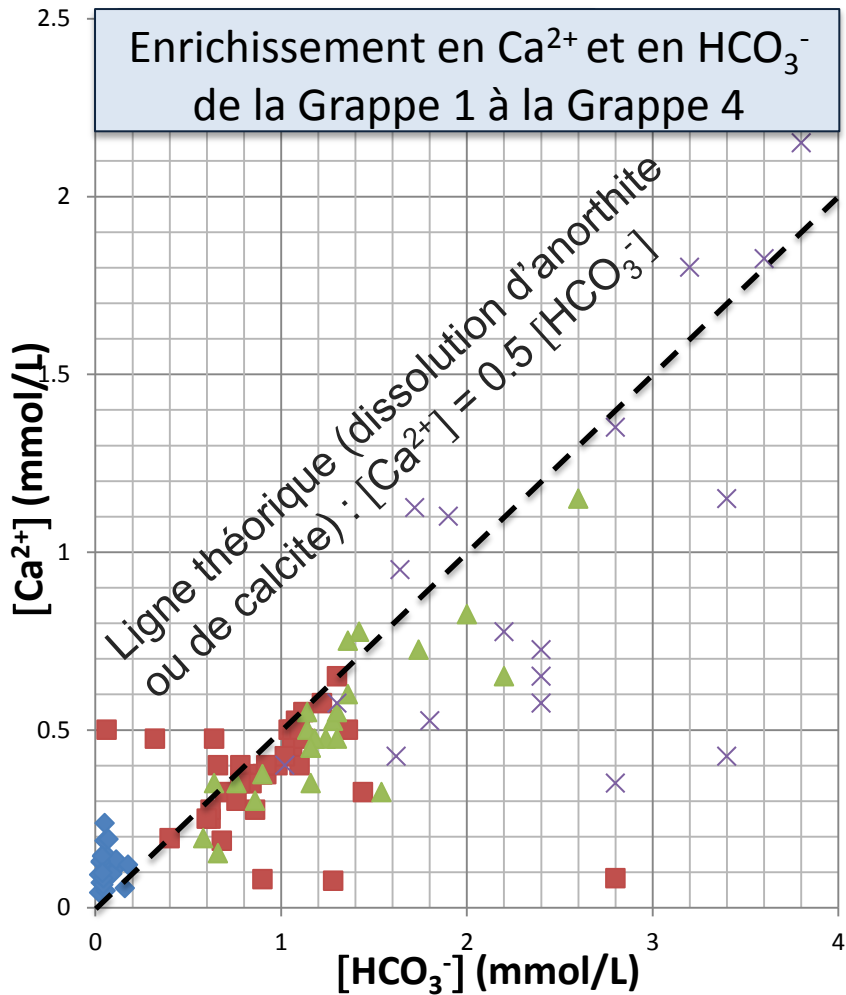


- ◆ Cluster 1
- Cluster 2
- ▲ Cluster 3
- × Cluster 4

Possibilité de **connexions hydrauliques** entre les dépôts granulaires et le socle rocheux

- Facies Na-Cl :
- Évolution naturelle
- **Salinisation**

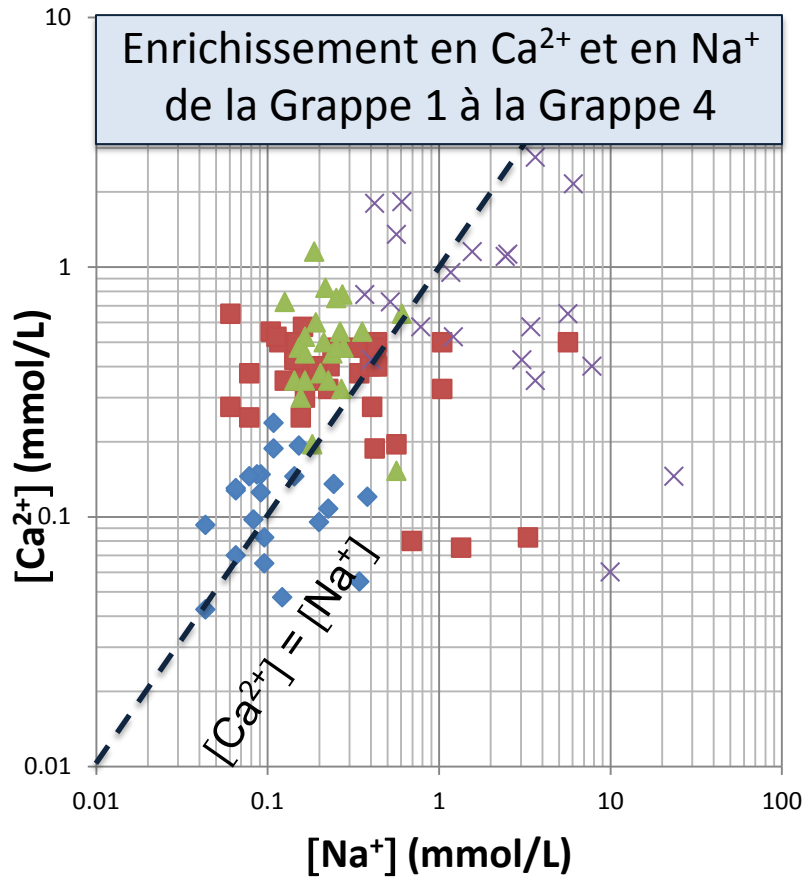
Interprétation des résultats : Diagrammes binaires



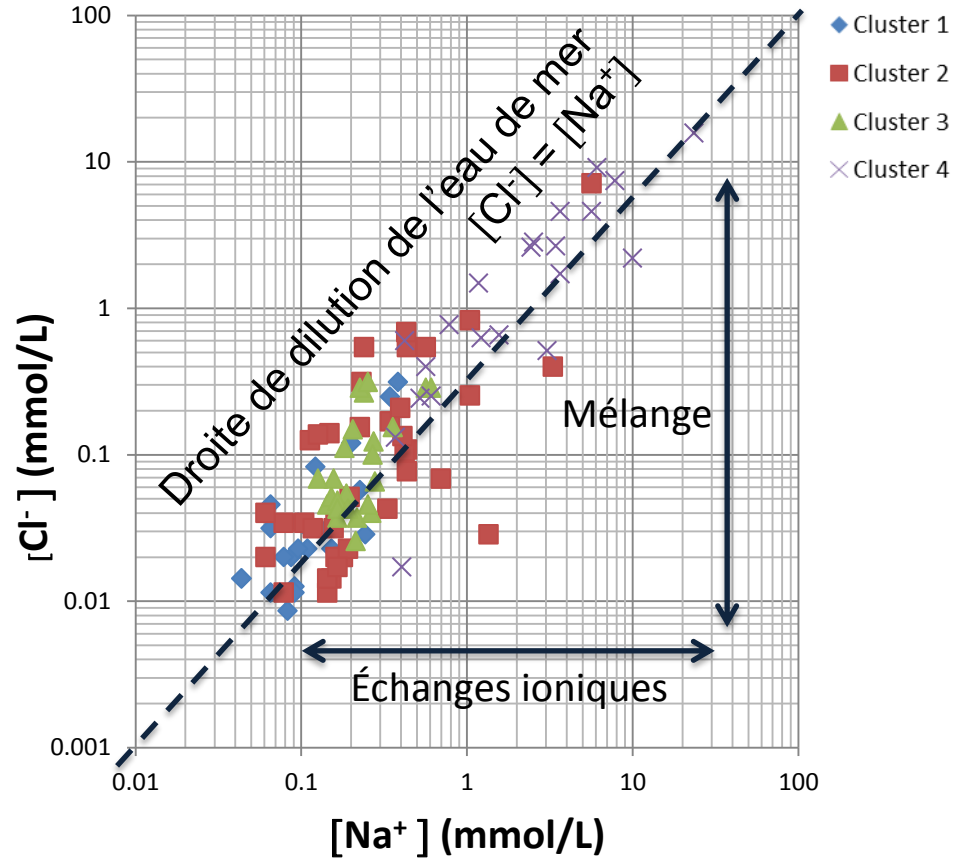
Dissolution de minéraux riches en Ca^{2+}

