



Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

**Considérations géoenvironnementales associées aux stériles du gisement de
carbonatite d'éléments de terres rares et à spath fluor d'Ashram,
Nunavik, Québec, Canada**

MARIAMA SOW

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie minéral

Décembre 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

**Considérations géoenvironnementales associées aux stériles du gisement de
carbonatite d'éléments de terres rares et à spath fluor d'Ashram,
Nunavik, Québec, Canada**

Présenté par **Mariama SOW**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Eric ROSA, président

Marc LEGAULT, membre et directeur de recherche

Benoît PLANTE, membre et codirecteur de recherche

Félix GERVAIS, membre externe

DÉDICACE

Je dédie ce travail à ma grande mère Diéyi Ndour, à mon oncle Fassar Dieng, à toute ma famille ainsi que tous mes amis.

« Ce qui compte, c'est la quantité d'amour que nous mettons dans le travail que nous faisons ».

Mère Teresa

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah le tout miséricordieux, le très miséricordieux. Je rends grâce à Allah qui m'a tout donné dans la vie. Je prie sur son noble prophète Mouhammad paix et salut sur lui. Dieu Merci.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de :

M. Marc Legault, qui à réaliser mon rêve de continuer mes études au Canada, en me donnant la chance de travailler sous sa direction sur ce projet. Les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance envers vous. Merci encore pour votre disponibilité, tout le soutien et les conseils que vous m'avez apporté depuis mon séjour à Rouyn Noranda et avant même mon arrivé.

M. Benoît Plante, qui à travers sa chaire de recherche institutionnelle en géochimie environnementale des ressources minérales critiques et stratégiques, a financé ce projet. Merci pour votre disponibilité et vos encouragements. J'ai beaucoup appris à travers vous.

M. Felix Gervais et M. Éric Rosa d'avoir examinés ce travail et d'avoir fourni des commentaires constructifs.

M. Darren Smith, aviseur technique senior pour Mont Royal Resources, pour son support et son intérêt tout au long du projet et pour ses commentaires sur les documents écrits.

La compagnie Mont Royal Resources (anciennement Commerce Resources) pour avoir partagé leurs données et également de m'avoir permis de travailler sur leur projet.

L'équipe de l'URSTM particulièrement Alain Perrault, Roch Germain, Julie Beaulieu et Théo Gaxotte pour l'aide technique et à la réalisation de mes essais, sans oublier Awoh Akué Sylvette directrice de l'URSTM. Un grand merci à vous madame pour les conseils et les orientations. Je vous ai tellement fatiguée avec mes bêtises mais vous avez toujours été là comme une mère pour moi. Merci encore une fois maman.

Tous mes camarades à l'IRME particulièrement Mamadou Bachir Thiam, Alain Dima Donald, Mahamadou Traoré, Amine Tahiri et Mbwe Mbissik Aaron Hervé, Wassim Zarrouk, sans oublier ma chère Gretta Kamaro, ma jumelle d'une autre mère. Un grand merci pour le soutien tout au long de mon séjour à Rouyn.

Tout le corps professoral de l'IRME particulièrement à Mme Lucie Coudert et M. Tikou Belem.

Toute la communauté Sénégalaise de Rouyn Noranda, aux familles Gueye et Diatta et à mon ami Mouhamed Bini Mangane pour leur soutien et l'accompagnement depuis mon arriver au Canada.

Toute ma famille, Omar Marico, Lamine Diaw, Cathy Faye et M Mamadou Niane. Merci à vous pour les conseils et le soutien.

RÉSUMÉ

Le drainage neutre contaminé (DNC) est l'un des problèmes environnementaux auquel fait face l'industrie minière. Le DNC se forme lorsque des métaux solubles contenus dans les minéraux sont entraînés dans les eaux souterraines ou de surface avec un pH proche de la neutralité et en contaminants dépassant les normes réglementaires. Certains gisements associés aux carbonatites, bien qu'étant souvent potentiellement non générateurs d'acide à cause de la présence suffisante de minéraux neutralisants, peuvent présenter des risques de génération de DNC. Pour la prédiction de ce dernier, on fait recours aux essais cinétiques en laboratoire, tels que les essais en colonne, bien que ces essais aient été développés à la base pour la prédiction du drainage minier acide.

L'objet principal de ce mémoire était d'évaluer les considérations géoenvironnementales associées aux futurs stériles qui seront issus de la fosse du gisement de carbonatite d'éléments de terres rares (ETR) d'Ashram. Pour ce faire, des analyses physiques, chimiques et minéralogiques ont été réalisées sur les quatre différentes lithologies des roches stériles (RS) (lamprophyre RS, carbonatite RS, fénite RS et brèche RS). Ces analyses étaient suivies par des essais cinétiques en colonnes de laboratoire sur une période de 12 mois afin d'étudier le potentiel de génération de DNC des stériles.

Les résultats obtenus indiquent que la chimie et la minéralogie des stériles sont conformes aux attentes. Les caractérisations montrent que les stériles ne sont pas potentiellement générateurs d'acide, contenant seulement des traces de sulfures et suffisamment de minéraux neutralisants. Les lixiviats montrent des concentrations de métaux dissous généralement faibles et qui diminuent progressivement dans les lixiviats tout au long des rinçages, sauf pour le baryum dans toutes les lithologies et le plomb dans le lamprophyre RS* (cette lithologie est un mélange de 43% de carbonatite RS et de 57% de lamprophyre RS). Le lamprophyre représente une faible proportion des lithologies stériles provenant de la fosse et donc sa contribution finale au budget total sera minime. Le pH des lixiviats est proche de la neutralité et se stabilise autour de 8,35, tandis que la conductivité électrique, le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et l'alcalinité montrent une tendance baissière et se stabilisent à partir de 220 jours respectivement autour de 370 µS/cm, 415 mV et 125 mg CaCO₃/L. Le céryum, le lanthane et le néodyme sont les ETR les plus communs dans les stériles et représentent majoritairement les ETR détectés dans les lixiviats des stériles. Certains éléments tels que le baryum et le plomb nécessitent une attention particulière (car pouvant atteindre des concentrations dépassant les normes réglementaires) et le risque de génération de contaminants

devrait être mieux précisé par des essais réalisés sur le terrain avec des grandes quantités de matériau.

ABSTRACT

Contaminated neutral drainage (CND) is one of the environmental problems facing the mining industry. CND forms when soluble metals contained in minerals are carried into groundwater or surface water with pH values close to neutral and concentrations exceeding regulatory standards. Some deposits associated with carbonatites, although often potentially non-acid-generating due to the presence of sufficient neutralizing minerals, may present risks of CND generation. Laboratory kinetic tests, such as column tests, are used to predict CND, although they were originally developed for the prediction of acid mine drainage.

The main objective of this thesis was to evaluate the geoenvironmental considerations associated with future waste rock from the Ashram Rare Earth Element (REE) Carbonatite Deposite. To this end, physical, chemical, and mineralogical analyses were conducted on the four different lithologies of the waste rock (WR) (lamprophyre WR, carbonatite WR, fenite WR, and breccia WR). These analyses were followed by kinetic tests in laboratory columns over a 12-month period to study the DNC generation potential of the waste rock. The results indicate that the chemistry and mineralogy of the waste rock are consistent with expectations. Characterizations show that the waste rock is not potentially acid-generating, containing only trace amounts of sulfides and sufficient neutralizing minerals. The leachates show generally low concentrations of dissolved metals that gradually decrease in the leachate throughout the rinses in a downward trend, except for barium in all lithologies and lead in the lamprophyre WR* (this lithology is a mixture of 43% carbonatite WR and 57% lamprophyre WR). The lamprophyre WR represents a low percentage of waste lithologies from the pit and therefore its final contribution to the total budget will be minimal. The pH of the leachates is close to neutrality and steady around 8.35 while the electrical conductivity, the oxidation-reduction potential (Eh) and the alkalinity show a downward trend and stabilize from 220 days respectively around 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 415 mV and 125 mg CaCO₃/L. Cerium, lanthanum and neodymium are the most common REE in the tailings and represent the majority of the REE detected in the waste rock and in the leachate. Some elements such as barium and lead require special attention (as they can reach concentrations exceeding regulatory standards) and the risk of contaminant generation should be better specified by field tests with large quantities of material.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
ABSTRACT	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XXIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique.....	4
1.3 Objectifs de cette étude	4
1.4 Hypothèses	4
1.5 Structure du mémoire	5
1.6 Livrables et retombées du projet	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Présentation des ETR	6
2.2 Utilité des ETR.....	8
2.3 Production mondiale d'ETR.....	11
2.4 Les types de gisements associés aux ETR dans le monde	12
2.4.1 Carbonatites.....	12
2.4.2 Fénitisation.....	13
2.4.3 Gisements associés aux complexes de carbonatite	13
2.4.4 Présentation du gisement d'Ashram.....	15

2.4.5	Impacts environnementaux liés à l'exploitation des gisements de carbonatites d'ETR	22
2.5	Notions de DNC	22
2.5.1	Formation et prédition du DNC	23
2.6	Essais cinétiques de laboratoire	23
2.6.1	Cellules humides	24
2.6.2	Mini-cellules d'altération	25
2.6.3	Essais en colonnes	26
	CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE	29
3.1	Sélection des échantillons	31
3.2	Caractérisation physique	34
3.2.1	Granulométrie	34
3.2.2	Masse volumique	34
3.3	Caractérisation chimique	34
3.3.1	Analyse chimique élémentaire par ICP-AES/MS	35
3.3.2	XRF	35
3.3.3	Soufre et carbone	36
3.4	Caractérisation minéralogique	36
3.4.1	Microscopie optique (MO)	36
3.4.2	Diffraction de rayons X (DRX)	37
3.4.3	Microscopie électronique à balayage (MEB)	37
3.4.4	Minéralogie automatisée MLA	38
3.5	Essai cinétique	38
3.6	Modélisation géochimique avec le logiciel PHREEQC	40
3.7	Démantèlement des colonnes	40

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 « GEOENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS ASSOCIATED WITH WASTE ROCK FROM THE ASHRAM RARE EARTH ELEMENT (REE) AND FLUORSPAR CARBONATITE DEPOSIT, NUNAVIK, QUEBEC, CANADA ».....	42
4.1 Introduction	43
4.2 Ashram Deposit.....	44
4.3 Materials and Methodology	48
4.3.1 Sample selection.....	48
4.3.2 Physical characterizations	49
4.3.3 Chemical characterizations	49
4.3.4 Mineralogical characterizations	49
4.3.5 Laboratory Column Kinetic Testing	50
4.3.6 Geochemical modeling with PHREEQC software.....	52
4.4 Results and discussions	53
4.4.1 Physical characterizations	53
4.4.2 Chemical characterizations	53
4.4.3 Mineralogical characterizations	57
4.4.4 Laboratory Column Kinetic Testing	63
4.4.5 Geochemical modeling with PHREEQC software.....	68
4.5 Conclusion.....	69
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE	74
5.1 Caractérisations physiques, chimiques et minéralogiques	74
5.2 Essai cinétique en colonne de laboratoire	82
5.3 Modélisation géochimique	91
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	94
RÉFÉRENCES.....	96

ANNEXES	102
---------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques des ETR (British Geological Survey, 2011; Castor et Hedrick, 2006; Gupta et Krishnamurthy, 2005; Taylor et McLennan, 1985).....	7
Tableau 2.2 : Utilisations courantes des ETR (Jowitt <i>et al.</i> , 2018).....	10
Tableau 2.3 : Prix des éléments de terres rares en 2023 en dollars américains par kilogramme (U.S. Geological Survey, 2024).....	10
Tableau 2.4 : Producteurs mondiaux d'ETR et le gisement d'Ashram (Commerce Resources Corp., 2023).....	15
Tableau 2.5 : Composition des différentes zones du gisement d'Ashram (Cassoff <i>et al.</i> , 2024) .	20
Tableau 2.6 : Avantages et inconvénients des essais cinétiques en colonnes de laboratoire (Bouzahzah <i>et al.</i> , 2014; Bussière et Guittonny, 2021; MEND, 1991; Villeneuve, 2004) ...	28
Tableau 3.1 : Calcul des quantités de chaque lithologie dans chaque colonne pour cette étude et celle de Zarrouk (2025).....	33
Table 4.1 : Similarities between the Ashram Deposit and other REEs carbonatites deposits around the world.....	46
Table 4.2 : Physical properties of the waste rocks used in the study.	53
Table 4.3 : Chemical characterization of waste rocks used in the study by XRF and sulfur-carbon. L.O.I. = loss on ignition.	54
Table 4.4 : Concentration of elements in ppm in samples	55
Table 4.5 : REE concentrations in ppm.....	56
Table 4.6 : Mineral proportions of waste rocks from MLA and XRD analysis.....	60
Table 4.7 : Mineralogical proportions of waste rocks used in this study after reconciliation. Chemical formula used for calculation of mineral percentages are presented.....	61
Table 4.8 : Final effluent discharge point requirements of directive 019 of some elements (Ministry of the Environment, the Fight Against Climate Change, Wildlife and Parks (MELCCFP), 2025).....	66

Tableau 5.1 : Caractérisations physiques et chimiques du lamprophyre RS* utilisé dans l'étude par XRF, S/C et ICP OES/MS.....	75
Tableau 5.2 : Composition minéralogique en % du lamprophyre RS* par MLA et par DRX	77
Tableau 5.3 : Composition minéralogique en % du lamprophyre RS* suite à une réconciliation minéralogique.....	79
Tableau 5.4 : Analyses des radionucléides.....	91
Tableau A 1 : Les principaux types gisements d'ETR.....	102
Tableau A 2 : L'ensemble des travaux antérieurs effectués dans la zone d'Ashram.....	103
Tableau A 3 : Sélection des échantillons de carbonatites.....	105
Tableau A 4 : Sélection des échantillons de lamprophyres.....	106
Tableau A 5 : Sélection des échantillons de brèches.....	106
Tableau A 6 : Sélection des échantillons de fénites.....	107
Tableau A 7 : Limites minima de détection de quelques éléments données par URSTM et SGS	108

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Tableau périodique des éléments chimiques (Charles <i>et al.</i> , 2021)	2
Figure 1.2 : Carte des projets majeurs d'ETR au Canada (Ressources naturelles Canada, 2024)..	3
Figure 2.1 : Diagramme normalisé par chondrite des principaux minéraux porteur d'ETR (Dostal, 2017).....	8
Figure 2.2 : Utilisation des terres rares en 2022 (Ressources naturelles Canada, 2022)	9
Figure 2.3 : Production mondiale d'ETR en 2023 (USGS, 2025)	11
Figure 2.4 : Répartition des gisements d'ETR dans le monde (Liu <i>et al.</i> , 2023).....	12
Figure 2.5 : (A) Localisation du gisement d'Ashram (Commerce Resources Corp., 2023); (B) Cadre géologique du complexe de carbonatite d'Eldor (Clark et Wares, 2006).	16
Figure 2.6 : Emplacement des gisements de minéraux dans la base de données SIGEOM et autres sites minéralisés dans la carbonatite d'Eldor. Site 2 : 7,00 % Nb, 0,24 % La + Ce, 0,21 % Th, 0,02 % Y; site 9 : 3,52 % La + Ce, 0,01 % Nb; site 10 : 1,13 % La + Ce, 0,02 % Nb (Clark et Wares, 2006).	17
Figure 2.7 : L'enveloppe modélisée de la fosse du gisement d'Ashram mettant en évidence les forages effectués après 2012 (Cassoff <i>et al.</i> , 2024). Les unités géologiques qui forment en partie les stériles (fénites, brèches et lamprophyres) ne sont pas représentées sur la carte vu leurs distributions hétérogènes et/ou leurs épaisseurs métriques.	18
Figure 2.8 : Coupe transversale du modèle géologique du gisement d'Ashram avec les différentes zones (Cassoff <i>et al.</i> , 2024). La zone BD ne figure pas sur la section car elle n'est pas incluse dans le calcul des ressources.	20
Figure 2.9 : (a) Schéma de cellules humides (Bussière et Guittonny, 2021). (b) Photographies de cellules humides pour des résidus (à gauche) et pour des stériles (à droite).....	24
Figure 2.10 : Photographie et schéma de mini-cellule	25
Figure 2.11 : Photographie de colonnes d'essai	27
Figure 3.1 : Méthodologie détaillée du projet. Voir le texte pour plus de détails.....	30
Figure 3.2 : Démantèlement des colonnes	41

Figure 4.1: Plane section of the geological model of the Ashram deposit located in northern Quebec (Cassoff <i>et al.</i> , 2024).....	47
Figure 4.2 : The setup for laboratory column kinetic testing.....	51
Figure 4.3 : REEs normalized with chondrite. This mineralized sample from the A Zone is from Beland and Williams-Jones (2021a). Chondrite values from McDonough and Sun (1995). ..	57
Figure 4.4 : Ternary diagram of carbonates from waste rocks analyzed with SEM-EDS showing the presence of several types of carbonates (n is the number of analyses).	58
Figure 4.5 : SEM-BSE images of the fenite WR (A), the carbonatite WR (B) and the breccia WR (C and D) samples. Ank (Ankerite), Ap (Apatite), Dol (Dolomite), Flr (Fluorite), Gn (Galena), Mnz (Monazite), Pst (Parisite), Py (Pyrite), Pyh (Pyrrhotite), Sp (Sphalerite).	59
Figure 4.6 : Distribution of REEs in carrier minerals from the waste rocks.....	63
Figure 4.7 : Evolution of pH (a), conductivity (b), redox potential (c) and alkalinity (d) for the three waste rock lithologies.....	64
Figure 4.8 : Evolution of the concentration of anions and dissolved metals for the three main waste rock lithologies : fluorides (a), sulphates (b), Ba (c), Pb (d), Stotal (e), Ca (f), Mg (g), Mn (h), Sr (i), Zn (j), La (k), Ce (l), Eu (m).	65
Figure 4.9 : Oxidation-neutralization curves of the three waste rock lithologies.	67
Figure 4.10 : Secondary minerals likely to be precipitated in the carbonatite WR (a), the fenite WR (b) and the breccia WR (c).	68
Figure 4.11: Saturation indices of rare earth minerals in the carbonatite WR (a), the fenite WR (b) and the breccia WR (c).	69
Figure 5.1 : Lames minces polies de lamprophyre RS* (A), de carbonatite RS (B), de fénite RS (C) et de brèche RS (D) observés au microscope optique.....	76
Figure 5.2 : Diagramme ternaire des carbonates issus de stériles analysés par MEB-EDS montrant la présence de plusieurs types de carbonates (n est le nombre d'analyses).	78

Figure 5.3 : Images de MEB-BSE d'un échantillon de lamprophyre RS* montrant la présence de fluorite (Flr) et d'apatite (Ap) parmi de grains de dolomite (Dol) et d'ankérite (Ank) (A) et l'association galène (Gn) et pyrrhotite (Pyh) (B). Ab = albite; Bt = biotite; Sp = sphalérite.	80
Figure 5.4 : Distribution des ETR dans les minéraux porteurs pour l'échantillon de lamprophyre RS*.....	81
Figure 5.5 : Observation au MEB-EDS des échantillons post-démantèlements du lamprophyre RS* (a) et de la brèche RS (b).....	82
Figure 5.6 : Évolution du pH (a), de la conductivité (b), du potentiel redox (c) et de l'alcalinité (d) pour les quatre lithologies de stériles.	83
Figure 5.7 : Évolution de la concentration des anions et des métaux dissout pour les quatre lithologies : fluorures (a), sulfates (b), Ba (c), Pb (d), S total (e), Ca (f), Mg (g), Mn (h), Sr (i), Zn (j), La (k), Ce (l), Eu (m). ..	85
Figure 5.8 : Courbes cumulées normalisées des métaux dans les lixiviats des quatre lithologies.	87
Figure 5.9 : Courbes cumulées normalisées des métaux dans les lixiviats des quatre lithologies (suite).....	88
Figure 5.10 : Courbes cumulées normalisées des ETR dans les lixiviats des quatre lithologies..	89
Figure 5.11 : Courbes d'épuisements du soufre et du Ca+Mg+Mn pour les quatre lithologies de stérile.	90
Figure 5.12 : Effet du pH sur la distribution des ETR du lamprophyre RS* (a), carbonatite RS (b), fénite RS (c) et brèche RS (d).	92
Figure 5.13 : Distribution des espèces carbonatées en solution (Zosel <i>et al.</i> , 2011)	93
Figure A 1 : Courbes granulométriques des différentes lithologies.....	110
Figure A 2 : Courbes de réconciliation minéralogique des différentes lithologies.....	111

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Al	Aluminum
As	Arsenic
ASTM	American Society for Testing and Materials
Au	Or
B	Bore
Ba	Baryum
Be	Béryllium
Bi	Bismuth
Bq	Becquerel
°C	Degrés Celsius
Ca	Calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaF ₂	Fluorure de calcium
Cd	Cadmium
Ce	Cérium
CLS	Canadien Light Source
cm	Centimètre
Co	Cobalt
CO ₂	Dioxyde de carbone
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
DRX	Diffraction des rayons X
Dy	Dysprosium
EDS	Spectromètre à dispersion d'énergie
EDTA	Éthylène diamine tétra acétique
Eh	Potentiel d'oxydoréduction
Er	Erbium
ETR	Éléments de terres rares

Eu	Europium
F	Fluor
Fe	Fer
Fe ⁺⁺	Ion ferreux
Fe ⁺⁺⁺	Ion ferrique
FeS ₂	Pyrite
Fe(OH) ₃	Hydroxyde ferrique
Ga	Milliard d'années
Gd	Gadolinium
H ⁺	Ion d'hydrogène
H ₂ O	Eau
HREE	Éléments de terres rares lourds
H ₂ SO ₄	Sulfate d'hydrogène
Ho	Holmium
ICP-AES	Spectroscopie d'émission atomique à plasma à couplage inductif
ICP-OES	Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif
ICP-MS	Spectroscopie de masse à plasma à couplage inductif
IOCG	Fer-oxyde-cuivre-or
IRME	Institut de recherche en mines et en environnement
kg	Kilogramme
K	Potassium
IUGS	Union Internationale des Sciences géologiques
km	Kilomètre
L	Litre
Li	Lithium
La	Lanthane
LGF	Fénites à faible teneur
LILE	Éléments lithophile à gros ions
LMD	Limite minimum de détection
L.O.I	Loss On Ignition
LREE	Éléments de terres rares légers