Altération des silicates riches en Ca^{2+}

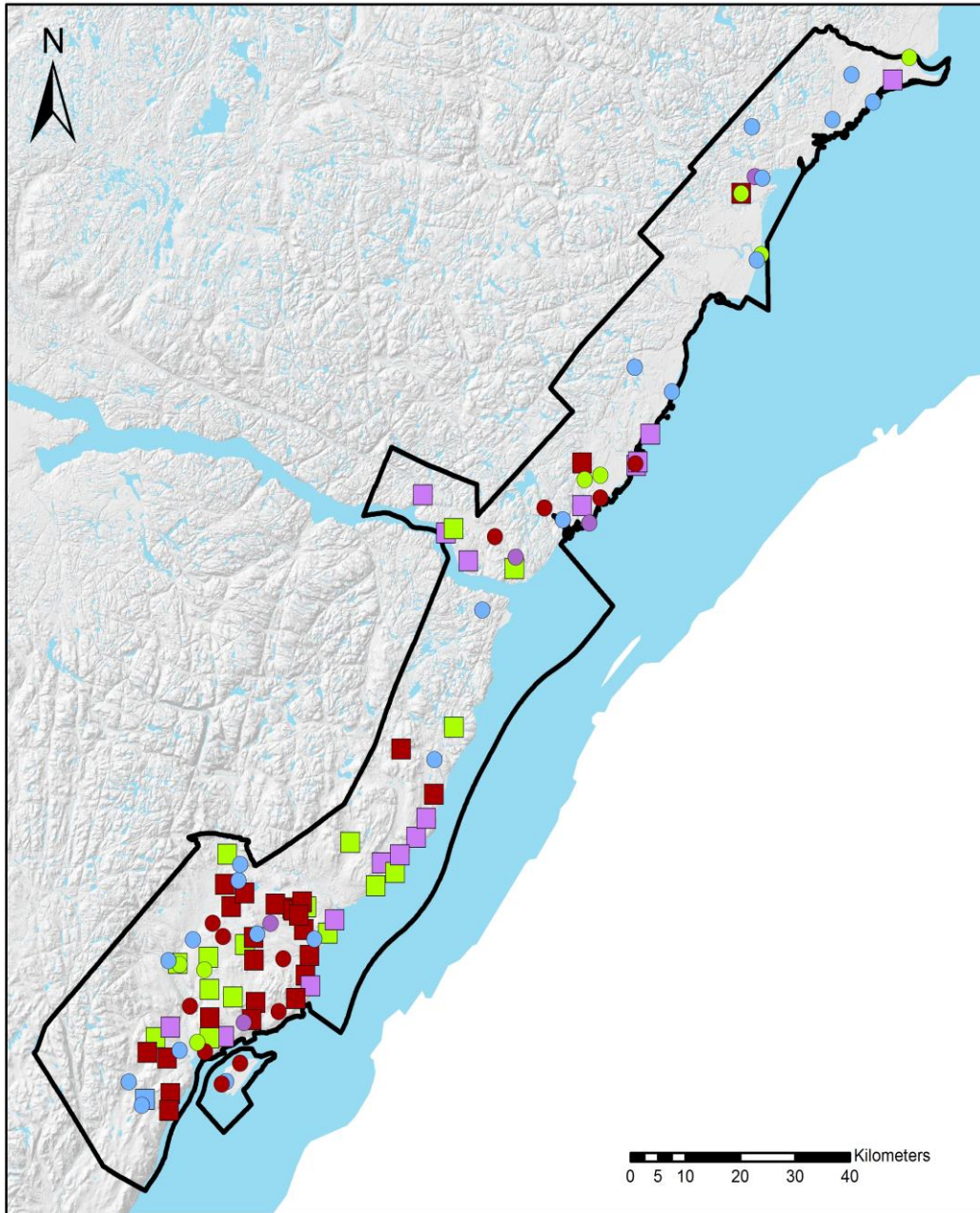
Interprétation des résultats : Diagrammes binaires













Dissolution de calcite
Altération des silicates



Échanges ioniques $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$
 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{Na-X(s)} = 2\text{Na}^+ + \text{Ca-X(s)}$