Ltd	Limited
Lu	Lutétium
MC	Métaux critiques
MEB	Microscope électronique à balayage
Mg	Magnésium
mg	Milligramme
MHREO	Oxydes de terres rares moyennes et lourdes
ml	Millilitre
MLA	Libération minérale couplée à la microscopie électronique à balayage
mm	Milimètre
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
MO	Microscopie optique
MS	Spectrométrie
mV	Millivolt
N	Normalité
Na	Sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
Nb	Niobium
Ni	Nickel
Mt	Million de tonnes
Nd	Néodymium
NE	Nord-Est
NPGA	Non potentiellement génératrice d'acide
O ₂	Dioxygène
OES	Spectroscopie d'émission optique
OH	Hydroxyde
OH ⁻	Ion Hydroxyde
TREO	Teneur total en oxydes de terres rares
PA	Potentiel de génération d'acide

Pb	Plomb
^{210}Pb	Plomb-210
Pe	Activité des électrons en solution
PGA	Potentiellement générateur d'acide
pH	Potentiel d'hydrogène
Pm	Prométhium
PN	Potentiel de neutralisation
PNN	Potentiel net de neutralisation
PO_4	Phosphate
ppm	Partie par million
Pr	Praséodyme
R	Rinçage
^{226}Ra	Radium-226
RS	Roche stérile
S	Soufre
$$/\text{t}$	Dollar par tonne
S/C	Soufre et carbone
Sc	Scandium
Se	Sélénium
SGS	Société Générale de surveillance
SiO_2	Dioxyde de silicium
Sm	Samarium
SO_2	Dioxyde de soufre
SO_4^{2-}	Ion sulfate
Sr	Strontium
SRC	Saskatchewan Research Council
t	Tonne
Ta	Tantale
Tb	Terbium
Ti	Titane
Th	Thorium

^{228}Th	Thorium-228
^{230}Th	Thorium-230
^{232}Th	Thorium-232
Tm	Thulium
TV	Télévision
U	Uranium
μm	Micromètre
μS	Microsiemens
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
USA	États Unis d'Amérique
USD	Dollard américain
XRF	Fluorescence des rayons X
WS	Waste rock
Y	Yttrium
Yb	Ytterbium
Zn	Zinc
%	Pourcent

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A.....	102
---------------	-----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Dans un monde marqué par une ruée vers des technologies propres émergentes, telles que les éoliennes, les véhicules électriques et l'éclairage économique en énergie, la demande en métaux stratégiques notamment les éléments de terres rares (ETR) ne cesse de croître. Ces métaux sont indispensables à la fabrication de composantes clés dans ces technologies (Zhou *et al.*, 2017), rendant leur approvisionnement une priorité stratégique pour de nombreux pays, désireux de limiter leur dépendance aux marchés. De ce fait, l'exploitation de ces métaux au Canada pourrait engendrer des gains économiques considérables en réduisant la dépendance du pays vis-à-vis de la Chine, premier producteur mondial d'ETR avec 70% de la production totale mondiale et 87 % de la production mondiale affinée (Ressources naturelles Canada, 2024).

Les ETR comprennent 17 éléments chimiques allant du numéro atomique 57 à 71 (les lanthanides) ainsi que le scandium (Sc) de numéro atomique 21 et l'yttrium (Y) de numéro atomique 39 (Figure 1.1). Ces deux derniers ont des propriétés chimiques physiques similaires aux lanthanides et c'est pour cette raison qu'ils sont généralement regroupés avec les lanthanides (Lima et Leal Filho, 2016; Preinfalk et Morteani, 1989; Schulz *et al.*, 2017; Voncken, 2016). De plus, en raison de leur rôle central dans les technologies industrielles, leurs propriétés physico-chimiques intéressantes et leurs potentiels substitutifs très peu connus à ce jour, les ETR sont de plus en plus explorés, nonobstant la grande pression environnementale qui peut en découler. Les ETR sont subdivisés en deux groupes distincts en fonction de leur masse atomique, soit les terres rares légères (LREE) et les terres rares lourdes (HREE). Selon Schulz *et al.* (2017), les LREE forment le groupe des lanthanides allant du lanthane (La) au gadolinium (Gd) et les HREE vont du terbium (Tb) au lutétium (Lu). L'yttrium fait partie du groupe des HREE, alors que le Sc n'intègre aucun des deux groupes (Dushyantha *et al.*, 2020). Bien que l'appellation « éléments de terres rares » puisse prêter à confusion, ces éléments ne sont pas rares dans l'écorce terrestre et peuvent se retrouver à des concentrations allant de 0,3 à 64 ppm (Taylor et McLennan, 1985).

The periodic table is shown with several elements highlighted in colored boxes:

- Terres rares légères (LREE):** Scandium (Sc), Prométhium (Pm), Lanthane (La), Cérium (Ce), Praséodyme (Pr), Néodyme (Nd).
- Terres rares lourdes (HREE):** Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutétium (Lu).
- Lanthanides:** Lanthanum (La), Cerium (Ce), Praseodymium (Pr), Neodymium (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutetium (Lu).
- Actinides:** Actinium (Ac), Thorium (Th), Protactinium (Pa), Uranium (U), Neptunium (Np), Plutonium (Pu), Americium (Am), Curium (Cm), Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Figure 1.1 : Tableau périodique des éléments chimiques (Charles *et al.*, 2021)

Les gisements économiques qui renferment les ETR ne sont pas nombreux dans le monde (Castor et Hedrick, 2006; Taylor et McLennan, 1985; Verplanck *et al.*, 2014). Par ailleurs, compte tenu de leur répartition géographique et leur importance pour le développement de nombreuses industries, ils ont gagné en intérêt en tant que métaux critiques (MC), notamment pour des pays comme le Canada, les États-Unis, l'Union Européenne, etc. Ainsi, de nombreuses entreprises minières d'exploration au Canada explorent des zones à fort potentiel, ce qui a permis la définition de plusieurs projets prometteurs (Figure 1.2) (Ressources naturelles Canada, 2024).

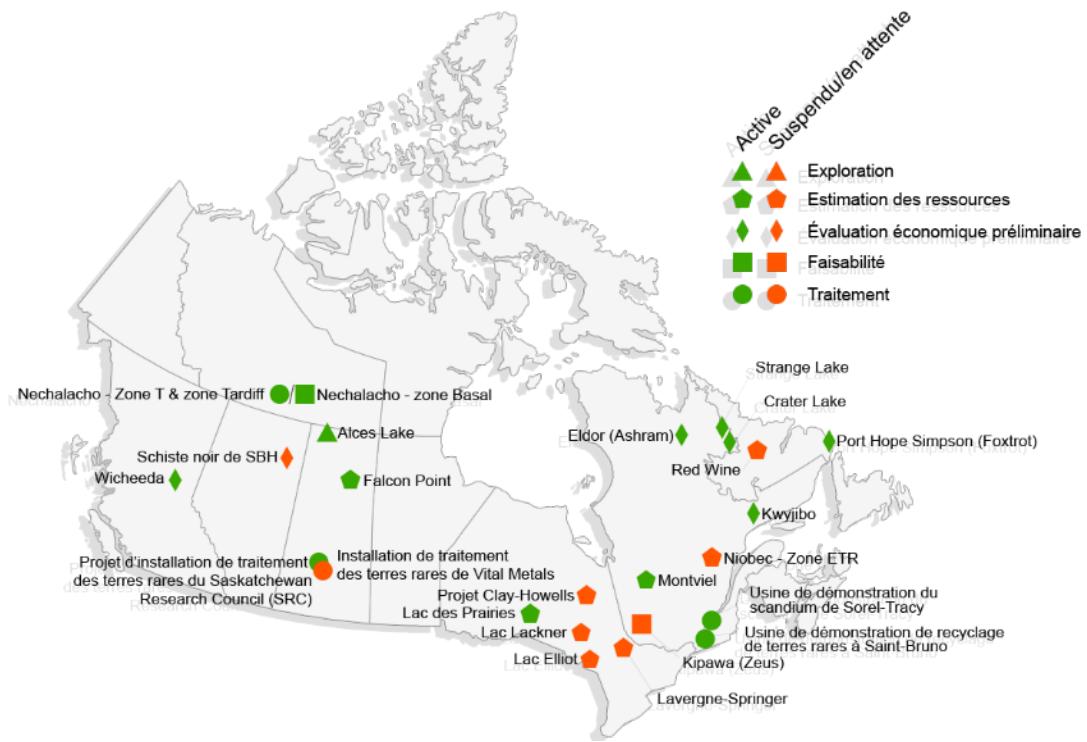


Figure 1.2 : Carte des projets majeurs d'ETR au Canada (Ressources naturelles Canada, 2024)

En plus de la rareté des gisements d'ETR dans le monde, il n'existe presque pas de mines d'ETR abandonnées pour des études environnementales détaillées. Également, les premiers gisements d'ETR tel que les mines de Mountain Pass aux États-Unis et de Bayan Obo en Chine disposent de peu de données environnementales publiées (Van Gosen *et al.*, 2017). Tous ces facteurs limitent l'accès aux informations environnementales liées à l'exploitation des ETR.

Un de ces gisements est celui d'Ashram développé par Mont Royal Resources Ltd. (anciennement Commerce Ressources Corp.) dans le nord du Québec (Nunavik). Les derniers résultats d'exploration révèlent que le gisement d'Ashram renferme 131,1 Mt à 1,91% TREO (teneur en oxyde de terres rares) et 4% CaF₂ en ressources minérales présumées et 73,2 Mt à 1,89% TREO et 6,6% CaF₂ en ressources minérales indiquées (Cassoff *et al.*, 2024). Ces estimations ont été faites avec un seuil de coupure exprimé en un rendement net des métaux (RMN) de 287 \$/t. Le gisement est structuré en quatre zones contenant des ETR (zone A, zone B, brèche classique et zone BD) toutes à l'intérieur de la carbonatite d'Eldor (Cassoff *et al.*, 2024).

1.2 Problématique

L'exploitation des ETR peut présenter un risque de contamination entre autres des eaux de drainage des haldes à stériles et il existe peu d'études sur les impacts des stériles miniers issus de gisements d'ETR (Van Gosen *et al.*, 2017). Ceci souligne l'importance d'une étude géoenvironnementale approfondie du gisement d'Ashram avant le début de l'exploitation. Cette étude mené en collaboration avec l'Institut de recherche en mines et en environnement (IRME), l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), la Chaire de recherche institutionnelle en géochimie environnementales des ressources minérales critiques et stratégiques, le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG), Elements08 et Mont Royal Resources, a pour but d'évaluer les considérations géochimiques associées aux futurs stériles qui seront issus de l'exploitation du gisement d'Ashram. Il se divise en deux études complémentaires : considérations géoenvironnementales associées aux lithologies composant les futurs stériles (ce projet de maîtrise) et une évaluation de méthodes de restauration minière et de valorisation de ces mêmes stériles (Zarrouk, 2025).

1.3 Objectifs de cette étude

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer les considérations géoenvironnementales associées aux futurs stériles qui seront issus du gisement d'Ashram.

Les objectifs spécifiques sont :

- D'évaluer les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des différentes lithologies qui seront présentes dans les futurs stériles miniers du gisement (OS1);
- D'évaluer le potentiel de génération de drainage neutre contaminé (DNC) grâce aux essais cinétiques en colonne en laboratoire sur une période de 12 mois (OS2).

1.4 Hypothèses

Cette recherche vise à répondre à deux questions clés :

- La caractérisation détaillée des stériles du gisement d'Ashram apportera des informations sur la composition des lixiviats issus de ceux-ci.
- Les possibles impacts géoenvironnementaux associés aux stériles du gisement d'Ashram seront connus à travers l'analyses des lixiviats.