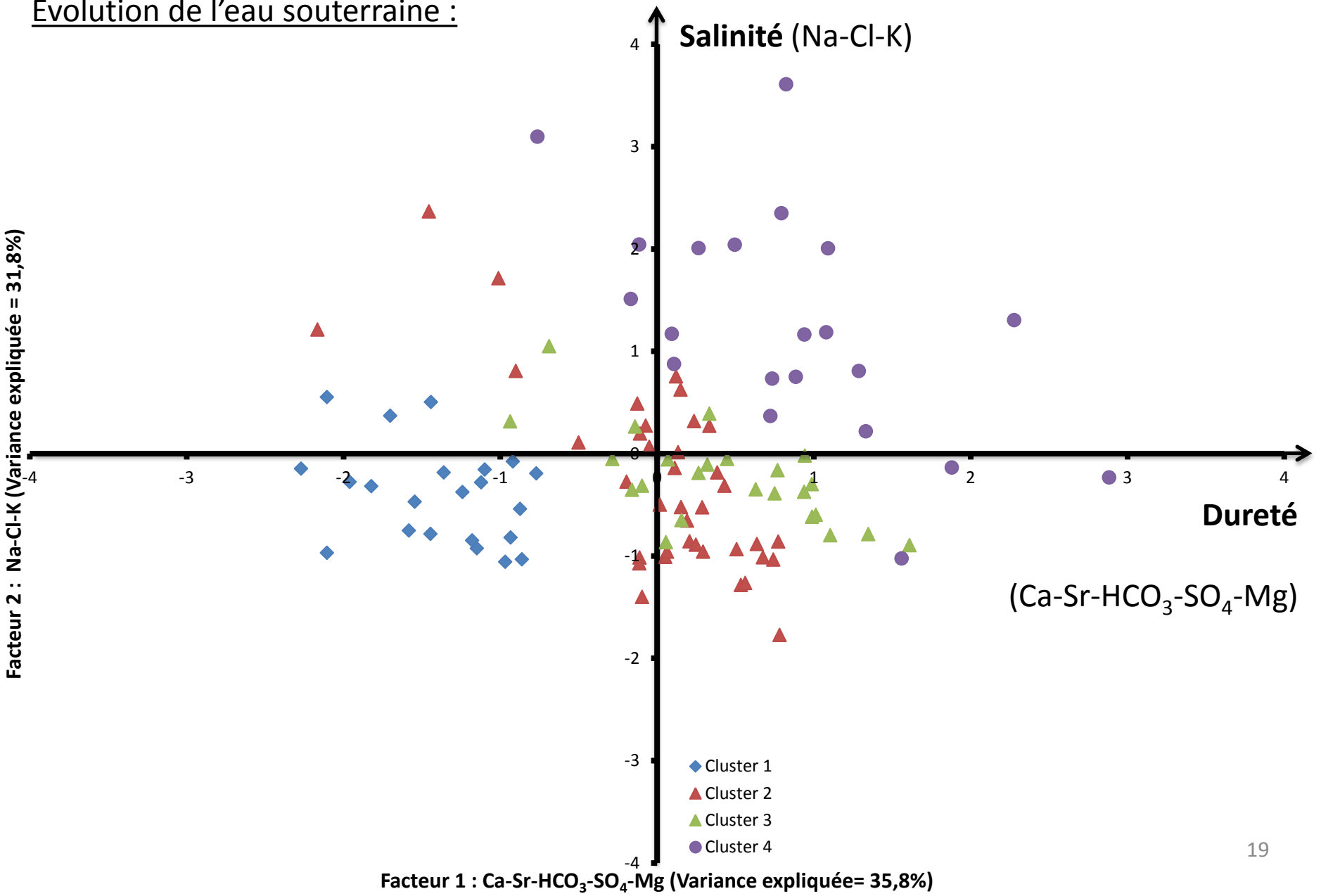


Légende

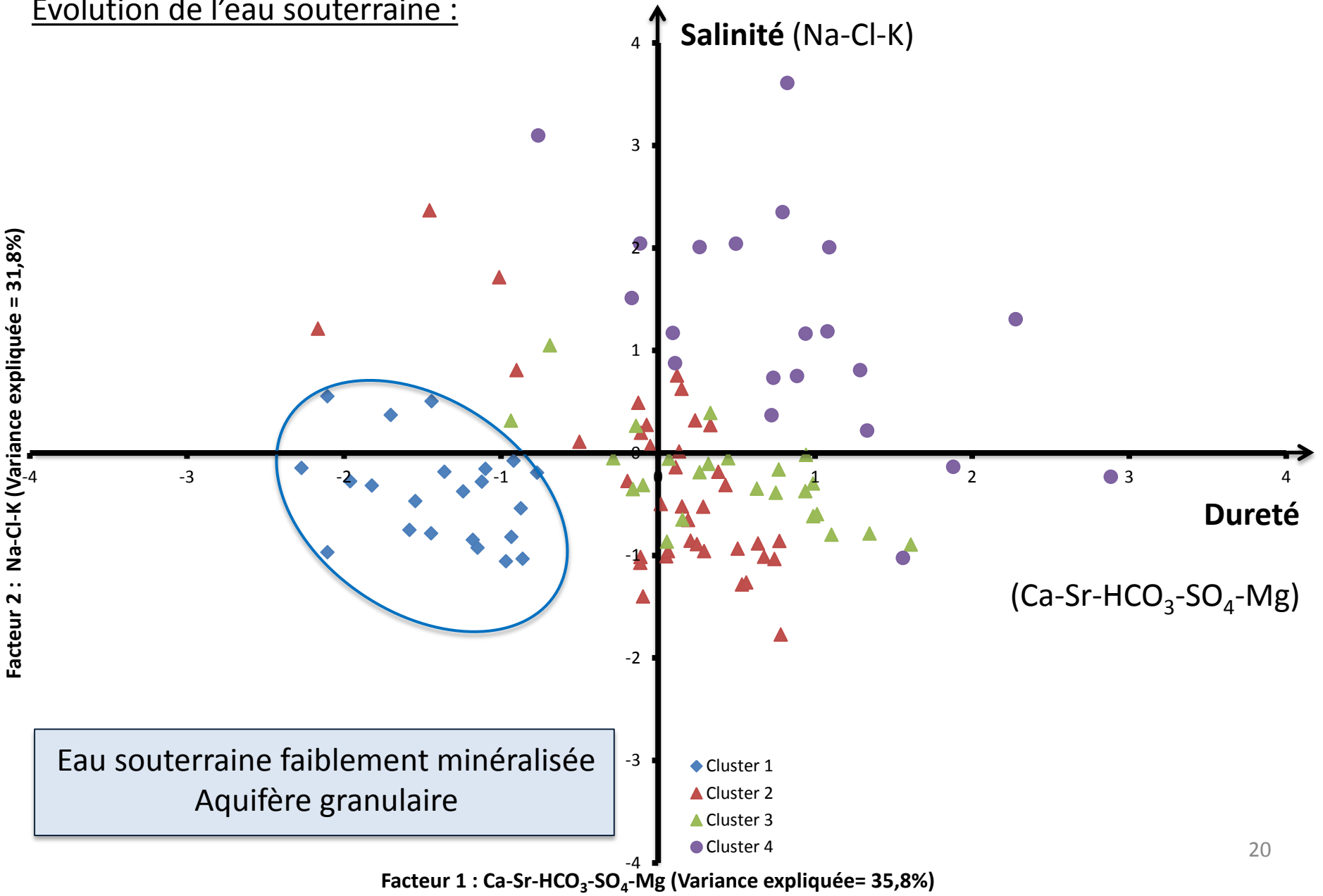
-  Limites du territoire municipalisé
-  Hydrographie principale
-  G1 – Aquifère granulaire (N=21)
-  G2 – Aquifère granulaire (N=12)
-  G3 – Aquifère granulaire (N=8)
-  G4 – Aquifère granulaire (N=5)
-  G1 – Aquifère fracturé (N=1)
-  G2 – Aquifère fracturé (N=26)
-  G3 – Aquifère fracturé (N=16)
-  G4 – Aquifère fracturé (N=16)

→ Possibilité d'un **processus de salinisation** le long des côtes

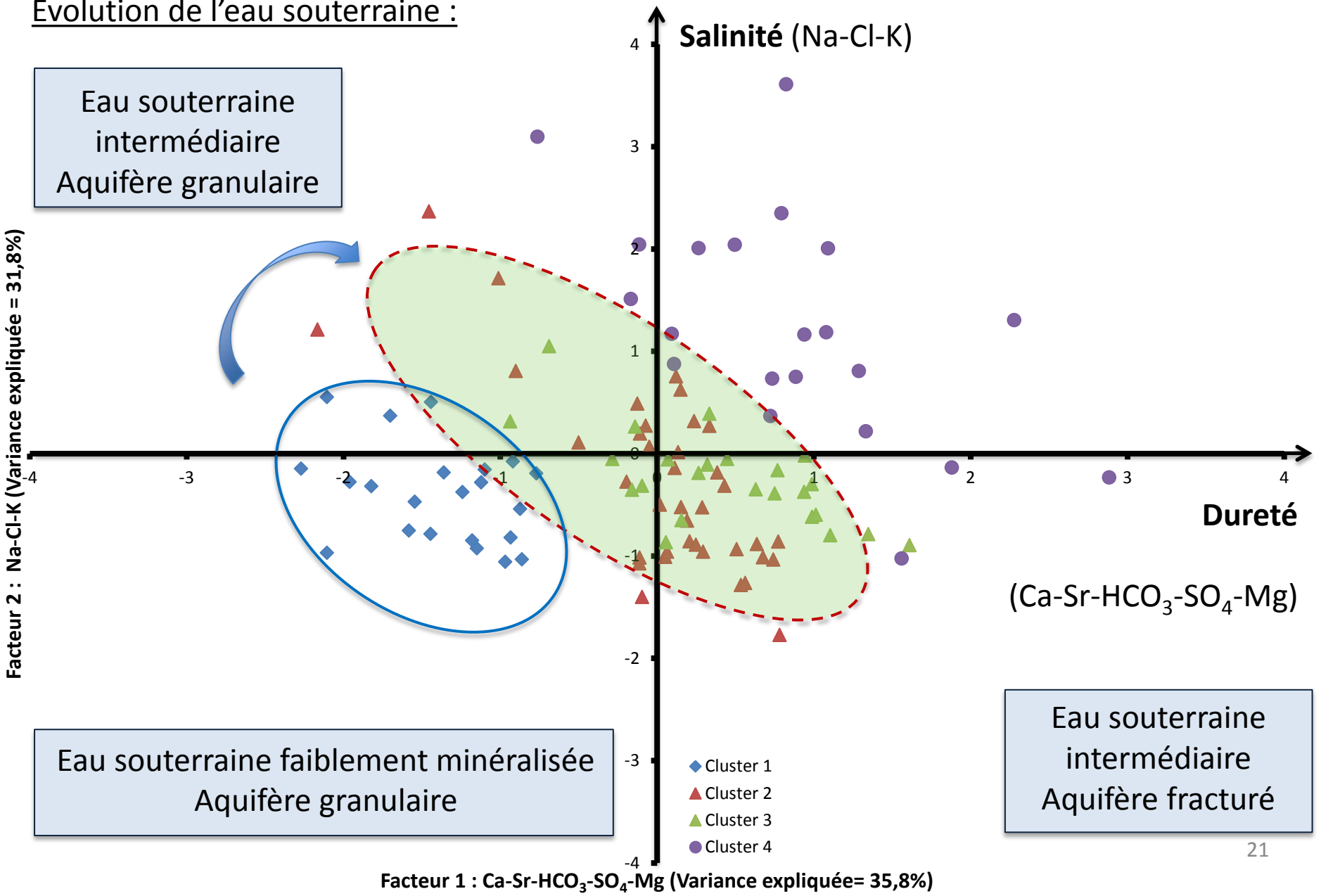
Évolution de l'eau souterraine :



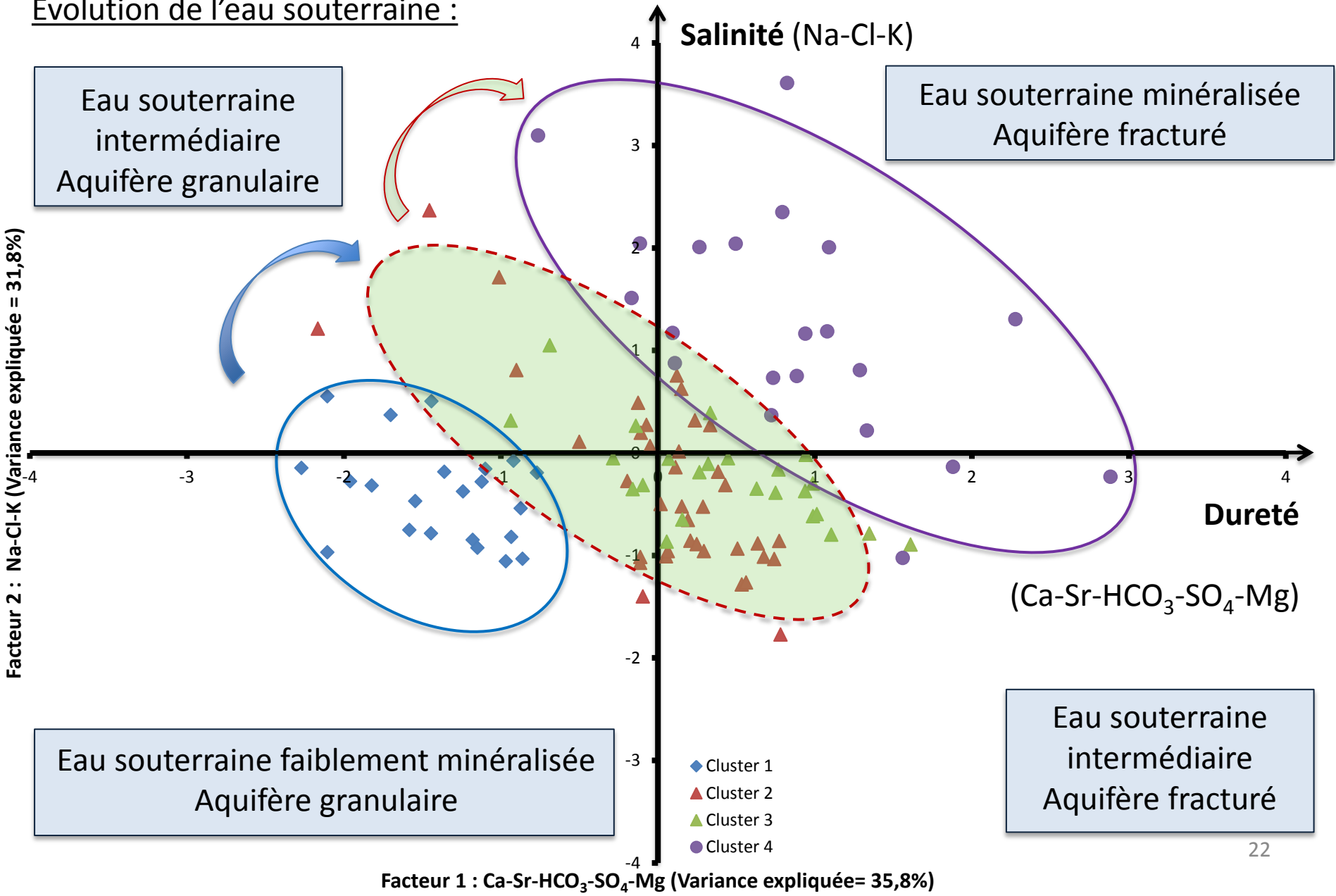
Évolution de l'eau souterraine :



Évolution de l'eau souterraine :



Évolution de l'eau souterraine :



- Principaux facteurs influençant la chimie de l'eau souterraine :

Recharge par des eaux de précipitations

Interactions eau-roche

Échanges ioniques

Présence d'aquitards d'argile marine ou d'intrusions d'eau salée

Connexions hydrauliques entre le socle rocheux
et les dépôts granulaires

Remerciements

- Romain Chesnaux, Alain Rouleau, Julien Walter (UQAC)
- Vincent Cloutier (UQAT)
- **Équipe PACES Charlevoix/Haute-Côte-Nord** : Mélanie Lambert, Marie-Line Tremblay, Denis Germaneau, Brigitte Poirier, David Noel et Patrick Simard
- **Équipe du groupe de recherche R2Eau** : professeurs et étudiants
- Fondation de l'UQAC



Merci de votre attention

Avez-vous des questions ?

UQAC

Université du Québec
à Chicoutimi



- Appelo C.A.J., Postma D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2ème édition. CRC Press. Balkema, Leiden. 668p.
- Beaudry, C., 2013. *Hydrogéochimie de l'aquifère rocheux régional en Montérégie-est*, Québec, Mémoire de maîtrise. INRS. 193p.
- Blum, A., Barbier, J., Chery, I., Petelet-Giraud, E., 2001. *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie*. BRGM/RP-51093-FR. 268p.
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater — A case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geoderma*. 159 (3-4), 390-398.
- CERM-PACES, 2013. *Résultats du programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du Saguenay - Lac Saint Jean*. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi. 332p.
- Chen, K., Jiao, J. J., Huang, J., Huang, R., 2007. Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China. *Environmental Pollution*. 147 (3), 771-780.
- Chesnaux, R., Lambert, M., Walter, J., Fillastre, U., Hay, M., Rouleau, A., Daigneault, R., Moisan, A., Germaneau, D., 2011. Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay–Lac-St.-Jean region, Canada. *Computers & Geosciences*. 37 (11), 1870-1882.
- Chesnaux, R., Allen, D. M., Simpson M. W. M. 2011. Comparing isotopic groundwater age measurements with simulated groundwater ages: example of the Abbotsford–Sumas Aquifer (USA and Canada) and application. *Water and Environment Journal*. 26 (2012), 30-37.
- Chesnaux, R., Rafini, S., Elliott, A.P., 2012. A Numerical Investigation to Illustrate the Consequences of Hydraulic Connections between Granular and Fractured-Rock Aquifers. *Hydrogeology Journal*. 20 (8), 1669-1680.

Références

- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M. M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*. 353 (3-4), 294-313.
- Cousineau, P. A., Poirier, B., Brouard, E., El Amrani, M., Roy, D. W., Walter, J., Lambert, M., Lajeunesse, P., 2014. Rapport Final sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans les territoires municipalisés de la Haute-Côte-Nord et de Charlevoix (Québec) entre 2012 et 2014. Report to the Ministère des Ressources Naturelles, April 2014. 103p.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and Data analysis in Geology*. John Wiley and Sons Inc., New York. 646p.
- DHI-WASY Software, 2009. Feflow[®], Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, User manual. DHI-WASY GmbH. Berlin. 94p.
- DHI-WASY Software, 2010. Feflow[®] 6, Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, White Papers, Vol. I. DHI-WASY GmbH. Berlin. 368p.
- Durov, S. A., 1948. Klassifikatsia prirodnykh vod i graficheskoe izobrazhenie ikh sostava. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 59 (1), 87-90.
- D'Amore, F., Scandiffio, G., Panichi, C., 1983. Some observations on the chemical classification of groundwaters. *Geothermics*. 12, 141-148.
- Farnham, I. M., Johannesson, K. H., Singh, A. K., Hodge, V. F., Stetzenbach, K. J., 2003. Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. *Analytica Chimica Acta*. 490 (1-2), 123-138.
- Foucault, A., Raoult, J.-F., 2010. *Dictionnaire de Géologie - 7 ème édition*. Dunod. Paris. 416p.
- Frape, S. K., Fritz, P., McNutt, R. H., 1984. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield. *Geochimica and cosmochimica acta*. 48, 1617-1627.