1.5 Structure du mémoire

Les travaux de ce mémoire sont rédigés dans six chapitres. Le chapitre 1 qui est l'introduction décrit le contexte, la problématique ainsi que les objectifs du projet. Le chapitre 2 « Revue de littérature » relate brièvement l'utilisation des ETR ainsi que les types de gisements d'ETR et leur répartition dans le monde. Une attention particulière est portée sur le type carbonatites dont le gisement Ashram fait partie ainsi que sur les travaux antérieurs réalisés sur celui-ci. Les essais cinétiques en colonne de laboratoire et plus particulièrement sur ceux qui ont été faits sur des gisements d'ETR associés à des carbonatites sont documentés. Le chapitre 3 « Matériaux et méthodologie » décrit l'ensemble du matériel et des méthodes utilisés dans cette étude en partant des caractérisations physico-chimiques et minéralogiques ainsi que les essais de colonne en laboratoire pour l'évaluation du potentiel de génération de contaminants et de leurs impacts potentiels sur l'environnement. Les résultats sont présentés dans le chapitre 4 sous la forme d'un article scientifique intitulé « **Geoenvironmental considerations associated with waste rock from the Ashram Rare Earth Element (REE) and Fluorspar Carbonatite Deposit, Nunavik, Quebec, Canada** ». Le chapitre 5 présente une discussion générale sur le projet et sur les résultats qui ne sont pas présentés dans l'article. Le chapitre 6 présente la conclusion générale et les recommandations du projet de recherche.

1.6 Livrables et retombées du projet

Cette étude va augmenter les connaissances de la géochimie des gisements d'ETR associés aux carbonatites en climat nordique. Les résultats permettront aussi de diminuer les risques environnementaux que peuvent causer les stériles du gisement d'Ashram. Ces connaissances ont été transférées au partenaire par des rencontres et également au grand public par des affiches au Symposium Mines & Environnement 2025 et Québec Mines + Énergie 2025, un article scientifique et ce mémoire de maîtrise.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les éléments de terres rares (ETR) jouent un rôle stratégique dans le développement des technologies modernes, notamment dans les secteurs de l'énergie verte, des télécommunications et de la défense. Bien qu'ils ne soient pas si rares d'un point de vue géologique, leur dispersion dans l'écorce terrestre rend leur exploitation complexe. La demande croissante pour ces éléments, en particulier dans le contexte de la transition énergétique, met en lumière des enjeux majeurs liés à leur exploration, leur extraction et leurs impacts environnementaux. Ce chapitre décrit la géologie des ETR, leurs défis environnementaux associés, et s'appuie sur le cas du gisement d'Ashram pour illustrer ces enjeux dans un contexte concret d'exploration minière.

2.1 Présentation des ETR

Les ETR sont des éléments lithophiles et regroupent les lanthanides, auxquels s'ajoutent le scandium (Sc)¹ et l'yttrium (Y). Leurs abondances dans la croûte supérieure sont en général de 0,3 à 64 ppm (Tableau 2.1) (British Geological Survey, 2011; Castor et Hedrick, 2006; Gupta et Krishnamurthy, 2005). Les travaux de Taylor et McLennan (1985) ont montré que les LREE sont plus abondants dans la nature que les HREE à l'exception de l'yttrium (Tableau 2.1). Tous les ETR sont trivalents avec des charges ioniques similaires à l'exception du Ce et Eu qui peuvent dans certains cas devenir tétravalent et bivalent, respectivement. Les ETR présentent généralement une faible mobilité dans les systèmes naturels (Castor et Hedrick, 2006). Les travaux de Aenburg (2020) montrent que les ETR se comportent de façon incompatible tout au long de la différentiation ignée des carbonatites. Cela augmente les concentrations des ETR dans le magma lorsque la cristallisation progresse, ce qui fait que les ETR vont se concentrer dans les derniers fluides à cristalliser. Les études de Béland et Williams (2021) ont montré que l'enrichissement en ETR du gisement d'Ashram est lié à des processus hydrothermaux tardifs.

¹ Le Sc ne sera pas discuté dans cette étude car il est enrichi dans d'autres types de gisement et est associé à des minéraux qui ne sont pas retrouvés dans les carbonatites.

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques des ETR (British Geological Survey, 2011; Castor et Hedrick, 2006; Gupta et Krishnamurthy, 2005; Taylor et McLennan, 1985).

Élément	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique	Masse volumique	Point de fusion (°C)	Abondance dans la croûte supérieure (ppm)
Yttrium	Y	39,0	88,9	4,47	1522	33,0
Lanthane	La	57,0	139	6,15	918	30,0
Cérium	Ce	58,0	140	8,16	798	64,0
Praséodyme	Pro	59,0	141	6,77	931	7,10
Néodymium	Nd	60,0	144	7,01	1021	26,0
Prométhium	Pm	61,0	145	7,26	1042	–
Samarium	Sm	62,0	150	7,52	1074	4,50
Europium	Eu	63,0	152	5,24	822	0,88
Gadolinium	Gd	64,0	157	7,90	1313	3,80
Terbium	Tb	65,0	159	8,23	1356	0,64
Dysprosium	Dy	66,0	163	8,55	1412	3,50
Holmium	Ho	67,0	165	8,79	1474	0,80
Erbium	Er	68,0	167	9,07	1529	2,30
Thulium	Tm	69,0	169	9,32	1545	0,33
Ytterbium	Yb	70,0	173	6,97	819	2,20
Lutétium	Lu	71,0	175	9,84	1663	0,32

Les ETR sont souvent associés aux fluorocarbonates et aux phosphates. Les fluorocarbonates d'ETR sont surtout représentés par la bastnaésite ($(Ce, Nd, Y, REE)(CO_3)F$), mais également par la parisite ($Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$) et la synchysite ($CaCe(CO)_2F$), tandis que les phosphates d'ETR sont surtout la monazite ($(Ce, La, Nd, Th)PO_4$) et la xénotime (YPO_4). Ces minéraux concentrent les ETR de façon différente; la bastnaésite et la monazite sont enrichis en LREE tandis que le xénotime concentre surtout les HREE (Dostal, 2017) (Figure 2.1).

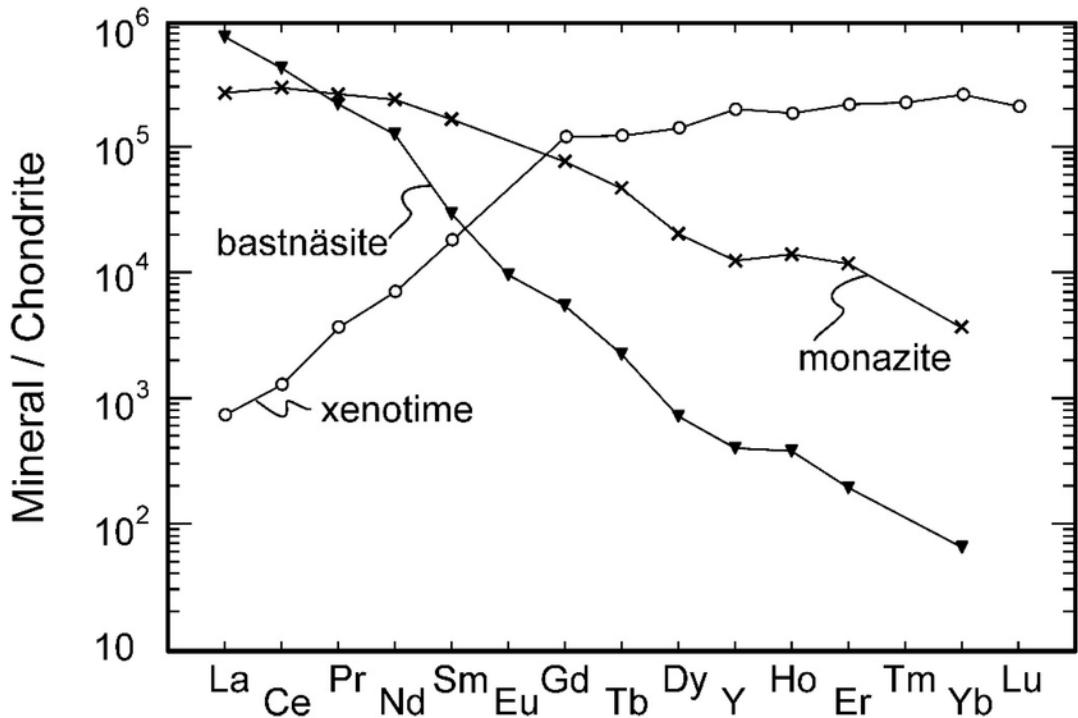


Figure 2.1 : Diagramme normalisé par chondrite des principaux minéraux porteur d'ETR (Dostal, 2017)

Bien qu'elles ne contiennent pas d'ETR dans leur formule chimique théorique, l'apatite et la fluorite de certains gisements, dont le gisement d'Ashram, peuvent être enrichies jusqu'à quelques pourcents en LREE (Khan *et al.*, 1985; Mitchell et Smith, 2017; Redina *et al.*, 2021). En plus des ETR, la monazite peut contenir des éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium.

2.2 Utilité des ETR

Les ETR sont utilisés en grande partie dans les applications industrielles et de haute technologie, notamment dans la fabrication des aimants permanents à haute résistance, dans la fabrication des batteries pour les véhicules électriques, en métallurgie, dans les céramiques, dans les systèmes d'énergie de remplacement, comme catalyseur, dans les lasers et en médecine (Figure 2.2). Les ETR sont le plus souvent utilisés dans les aimants permanents (Ressources naturelles Canada, 2022; British Geological Survey, 2011; Castor et Hedrick, 2006), mais sont également présents dans différents autres produits (Jowitt *et al.*, 2018) (Tableau 2.2). Le prix varie grandement d'un élément à un autre et les HREE sont beaucoup plus chers que les LREE (Lefebvre, 2022) (Tableau 2.3). Les ETR les plus légers sont concentrés dans les types de gisements les plus communs

(gisements magmatiques) et sont produits en plus grande quantité que les HREE qui sont concentrés dans des gisements moins communs et en moins grande quantité (Zhou et al., 2017).