Références

- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 604 p.
- Gascoyne, M., Kamineni, D. C., 1994. The hydrochemistry of fractured plutonic rocks in the Canadian Shield. Applied Hydrogeology. 2, 43-49.
- Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science. 170 (3962), 1088-1090.
- Güler, C., Thyne, G., McCray, J., Turner, K., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal. 10 (4), 455-474.
- Güler, C., Thyne, G., 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. Journal of Hydrology. 285 (1-4), 177-198.
- Huet, M., Chesnaux, R., Boucher, M.-A. Comparing the results of different approaches for assessing groundwater recharge at a regional scale: example of four watersheds located in the Canadian Shield. Article soumis à la revue Hydrological Sciences Journal.
- Lambrakis, N., Antonakos, A., Panagopoulos, G., 2004. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. Water Resources. 38 (7), 1862-1872.
- Lemieux, Y., Tremblay, A., Lavoie, D., 2000. Stratigraphy and structure of the St. Lawrence Lowland in the Charlevoix area, Quebec: relationships to the impact cratering. Geological Survey of Canada report, Current research 2000-D2. 9 p.
- Lemieux, Y., Tremblay, A., Lavoie, D., 2003. Structural analysis of supracrustal faults in the Charlevoix area, Quebec: relation to impact cratering and the St-Laurent fault system. Canadian Journal of Earth Sciences. 40 (2), 221-235.
- Melloul, A., Collin, M., 1992. The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. Journal of Hydrology. 140, 49-73.

- Montcoudiol, N., Molson, J., Lemieux, J. M., 2014. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal*. DOI 10.1007/s10040-014-1190-5.
- Nastev, M., Rivera, A., Lefebvre, R., Martel, R., Savard, M., 2005. Numerical simulation of groundwater flow in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*. 13 (5-6), 835-848.
- Rajmohan, N., Elango, L., 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environmental Geology*. 46, 47-51.
- Richard, S. K., Chesnaux, R., Rouleau, A., Morin, R., Walter, J., Rafini, S., 2014. Field evidence of hydraulic connections between bedrock aquifers and overlying granular aquifers: examples from the Grenville Province of the Canadian Shield. *Hydrogeology Journal*. 22 (8), 1889-1904.
- Rondot, J., 1968. Nouvel impact météoritique fossile? La structure semi-circulaire de Charlevoix. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 5, 1305-1317.
- Rondot, J., 1989. Les brèches d'impact météoritique de Charlevoix. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles report. 30p.
- Sanford, R. F., Pierson, C. T., Crovelli, R. A., 1993. An objective replacement method for censored geochemical data. *Mathematical Geology*. 25 (1), 59-80.
- Sikdar, P. K., Sarkar, S. S., Palchoudhury, S., 2001. Geochemical evolution of groundwater in the Quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India *Journal of Asian Earth Science*. 19, 579-594.
- Silva-Filho, E. V., Sobral Barcellos, R. G., Emblanch, C., Blavoux, B., Sella, S. M., Daniel, M., SimLer, R., Wasserman, J. C., 2009. Groundwater chemical characterization of a Rio de Janeiro coastal aquifer, SE – Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 27 (1), 100-108.

Références

Statsoft, Inc., 2013. STATISTICA (Data Analysis software System), Version 12.

Stiff, H.A. Jr., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*.3, 15-17.

Strassberg, G., Jones, N. L., Maidment, D. R., 2011. *Arc Hydro Groundwater: GIS for Hydrogeology*. ESRI Press. Redlands. 250p.

Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, L., 2010. Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environment Monitoring Assessment*. 162 (1-4), 123-137.

Templ, M., Filzmoser, P., Reimann, C., 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*. 23 (8), 2198-2213.

Varsanyi, I., Kovacs, L. O., 1994. Combination of statistical methods with modelling mineral-water interaction: a study of groundwater in the Great Hungarian Plain. *Applied Geochemistry*. 9, 419-430.

Walter, J., 2010. *Les eaux souterraines à salinité élevée du Saguenay-Lac Saint-Jean, Origines et incidences*, Mémoire de master. UQAC. 177p.

Ward, J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*. 69, 236-244.

Wassenaar, L. I., Hendry, M. J., Harrington., N., 2006. Decadal geochemical and isotopic trends for nitrate in a transboundary aquifer and implications for agricultural beneficial management practices. *Environmental Science and Technology*. 40 (16), 4626-4632.

Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2005. *AQUACHEM (Management Software for Water Quality and Groundwater Sampling Data)*, Version 5.0.

Yidana, S. M., 2010. Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*. 57 (5), 455-469.

Zghibi, A., Merzougui, A., Zouhri, L., Tarhouni, J., 2014. Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*. 89, 1-15.

ArcGIS resources. Aide ArcGIS 10.1. Fonctionnement de l'outil IDW. Mis à jour le 13 septembre 2013. Consulté le 9 avril 2015. <http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html#//009z00000075000000>

Gouvernement du Québec, 2015. Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Consulté le 9 avril 2015. Disponible en ligne : http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/fiches/Fiches-PACES_charlevoix.pdf

Gouvernement du Québec, 2015. Portail Québec, Géographie et Climat. Consulté le 9 avril 2015. Disponible en ligne : <http://www.gouv.qc.ca/fr/LeQuebec/Pages/G%C3%A9ographie.aspx#geologie>

Gouvernement du Québec, 2015. Les régions hydrographiques, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Consulté le 9 avril 2015. Disponible en ligne : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/Eau/bassinversant/regionshydro/index.htm>

Statistique Canada. 2012. Charlevoix, Québec (Code 2416) et Québec (Code 24) (tableau). Profil du recensement, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 24 octobre 2012. Consulté le 9 avril 2015. <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>

Statistique Canada. 2012. Charlevoix-Est, Québec (Code 2415) et Québec (Code 24) (tableau). Profil du recensement, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 24 octobre 2012. Consulté le 9 avril 2015. <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>

Statistique Canada. 2012. Côte-Nord, Québec (Code 2480) et Québec (Code 24) (tableau). Profil du recensement, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 24 octobre 2012. Consulté le 9 avril 2015. <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>

Paramètres physico-chimiques mesurés in situ et spécifications des capteurs

Paramètres	Gamme	Résolution	Exactitude
Température (T)	-5.00 à 55.00°C	0.01°C	±0.15°C
Potentiel hydrogène (pH)	0.00 à 14.00 pH	0.01 pH	± 0.02 pH
Potentiel REDOX (Eh)	±2000.0 mV	0.1 mV	± 1.0 mV
Oxygène dissous (O ₂)	0.0 à 50.00 mg/L	0.01 mg/L	± 0.10 mg/L
Conductivité (Cond)	0.000 à 200.000 mS/cm	1.0 µS/cm	± 1.0 µS/cm
Total des solides dissous (TSD)	0.0 à 400000 mg/L	1.0 mg/L	± 1.0 mg/L

Paramètres analysés dans le cadre du projet PACES-CHCN

Paramètres		Contenant	Agent de conservation	Filtration
Métaux dissous	Aluminium (Al)	Lithium (Li)	HNO ₃	0.45 µm
	Antimoine (Sb)	Magnésium (Mg)		
	Argent (Ag)	Manganèse (Mn)		
	Arsenic (As)	Molybdène (Mo)		
	Baryum (Ba)	Nickel (Ni)		
	Béryllium (Be)	Plomb (Pb)		
	Bismuth (Bi)	Potassium (K)		
	Bore (B)	Sélénium (Se)		
	Cadmium (Cd)	Silicium (Si)		
	Calcium (Ca)	Sodium (Na)		
	Chrome (Cr)	Strontium (Sr)		
	Cobalt (Co)	Titane (Ti)		
	Cuivre (Cu)	Uranium (U)		
	Etain (Sn)	Vanadium (V)		
Fer (Fe)	Zinc (Zn)			
Anions	Alcalinité totale	Polyéthylène 250 ml	Aucun	Aucune
	Bromures (Br)			
	Chlorures (Cl)			
	Fluorures (F)			
	Nitrites + Nitrates (NO ₂ +NO ₃)			
	Sulfates (SO ₄)			
Nutriments	Azote ammoniacal (NH ₄)	Polyéthylène 125 ml	H ₂ SO ₄	Aucune
	Phosphore inorganique total (P)			
Sulfures	Sulfures totaux (S)	Polyéthylène 125 ml	Acétate de zinc +NaOH	Aucune
Isotopes stables	Deutérium (² H)	HDPE 60 ml	Aucun	Aucune
	Oxygène 18 (¹⁸ O)			

Méthodes de laboratoire et limites de détection des paramètres analysés par le laboratoire Maxxam Analytique

Paramètres	Méthode de laboratoire	Référence primaire	Limite de détection (mg/L)
Aluminium (Al)	STL SOP-00006	ICP - MS (MA.200 - Mét 1.2)	0.0100
Antimoine (Sb)			0.0010
Argent (Ag)			0.00010
Arsenic (As)			0.0010
Barium (Ba)			0.0020
Béryllium (Be)			0.00050
Bismuth (Bi)			0.00025
Bore (B)			0.020
Cadmium (Cb)			0.00020
Calcium (Ca)			0.30
Chrome (Cr)			0.00050
Cobalt (Co)			0.00050
Cuivre (Cu)			0.00050
Etain (Sn)			0.0010
Fer (Fe)			0.10
Lithium (Li)			0.010
Magnésium (Mg)			0.10
Manganèse (Mn)			0.00040
Molybdène (Mo)			0.00050
Nickel (Ni)			0.010
Plom (Pb)			0.00010
Potassium (K)			0.10
Sélénium (Se)			0.0010
Silicium (Si)			0.10
Sodium (Na)			0.10
Strontium (Sr)			0.00020
Titane (Ti)			0.010
Uranium (U)	0.0010		
Vanadium (V)	0.0020		
Zinc (Zn)	0.0050		
Alcalinité totale	STL SOP-00038	pH final 4.5 (Titration SM 2320B)	1.00
Bromures (Br)	STL SOP-00014	(MA. 300 - Ions 1.3)	0.10
Chlorures (Cl)			0.050
Nitrites + Nitrates (NO ₂ +NO ₃)			0.020
Sulfates (SO ₄)			0.50
Fluorures (F)	STL SOP-00038	(SM 4500-F- C)	0.10
Azote ammoniacal (NH ₄)	STL SOP-00040	(MA. 300 - N 1.1)	0.020
Phosphore inorganique total (P)	STL SOP-00005	(MA. 300 - P. Ino 2.0)	0.030
Sulfures totaux (S)	STL SOP-00001	(MA. 300-S 1.1)	0.020

Élaboration des bases de données analytiques

- 39 paramètres chimiques analysés par un laboratoire agréé
- Analyse des isotopes stables de l'hydrogène (^2H) et de l'oxygène (^{18}O)

- Contrôle qualité : calcul de la balance ionique

$$B. I. (\%) = \frac{\Sigma(\text{cations}) - \Sigma(\text{anions})}{\Sigma(\text{cations}) + \Sigma(\text{anions})} \times 100$$

- Échantillons exclus des analyses :

Nombre N	Raison de l'exclusion
N = 19	Une seule analyse par station
N = 13	
N = 1	Echantillon blanc
N = 7	Non respect de la balance ionique (Subramani et al., 2010)
N = 2	Aucun paramètre physico-chimique mesuré in situ

- 42 échantillons exclus → **105 échantillons retenus**

Élaboration des bases de données analytiques

- Certains paramètres ont été exclus des analyses statistiques multivariées :

Paramètres exclus	Raison de l'exclusion
EC, TSD, pH, Eh	Paramètres additifs
Température	Paramètre physique
OD, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$	Paramètres avec peu de variation régionale
Alcalinité totale	Paramètre lié à la concentration en HCO_3^-
Al, Sb, Ag, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Cr, Co, Cu, Sn, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, U, Ti, V, Zn, N-NH ₃ , Br, F, N, P	Paramètres avec plus de 15% des échantillons sous la limite de détection (Sanford et al., 1993)

→ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Sr^{2+} et Si^{4+}

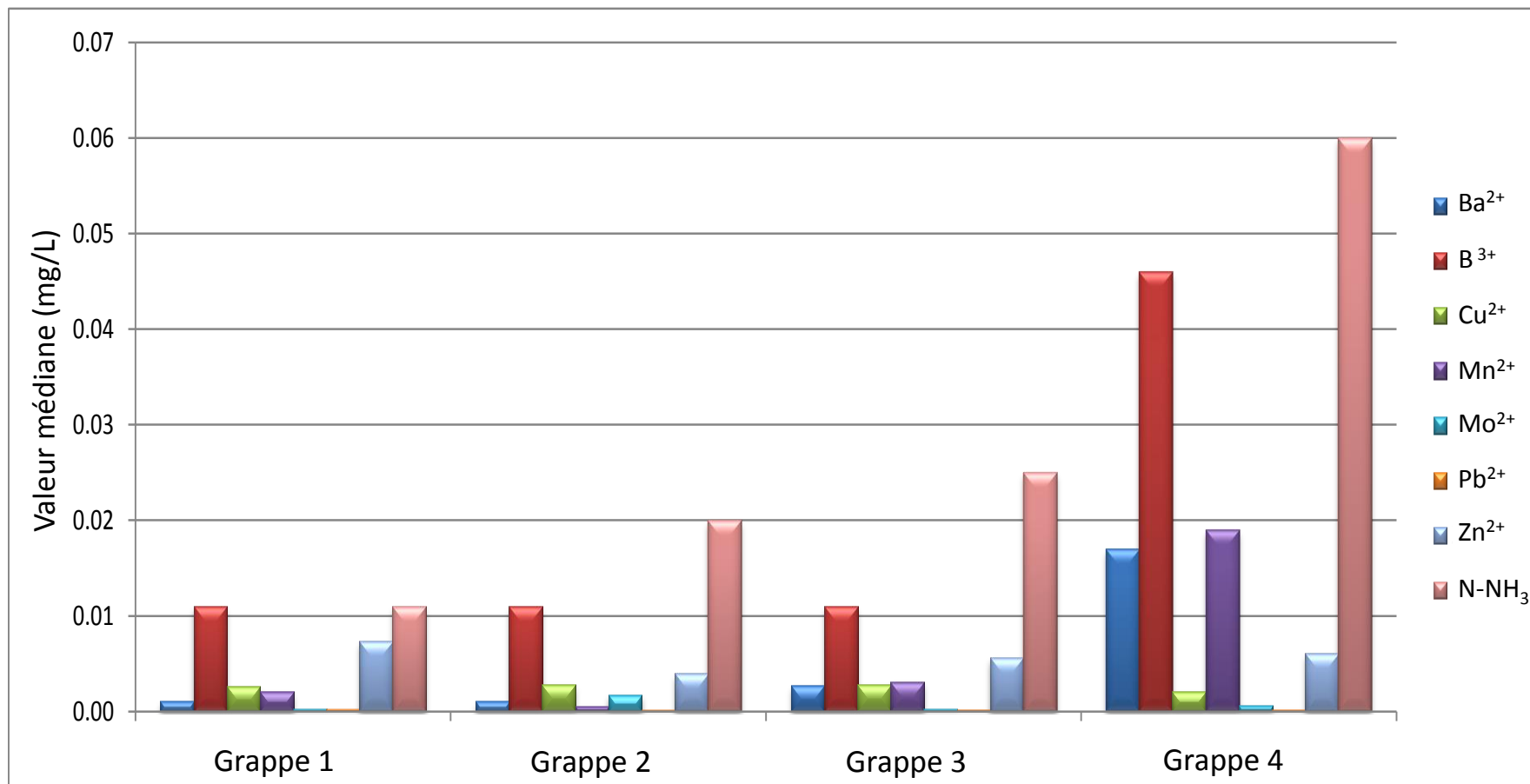
→ Concentration inférieure à la limite de détection (LMD) : **0,55 x LMD** (Güler et al., 2002)