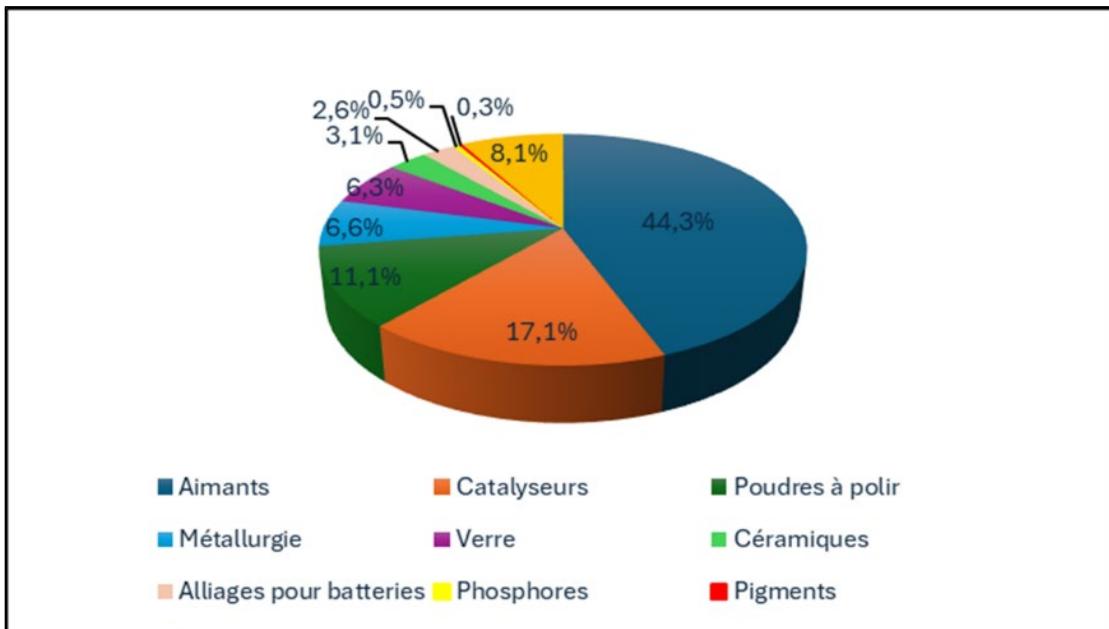


Figure 2.2 : Utilisation des terres rares en 2022 (Ressources naturelles Canada, 2022)

Tableau 2.2 : Utilisations courantes des ETR (Jowitt *et al.*, 2018)

Éléments	Utilisations courantes
La	Optique, batteries, catalyseur
Ce	Applications chimiques, coloration, catalyseur
Pr	Aimants, éclairage, optique
Nd	Aimants, éclairage, lasers, optique
Pm	Utilisation limitée en raison de la radioactivité, utilisée dans la peinture et les batteries atomiques ; très rare dans la nature
Sm	Aimants, lasers
Eu	Lasers, télévision couleur, éclairage, applications médicales
Ga	Aimants, verrerie, lasers, génération de rayons X, applications informatiques, applications médicales
Tb	Lasers, éclairage
Dy	Aimants, lasers
Ho	Lasers
Er	Lasers, fabrication de l'acier
Tm	Génération de rayons X
Yb	Lasers, applications dans l'industrie chimique
Lu	Applications médicales, applications dans l'industrie chimique
Sc	Alliages dans l'ingénierie aérospatiale, éclairage
Y	Lasers, supraconducteurs, filtres micro-ondes, éclairage

Tableau 2.3 : Prix des éléments de terres rares en 2023 en dollars américains par kilogramme (U.S. Geological Survey, 2024)

Oxydes de terres rares	Prix (USD/kg)
Oxyde de lanthane et de cérium, 99,5% minimum	1
Oxyde d'europtium 99,99% minimum	27
Oxyde de néodyme 99,5% minimum	80
Oxyde de terbium 99,99% minimum	1300
Oxyde de dysprosium 99,5% minimum	323

2.3 Production mondiale d'ETR

La première production d'ETR fut extraite des gisements associés aux pegmatites granitiques. Les États-Unis ont dominé la production des ETR entre la deuxième moitié du XIXe et la première moitié du XXe siècle (Castor et Hedrick, 2006). Le gisement de Montain Pass en Californie (États-Unis) entra en production en 1952 et fut la source principale des ETR dans le monde entre les années 1965 et 1985 (Castor et Hedrick, 2006). La Russie et l'Australie furent aussi de grands producteurs d'ETR dans les années 80 (Castor et Hedrick, 2006). Cependant, depuis 1988, la Chine reste le plus grand producteur d'ETR. La plus grande partie de cette production entre 1988 et 2003 provenait du gisement de Bayan Obo (Castor et Hedrick, 2006). En 2023, la production annuelle de la Chine était estimée à 240 000 tonnes d'oxydes de terres rares, soit 68,6% de la production mondiale. Elle est suivie par les États-Unis avec 12,3% de la production mondiale, la Birmanie (10,9%), l'Australie (5,1%), et la Thaïlande (2%) (USGS, 2025) (Figure 2.3).

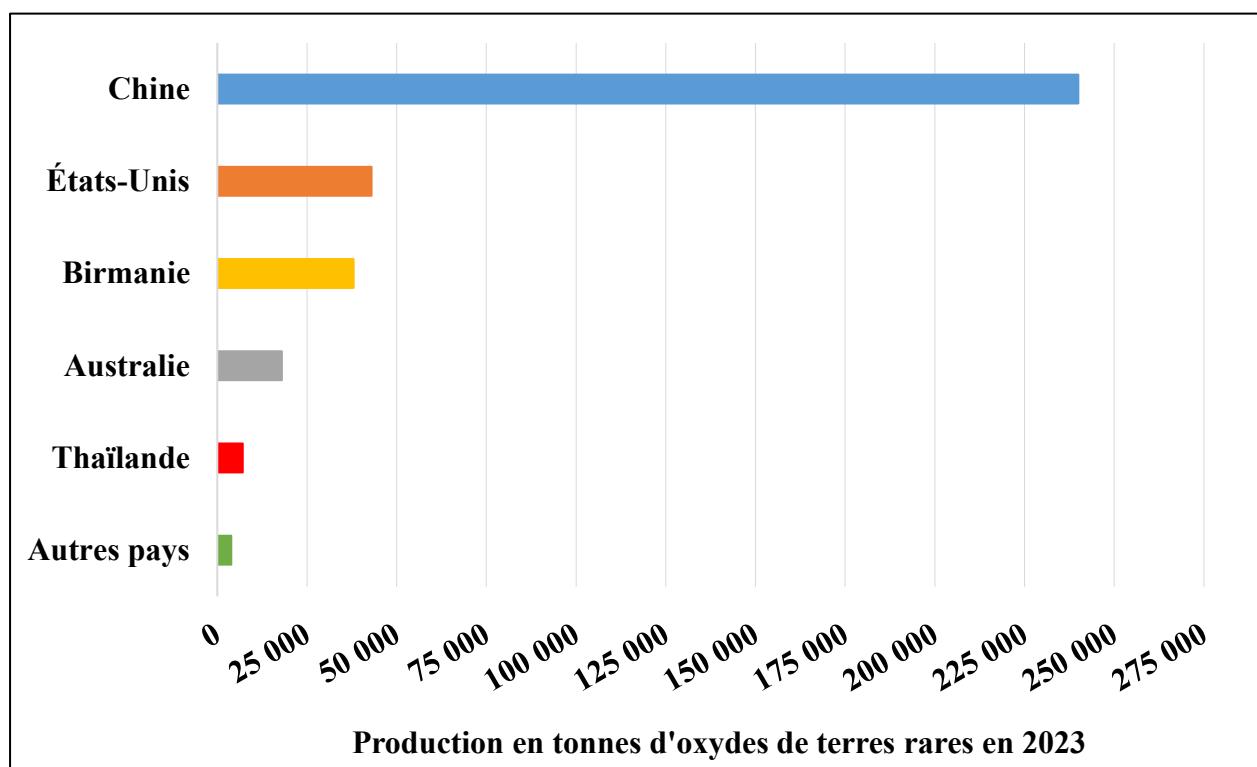


Figure 2.3 : Production mondiale d'ETR en 2023 (USGS, 2025)

2.4 Les types de gisements associés aux ETR dans le monde

Les gisements d'ETR ont des origines primaires associées aux processus ignés et hydrothermaux (carbonatites, intrusions peralcalines, et oxydes de Fe-Cu-Au-ETR) et secondaires résultant de processus sédimentaires et d'altérations (placers /paléoplacers et argiles) (Chakhmouradian et Wall, 2012; Zhou *et al.*, 2017; Van Gosen *et al.*, 2017; Balaram, 2019; Liu *et al.*, 2023). Une description de l'ensemble de ces types de gisements et des exemples se retrouvent dans le tableau A1 de l'annexe A. La figure 2.4 montre la répartition mondiale des plus importants gisements d'ETR. Comme on peut le voir sur cette figure 2.4, le gisement d'Ashram est associé aux complexes de carbonatites qui regroupent les plus grands gisements d'ETR du monde tels que Bayan Obo, Mountain Pass et le Mont Weld (Liu *et al.*, 2023). Pour cette raison, seulement ce type de gisement est discuté plus en détails ici.

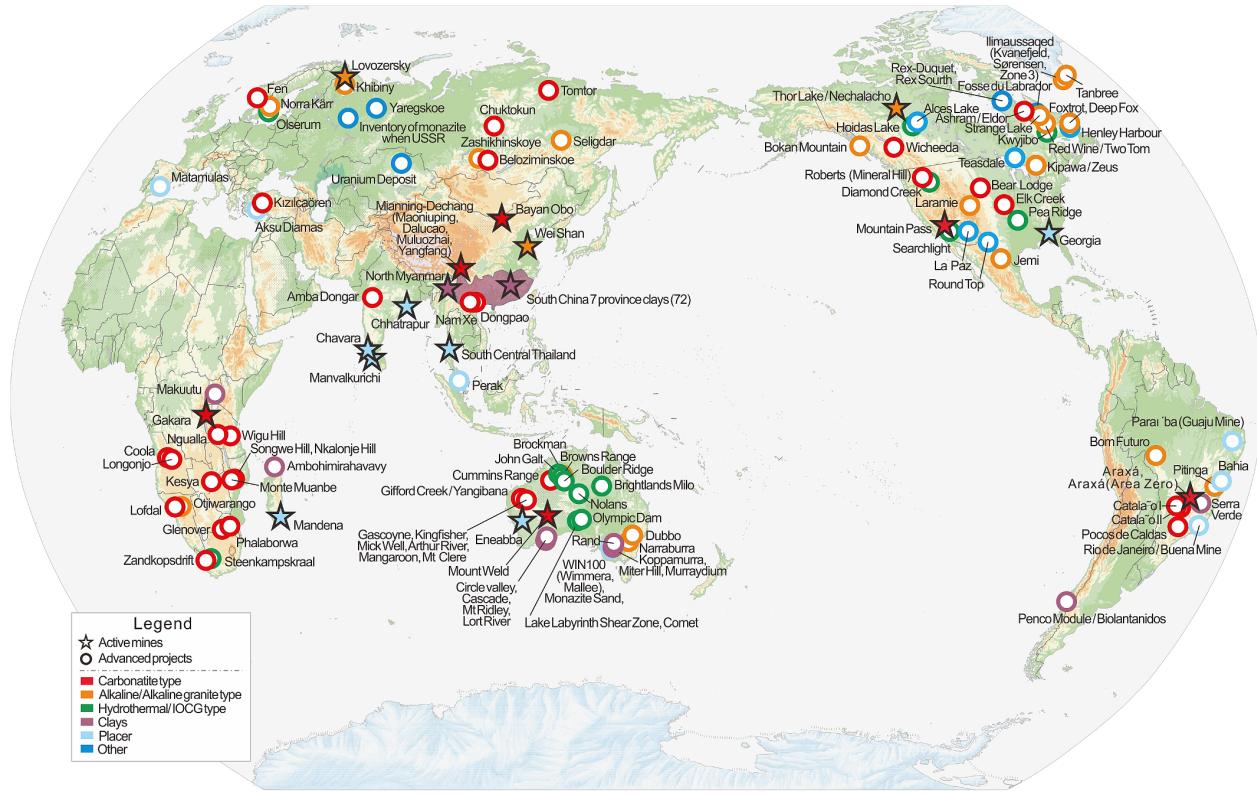


Figure 2.4 : Répartition des gisements d'ETR dans le monde (Liu *et al.*, 2023)

2.4.1 Carbonatites

Les carbonatites sont définies par le système de classification de l'IUGS comme des roches ignées constituées de plus de 50% modale de carbonate magmatique (primaire) avec moins de 20% de

SiO_2 en poids (Le Maitre, 2002). Aenburg et al. (2020) les définit comme étant des roches d'origine ignée dominées par les carbonates. Les ETR sont incompatibles à toutes les étapes de la différentiation magmatique dans les carbonatites à l'exception du Sc qui est compatible avec les minéraux ferromagnésiens (Anenborg *et al.*, 2020; Beland, 2021).

En plus d'être la plus grande source des ETR, les carbonatites peuvent être associées à des minéralisations de niobium (Nb) (Elliott *et al.*, 2018; Verplanck *et al.*, 2014). À la différence des ETR qui semblent provenir de magmas plus évolués, le niobium est souvent associé aux magmas de carbonatites en stade de différenciation intermédiaire (Elliott *et al.*, 2018).

2.4.2 Fénitisation

Les fénites sont des roches encaissantes altérées par des fluides hydrothermaux alcalins (riches en sodium et/ou en potassium) au contact d'un complexe intrusif de carbonatites (Viladkar et Pawaskar, 1989; Elliot et al., 2018; Van Gosen *et al.*, 2017). Elles constituent une auréole de roches métasomatiquement altérées et enrichies en ETR qui peut s'étendre jusqu'à 4 km des intrusions de carbonatites (Anenborg *et al.*, 2020).

Il existe divers types de fénites selon la source et la composition des fluides de fénitisation, la nature du protolith, la profondeur et la température où les processus ont lieu. La minéralogie des fénites dépend également de l'intensité du métasomatisme. Les fénites et les brèches riches en feldspaths alcalins sont souvent associées aux complexes de carbonatites riches en ETR (Elliot *et al.*, 2018; Anenborg *et al.*, 2020). Les fénites sont souvent plus riches en HREE que les carbonatites qui leur sont associées (Anenborg *et al.*, 2020; Viladkar et Pawaskar, 1989). Aucune production d'ETR ne provient actuellement des fénites (Elliott *et al.*, 2018).

2.4.3 Gisements associés aux complexes de carbonatite

En 2008, plus de 500 occurrences de carbonatites ont été répertoriées (Woolley et Kjarsgaard, 2008). Parmi celles-ci, seulement une faible proportion étaient hôtes de gisements d'ETR. Elles ont été recensées principalement dans les zones du rift Est-Africain, dans l'est du Canada, dans le nord de la Scandinavie, dans la péninsule de Kola en Russie et dans le sud du Brésil (Woolley et Kjarsgaard, 2008). Les gisements associés aux complexes de carbonatites sont la principale source mondiale d'ETR (Simandl et Paradis, 2018; Verplanck *et al.*, 2014). Ces complexes sont souvent localisés dans des régions cratoniques stables en association avec des zones de failles majeures et ils se présentent généralement sous la forme d'intrusions (dans les complexes alcalins), de dykes,

de filons-couches isolés ou de massifs irréguliers (British Geological Survey, 2011; Verplanck *et al.*, 2014; Simandl et Paradis, 2018). Ces complexes sont souvent associés à de petites intrusions polyphasées circulaires à elliptique où la minéralisation en ETR accompagne les phases tardives plus ferrifères des carbonatites comme au gisement d’Ashram (Beland et Williams-Jones, 2021b) et de Niobec (Néron *et al.*, 2018).

Le gisement de Mountain Pass en Californie (États-Unis) illustre un gisement d’ETR typique associé à une carbonatite avec un mineraï constitué de 10 à 15% de bastnaésite, de 65% de calcite et de dolomite, et de 20 à 25% de baryte (British Geological Survey, 2011; Castor et Hedrick, 2006). Au Québec, les gisements d’Ashram, de Montviel, d’Oka et de Niobec sont des exemples de gisements d’ETR associés à des carbonatites (Sappin et Beaudoin, 2015). La plupart des gisements associés aux carbonatites sont fortement enrichis en terres rares légères et présentent un rapport LREE/HREE élevé. Les principaux minéraux d’ETR généralement associés aux carbonatites sont les phosphates (monazite et apatite), les fluorocarbonates (bastnaésite, parasite et synchysite) et les carbonates hydratés (ancylite). Plusieurs autres métaux/minéraux peuvent être enrichis dans les gisements d’ETR tels que Ba (baryte), F (fluorite), P (apatite), Nb (pyrochlore) et uranium-thorium (surtout monazite) (Van Gosen *et al.*, 2017). La calcite, la dolomite et l’ankérite représentent la majorité des minéraux de gangue (Edahbi *et al.*, 2018; Gupta et Krishnamurthy, 2005; Verplanck *et al.*, 2014; Richardson et Birkett, 1996). Les gisements liés aux carbonatites ont un faible potentiel de génération d’acide du fait de la dominance des minéraux carbonatés, de la faible quantité de sulfures et parfois de l’abondance de baryte (Verplanck *et al.*, 2014). Le tableau 2.5 montre une comparaison entre le gisement d’Ashram et quelques grands gisements d’ETR. Le gisement d’Ashram présente plusieurs similitudes avec les gisements d’ETR de St-Honoré au Québec (Canada) et de Mountain Pass en Californie (États-Unis) (Gagnon *et al.*, 2015).

Tableau 2.4 : Producteurs mondiaux d'ETR et le gisement d'Ashram (Commerce Resources Corp., 2023)

Deposit / Mine	State of Activity	Region	Deposit Type	Primary Rare Earth Mineralogy	Deposit Grade ⁵ (REO)	Mineral Concentrate Grade ⁵ & Recovery ⁶	Comments
Bayan Obo ¹	Production		Carbonatite ⁴	Monazite, Bastnaesite	1-6%	Two concentrates 55-65% REO & 36% REO @ 60% combined recovery	Dominates global production, primary iron mine with REO by-product
Mount Weld ² 	Production		Carbonatite (laterite)	Monazite (secondary)	7-11%	40% REO @ 70% recovery	Significant technical challenges
Mountain Pass 	Production		Carbonatite	Bastnaesite	6-9%	60 to 65% at high recovery	Once primary REO producer globally
Sichuan ³	Production		Carbonatite	Bastnaesite	2-3%	60-70% REO @ >80% recovery	Second largest producing region globally
Weishan	Production		Carbonatite	Bastnaesite	1-3%	Two concentrates 60% REO & 35% REO @ 80% combined recovery	Head grade is falling, lower quality material, inconsistent producer
Ashram	Development		Carbonatite	Monazite, Bastnaesite	2%	40-50% @ >75% recovery	Unique enrichment in Pr, Nd, Dy, Tb
Karnasurt, (Lovozero)	Production (minor)		Granitoid	Loparite	0.9%	30% REO @ 70% recovery	Unique to Russia, REE by-product of Nb-Ta-Ti
Placer	Production (minor)		Placer (heavy sands)	Monazite, Xenotime	<0.2%	50-60% REO @ >80% recovery	Source of HREO, REO co-product with Ti-Zr...
Clay	Production		Clay	n/a (ion-absorbed)	0.05-0.2%	n/a	Primary source of HREO

2.4.4 Présentation du gisement d'Ashram

Le gisement d'Ashram est localisé dans le NE du Québec à environ 130 km au sud de la communauté de Kuujjuaq au Nunavik (Figure 2.5A). Il se situe à l'intérieur du complexe de carbonatite d'Eldor dans la Fosse du Labrador. Ce complexe est issu de l'orogenèse Paléoprotérozoïque du Nouveau Québec et se trouve entre deux zones lithotectoniques séparées par une faille de chevauchement majeure (Figure 2.5B) (Birkett et Clark, 1991; Clarke et Wares, 2006).

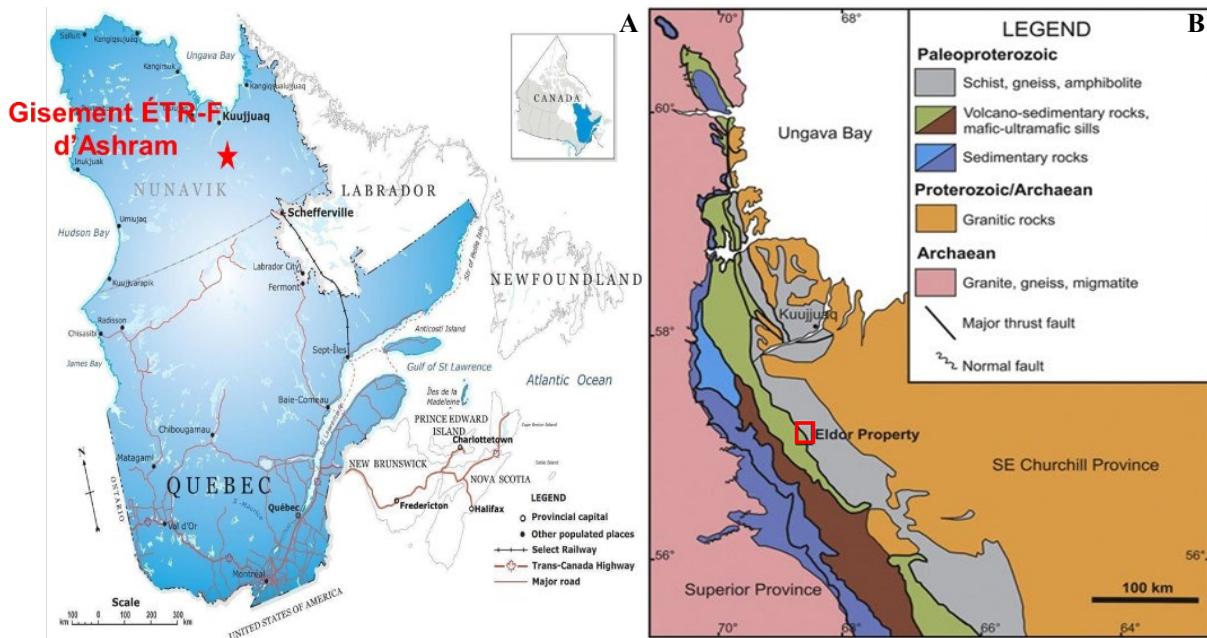


Figure 2.5 : (A) Localisation du gisement d’Ashram (Commerce Resources Corp., 2023); (B) Cadre géologique du complexe de carbonatite d’Eldor (Clark et Wares, 2006).

L’exploration dans le secteur du complexe d’Eldor a commencé dans les années 50 et plusieurs levés régionaux et travaux de terrain ont été réalisés dans cette zone, menant à la découverte du gisement d’Ashram en 1983 par Eldor Resources Limited (Gagnon *et al.*, 2015). Ces travaux sont résumés dans le tableau A2 de l’annexe A. La carbonatite d’Eldor se présente sous une forme elliptique avec une longueur de 7,3 km et une largeur de 3 km. Du point de vue géologique, le complexe d’Eldor est composé de plusieurs faciès bréchiques et ultramafiques (Figure 2.6).