Geochemical and physical characteristics of each cluster (median concentrations in mg/L)

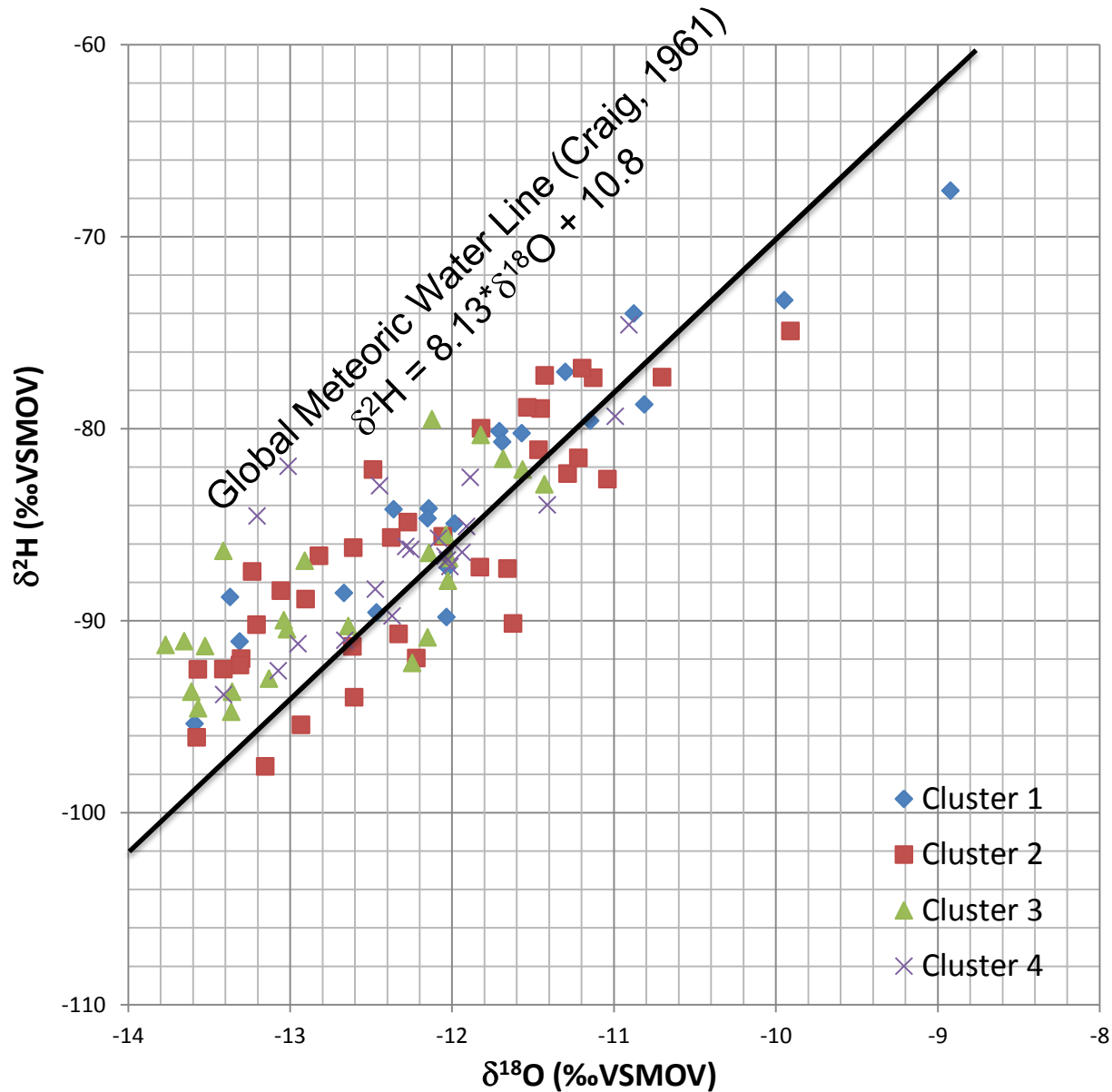
Parameters	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
N	N = 22	N = 38	N = 24	N = 21
Chemical parameters used in the HCA				
Ca ²⁺	<u>4.9</u>	15.5	19	29
Mg ²⁺	<u>1.05</u>	1.75	3.15	6.8
Na ⁺	<u>2.2</u>	4.85	4.95	56
K ⁺	<u>0.6</u>	0.595	1.35	3.2
HCO ₃ ⁻	<u>21.35</u>	54.9	73.81	146.4
Cl ⁻	<u>0.9</u>	2.55	2.35	52
SO ₄ ²⁻	<u>1.65</u>	5	7	10
Si ⁴⁺	6.15	<u>5.25</u>	7.15	6.5
Sr ²⁺	<u>0.0305</u>	0.0855	0.16	0.24
Other chemical parameters				
Ba ²⁺	<u>0.0011</u>	<u>0.0011</u>	0.00275	0.017
B ³⁺	<u>0.011</u>	<u>0.011</u>	<u>0.011</u>	0.046
Cu ²⁺	0.00265	0.00285	0.0028	<u>0.0021</u>
Mn ²⁺	0.0021	<u>0.00059</u>	0.00315	0.019
Mo ²⁺	<u>0.000275</u>	0.00175	<u>0.000275</u>	0.00067
Pb ²⁺	0.00023	<u>0.00018</u>	0.000195	0.00022
Zn ²⁺	0.00735	<u>0.003975</u>	0.00565	0.0061
Total alkalinity	<u>17.5</u>	45	60.5	120
N-NH3	<u>0.011</u>	0.02	0.025	0.06
F ⁻	<u>0.055</u>	0.2	0.1	0.4
Physical parameters				
Temperature	8.94	7.68	7.345	7.63
pH	<u>6.185</u>	7.625	7.26	7.61
Dissolved O ₂	8.305	3.645	0.63	<u>0</u>
TDS	<u>24.5</u>	61	71.5	215 ³⁷

N: Number of samples; bold values: highest values; underlined values: lowest values