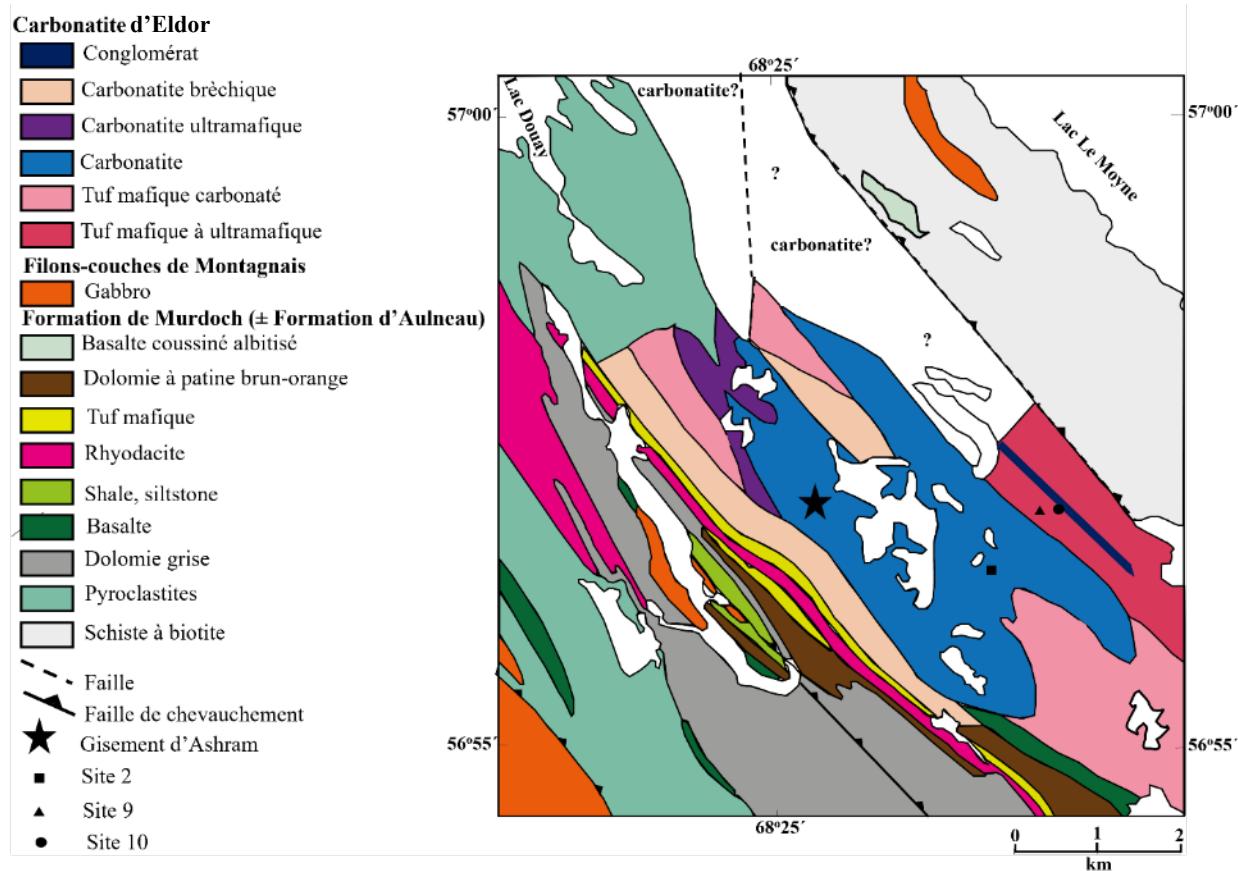


Figure 2.6 : Emplacement des gisements de minéraux dans la base de données SIGEOM et autres sites minéralisés dans la carbonatite d'Eldor. Site 2 : 7,00 % Nb, 0,24 % La + Ce, 0,21 % Th, 0,02 % Y; site 9 : 3,52 % La + Ce, 0,01 % Nb; site 10 : 1,13 % La + Ce, 0,02 % Nb (Clark et Wares, 2006).

Les travaux d'exploration antérieurs ont montré que la minéralisation du gisement d'Ashram se présente sous la forme d'une lentille et s'étend sur environ 700 m de longueur sur 500 m de largeur, à des profondeurs d'environ 600 m d'après les résultats des sondages de 2010 et 2011 (Gagnon *et al.*, 2015). Avec un seuil de coupure exprimé en un rendement net des métaux (RMN) de 287 \$/t, le gisement d'Ashram renferme 131,1 Mt à 1,91% TREO et 4% CaF₂ en ressources minérales présumées et 73,2 Mt à 1,89% TREO et 6,6% CaF₂ en ressources minérales indiquées (Cassoff *et al.*, 2024). La figure 2.7 montre la modélisation de l'enveloppe de la fosse mettant en évidence

l'échelle du gisement et les forages effectués après 2012 (Cassoff *et al.*, 2024).

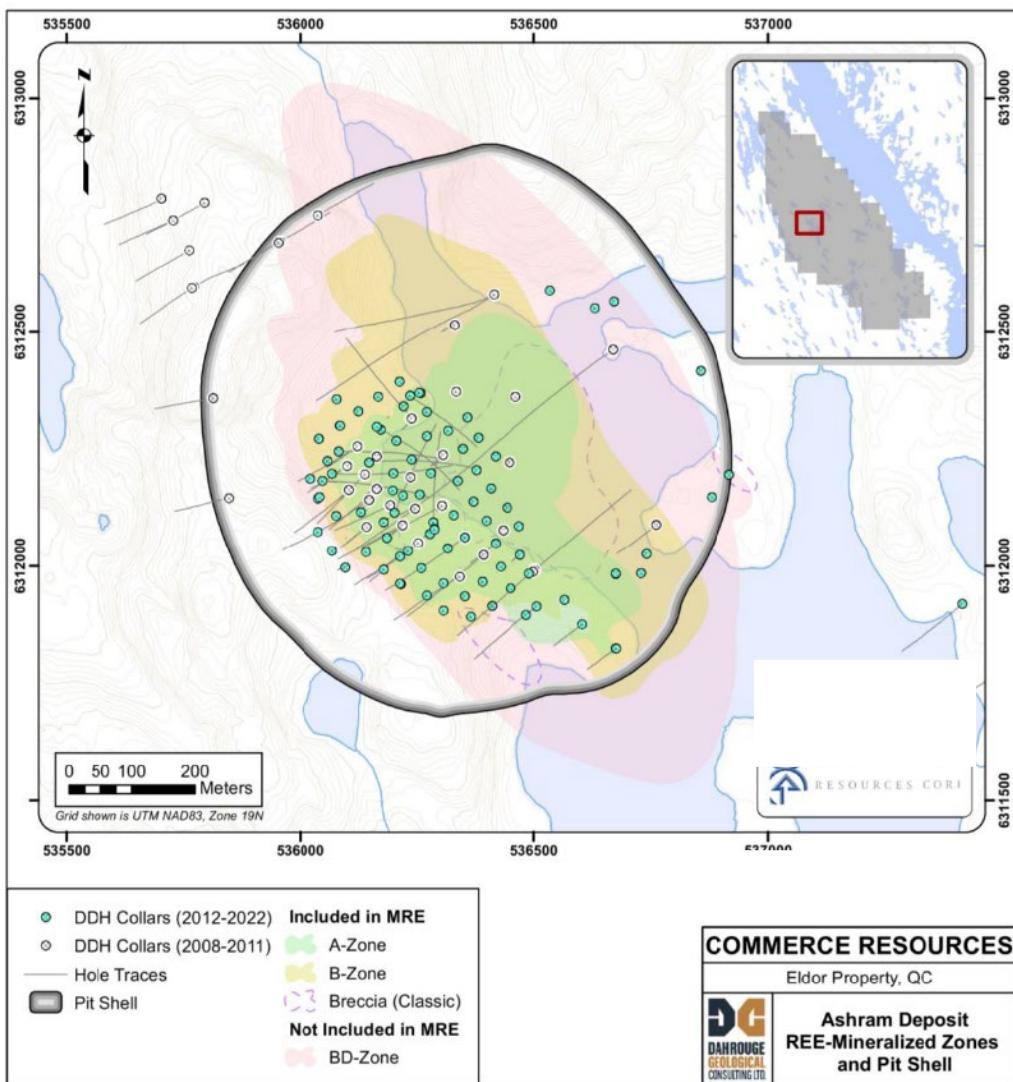


Figure 2.7 : L'enveloppe modélisée de la fosse du gisement d'Ashram mettant en évidence les forages effectués après 2012 (Cassoff *et al.*, 2024). Les unités géologiques qui forment en partie les stériles (fénites, brèches et lamprophyres) ne sont pas représentées sur la carte vu leurs distributions hétérogènes et/ou leurs épaisseurs métriques.

Le gisement est structuré en quatre zones minéralisées en ETR (zone A, zone B, brèche classique et zone BD), toutes retrouvées à l'intérieur de la carbonatite d'Eldor (Cassoff *et al.*, 2024) (Figure 2.8). Le tableau 2.5 résume la composition des différentes zones du gisement d'Ashram. Selon Cassoff et al., 2024, la zone A est l'unité principale du gisement d'Ashram et la plus minéralisée, allant de 1,5 à plus de 3% TREO et présente diverses textures de folié à colloforme.

L'unité est à grains fins avec des clastes de sidérite magnésienne, de fluorite et de monazite dans une matrice de ferrodolomite. La monazite et la bastnaésite constituent les principaux minéraux porteurs d'ETR (Beland et Williams-Jones, 2021a; Mitchell et Smith, 2017). Du point de vue géochimique, la zone varie entre une magnésiocarbonatite et une ferrocarbonatite. La zone B du gisement d'Ashram englobe la zone A et est composée principalement de ferrodolomite cataclastiques à grain plus grossier que celles de la zone A, avec moins de clastes de fluorite-monazite (Beland et Williams-Jones, 2021b; Mitchell et Smith, 2017) (Figures 2.7 et 2.8). On y trouve aussi des clastes quartz-phlogopite, ainsi que des veines de rutile riche en niobium, ferrocolumbite, xénotime et bafertisite. La fluorite est peu fréquente mais localement abondante, tandis que les sulfures sont rares. La zone B est moins déformée et plus homogène que la zone A avec une teneur en ETR généralement comprise entre 1% et 2% TREO. Elle est géochimiquement classée comme une magnésiocarbonatite. La transition vers la zone BD se manifeste par une diminution de la minéralisation et se matérialise par une couleur jaune-beige et l'apparition de minéraux d'ETR fluorocarbonatés rose orangé, donnant un ton rosâtre à la zone BD. La zone BD présente une texture semblable à la zone B. Elle contient une dolomite cristalline, avec des fluorocarbonates (parasite, bastnaésite) fréquents et de faibles quantités de phlogopite, quartz, calcite et microcline (Beland et Williams-Jones, 2021b; Mitchell et Smith, 2017). La fluorite et la monazite sont rares ou absentes. La teneur en ETR est plus faible que celle des zones A et B (entre 0,6 et un peu plus de 1% TREO), mais avec un enrichissement relatif en néodyme et praséodyme ainsi qu'en terres rares moyennes et lourdes. Géochimiquement, elle est aussi classée comme une magnésiocarbonatite. La brèche classique présente des clastes polymictes anguleux à arrondis avec des tailles centimétriques dans une matrice aphanitique à très fine légèrement enrichie en ETR (environ 1% TREO) (Cassoff *et al.*, 2024). Cette brèche recoupe la zone A, la zone B et la zone BD en profondeur (Figure 2.8) et n'a été observée qu'à l'intérieur du gisement. Géochimiquement, cette unité se distingue des autres types de roches par la présence de clastes de calcite et de dolomite et de carbonatite contenant du pyrochlore. La brèche montre des contacts généralement irréguliers avec les autres unités. Très peu de sulfures sont notés dans les zones minéralisées et ceux-ci sont majoritairement la sphalérite, la pyrite et la galène (Mitchell et Smith, 2017).