Calcul de la valeur médiane de la concentration : Paramètres mineurs



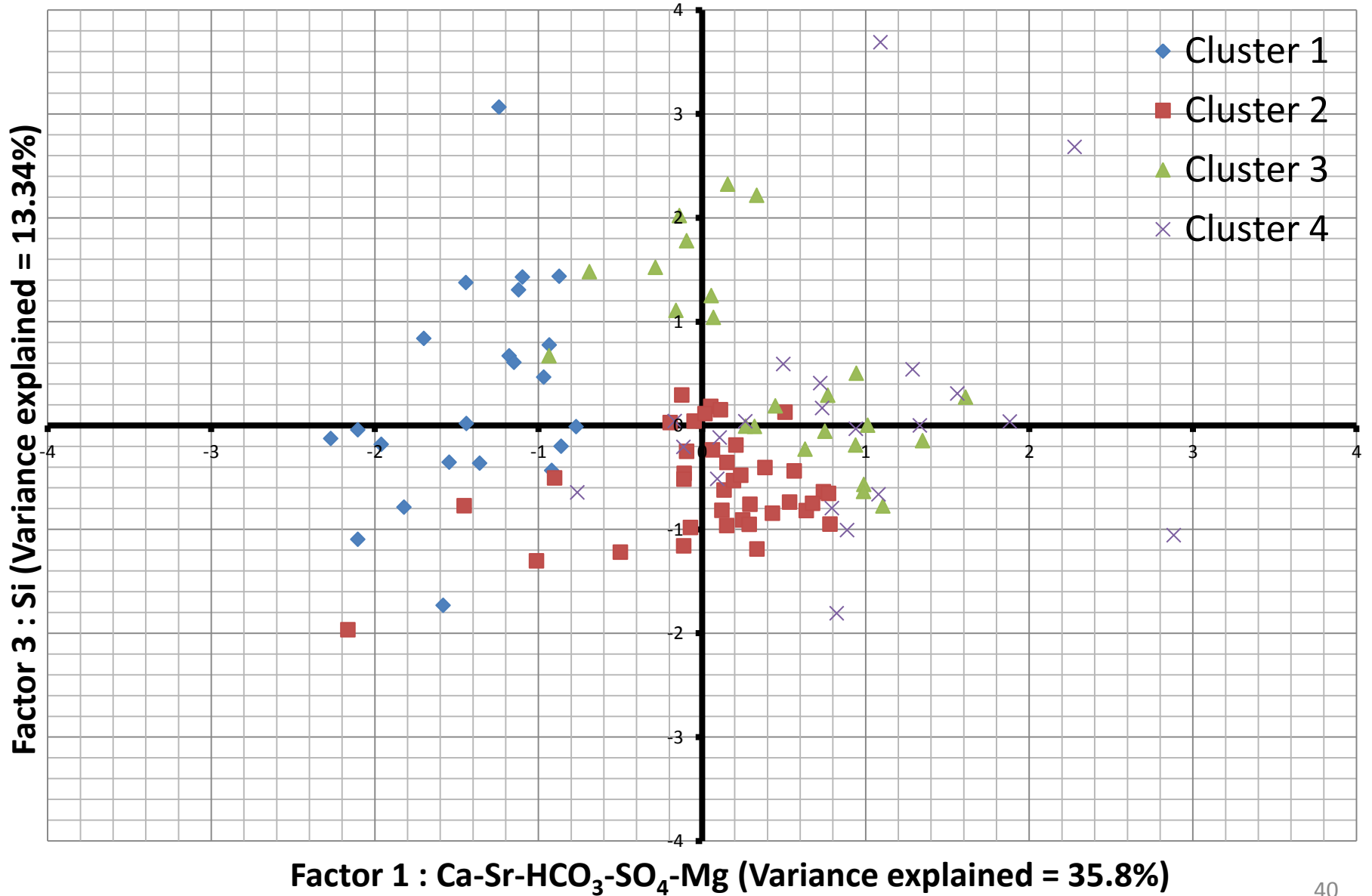
Isotopes stables ^2H et ^{18}O



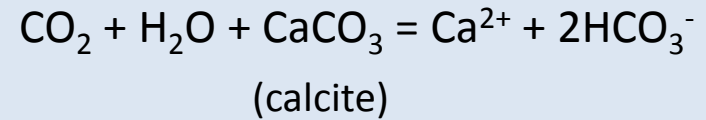
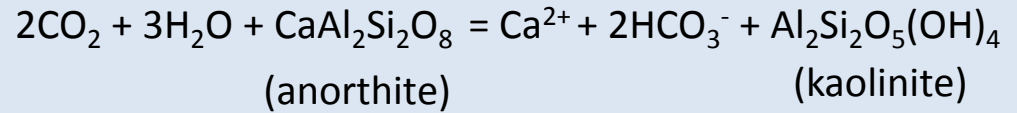
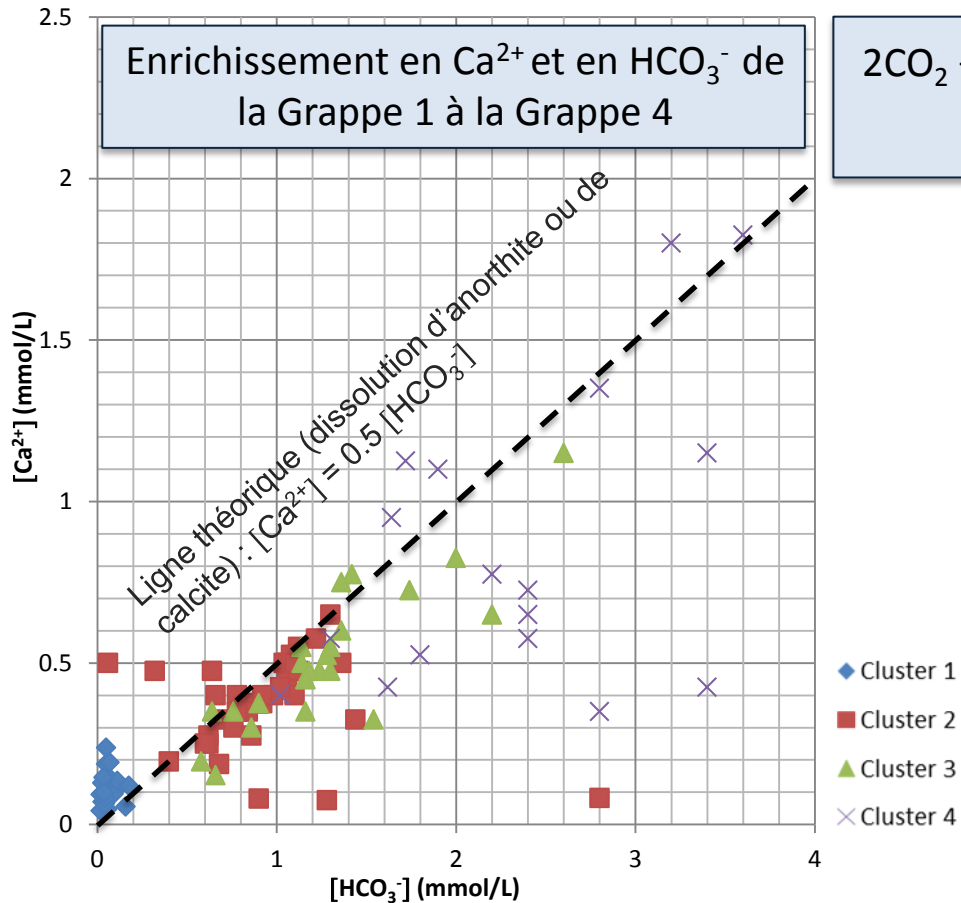
→ Origine commune des eaux échantillonnées

→ Eau de recharge en climat froid à tempéré

F1 versus F3



Interprétation des résultats : Diagrammes binaires



Dissolution de minéraux riches en Ca^{2+}

- **Conclusions :**

- **Quatre grappes** d'eaux souterraines **géochimiquement distinctes**
- **Trois principaux facteurs** expliquant **80,98%** de la variance des données géochimiques
- Classification des grappes en différents groupes d'eau souterraine caractéristiques de leur évolution

Grappe 1 (Ca-HCO₃) : Eaux souterraines faiblement minéralisées récemment infiltrées provenant d'aquifères granulaires en zone de recharge

Grappe 2 ((Ca-Na)-HCO₃) et Grappe 3 (Ca-HCO₃) : Eaux souterraines mélangées ou intermédiaires entre les eaux de la Grappe 1 et de la Grappe 4 provenant possiblement d'aquifères granulaires et fracturés interconnectés

Grappe 4 (Na-(HCO₃-Cl)) : Eaux souterraines minéralisées plus anciennes provenant d'aquifères fracturés confinés en zone de décharge

- **Conclusions :**

- **Cinq principaux facteurs** ont été identifiés :

- Recharge par des eaux de précipitations récentes

- Interactions eau-roche

- Échanges ioniques

- Présence d'aquitards d'argile marine ou d'intrusions d'eau salée

- Connexions hydrauliques entre le socle rocheux et les dépôts granulaires

- Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux d'autres études réalisées au Québec

- (Cloutier et al., 2008; Walter, 2010; Beaudry, 2013; Montcoudiol et al., 2014)*

- Diverses **études complémentaires** pourraient confirmer ou non ces interprétations