Tableau 2.5 : Composition des différentes zones du gisement d'Ashram (Cassoff *et al.*, 2024)

	Zone A	Zone B	Zone BD	Brèche classique
Clastes	Sidérite magnésienne	Quartz-phlogopite	Dolomite	Dolomite
	Fluorite-Monazite	Fluorite -Monazite	Quartz-Phlogopite	Calcite
				Carbonatite
Texture	Grains fins	Grains grossiers	Grains grossiers	---
Matrice	Ferrodolomite	Ferrodolomite	--	Aphanitique enrichie en ETR
Minéraux d'ETR	Monazite	Monazite	Parisite	Monazite
	Bastnaésite	Bastnaésite	Bastnaésite	---
	---	Xénotime	---	---
% en TREO	1,5 à 3%	1 à 2%	0,6 à 1%	1%
Classification géochimique	Magnésiocarbonatite Ferrocarbonatite	Magnésiocarbonatite	Magnésiocarbonatite	---

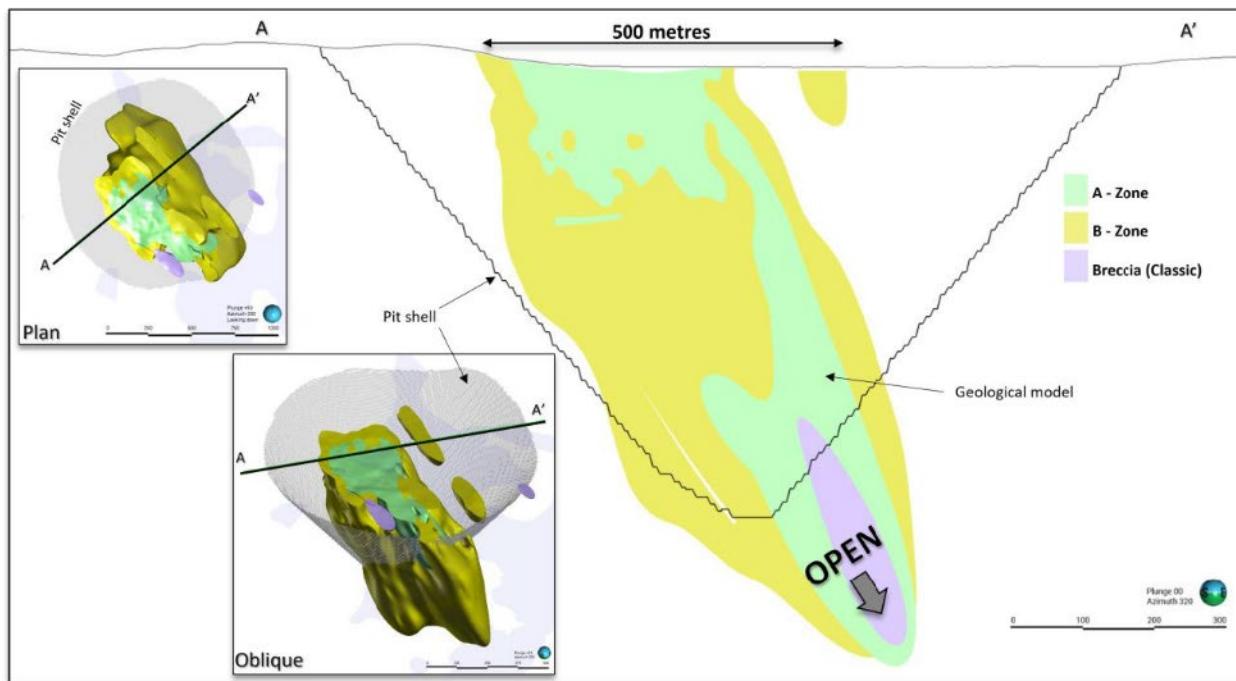


Figure 2.8 : Coupe transversale du modèle géologique du gisement d'Ashram avec les différentes zones (Cassoff *et al.*, 2024). La zone BD ne figure pas sur la section car elle n'est pas incluse dans le calcul des ressources.

Les principaux minéraux associés à la minéralisation sont surtout la monazite-(Ce), la monazite-(Nd) avec des quantités moindres de bastnaésite-(Ce) et de bastnaésite-(Nd) (Gagnon et al., 2015; Mitchell et Smith, 2017; Beland et Williams-Jones, 2021b). Les minéraux d'ETR sont très fins avec une moyenne de 15 à 20 μm . Les ETR et le fluor (10 à 30% de F via la fluorite) constituent les principaux produits d'intérêt pour le gisement d'Ashram. Cependant, d'autres produits comme le niobium (Nb), le tantale (Ta), et le phosphate sont concentrés dans certains secteurs de la carbonatite (Gagnon et al., 2015). Les travaux faites par Beland et Williams-Jones (2021a,b) sur le gisement d'Ashram montrent que les ETR sont mobilisés par les fluides hydrothermaux tardifs pour être concentrés dans les minéraux. Leurs études indiquent que toutes les zones minéralisées en ETR montrent un fractionnement important des ETR légers versus les ETR lourds ce qui est typique des gisements d'ETR associés à des carbonatites (Wang *et al.*, 2020).

L'exploitation des gisements peut se faire à ciel ouvert ou souterraine. Pour les gisements de minerai à faible teneur et fort tonnage (comme Ashram), l'exploitation à ciel ouvert est plus appropriée. Cependant, ce type d'exploitation génère beaucoup plus de stériles que l'exploitation souterraine et pour le gisement d'Ashram, une exploitation par fosse à ciel ouvert est prévue avec un ratio de décapage de 2,7 :1 (Cassoff *et al.*, 2024). Les stériles constituent la partie rocheuse extraite du gisement pour atteindre le minerai mais qui ne contiennent pas de valeurs économiques exploitables. En d'autres termes, c'est la partie en-dessous de la teneur de coupure² extraite du gisement. Les stériles sont déposés dans des haldes à stérile et cette étude porte sur les futurs stériles du gisement d'Ashram.

Les lithologies présentes dans les stériles du gisement d'Ashram sont des carbonatites à dolomite, calcite et ankérite, des fénites, des lamprophyres et des brèches, tous sous la teneur de coupure. Ces stériles se retrouvent en majorité dans les parties NE et SW du gisement (Figures 2.7 et 2.8) et leurs caractéristiques géologiques seront traitées plus loin à la section 3.1.

² La teneur de coupure est la teneur minimale d'un minerai, en dessous de laquelle l'extraction et le traitement ne sont pas rentables.

2.4.5 Impacts environnementaux liés à l'exploitation des gisements de carbonatites d'ETR

La gestion des rejets issus de l'exploitation et du traitement des ETR constitue un défi environnemental majeur. La faible quantité de sulfures et la quantité importante de carbonates dans ce type de gisement font que le drainage minier acide n'est pas développé. Cependant le drainage neutre contaminé (DNC) demeure une possibilité. Le comportement géochimique du thorium et de l'uranium dans les rejets miniers des gisements d'ETR, deux éléments radioactifs, représente un des plus grands défis (Van Gosen et al., 2017). Le thorium, généralement insoluble, pose souvent des risques par dispersion solide (poussière ou l'érosion des résidus). À l'inverse, l'uranium, soluble en conditions oxydantes, est susceptible de contaminer les eaux de surface et souterraines. Ces différences exigent des stratégies de gestion spécifiques lors de la planification des activités minières (Van Gosen et al., 2017). Certains minerais d'ETR comme le xénotime et la monazite sont souvent enrichis en éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium. La monazite peut contenir jusqu'à 20 % en poids de ThO₂ et jusqu'à 14% en poids d'UO₂ (Jordens et al., 2013). Les effets des ETR sur la santé humaine ont été peu étudié (Van Gosen et al., 2017).

2.5 Notions de DNC

Outre le drainage minier acide, l'industrie minière fait face également à un autre problème environnemental qui est le drainage neutre contaminé (DNC). Il est dû à la présence de certains métaux dans les rejets miniers qui passent en solution à la suite de l'interaction de l'eau avec des conditions de pH proche de la neutralité et des teneurs en contaminants dépassant les normes réglementaires. La prédiction de ce phénomène est complexe avec les outils de prédiction pour le drainage minier acide (DMA) (Marmier et al., 2025). Quelques techniques de prédiction du DNC, tels que des essais de lixiviation cinétique modifiés par ajout d'EDTA (acide éthylène diamine tétra acétique) comme chélateur ainsi que des expériences de sorption pour évaluer la capacité de sorption maximale des métaux ont été étudiées par Marmier et al. (2025) ainsi que Lévesque (2017) et Plante et al. (2015).

Selon Pepin (2009), le comportement environnemental des haldes à stérile peut être influencé par des phénomènes difficiles à reproduire dans les essais cinétiques en laboratoire. Du point de vue de la granulométrie, le matériau utilisé au laboratoire est souvent plus fin que les stériles sur le terrain. Cependant, les essais cinétiques en colonne de laboratoire offrent des conditions

hydrogéologiques plus proches de la réalité du terrain par rapport aux autres essais (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021(chapitre 2); MEND, 1991; Villeneuve, 2004).

2.5.1 Formation et prédition du DNC

Le DNC, bien que peu étudié, est fréquent dans plusieurs stériles de mines canadiennes tel que le cas de la mine Lac Tio (Plante *et al.*, 2014). Le DNC peut avoir plusieurs origines, comme le traitement incomplet d'eaux contaminées, l'ennoiement de rejets sulfureux, l'oxydation des sulfures non générateurs d'acides et l'oxydation de sulfures générateurs d'acides en présence de suffisamment de minéraux neutralisants pour tamponner le pH (Nicholson, 2004; Villeneuve, 2004).

Les éléments comme l'arsenic, le cuivre, le fer, le nickel, le plomb et le zinc sont solubles à pH proche de la neutralité (Nicholson, 2004; Roy, 2019). Ces éléments, lorsqu'ils sont présents dans les résidus, peuvent être une source de DNC lorsque leurs concentrations dans l'eau dépassent les limites de la directive 019 (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2025). Les éléments comme le fluor sont parfois présents en quantité importante dans certains gisements de carbonatites et peuvent être préoccupants par endroits pour l'environnement (Verplanck *et al.*, 2010). Une forte consommation de fluor peut entraîner des conséquences néfastes sur la santé humaine (Ozsvath, 2009).

Selon Villeneuve (2004), il est plus facile de prévenir la génération du DMA que le DNC, car il existe peu d'études sur des essais spécifique pour la prédition du DNC. Des études récentes sur la prédition du DNC ont néanmoins été réalisées par Marmier *et al.* (2025). Ils ont utilisé des stériles connus comme générateurs de DNC (mine de Lac Tio avec le Ni comme principal contaminant) pour tester leur technique. Leur méthodologie consiste à comparer le potentiel maximal de génération de contaminants en utilisant la teneur totale en métaux des stériles et la capacité de sorption du matériau (Marmier *et al.*, 2025).

2.6 Essais cinétiques de laboratoire

Contrairement aux tests statiques qui permettent de mettre en évidence les capacités de génération et de neutralisation d'acide des résidus ou stériles miniers, les essais cinétiques permettent de mesurer la réactivité des matériaux (la vitesse de génération d'acide et de contaminants, la vitesse de neutralisation) (Bussière et Guittonny, 2021; Vriens *et al.*, 2020). Ils sont coûteux et durent

longtemps (des mois) (Bouzahzah *et al.*, 2014). Il existe plusieurs types d'essais cinétiques de laboratoire.

2.6.1 Cellules humides

L'essai cinétique de cellule humide peut être réalisé en suivant la norme de l'American Society for Testing and Materials (MEND, 1991; ASTM D5744, ASTM 2013; Bussière et Guittonny, 2021). C'est un des essais cinétiques les plus utilisés dans l'industrie minière (Bouzahzah *et al.*, 2014). Compte tenu de la nature du rejet minier, les dimensions de la cellule changent (Figure 2.9) (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021; Villeneuve, 2004). Dans le cas des stériles, le matériau est concassé ou tamisé à moins de 6,3 mm, alors que les rejets de concentrateur sont utilisés tel quels (Bussière et Guittonny, 2021).

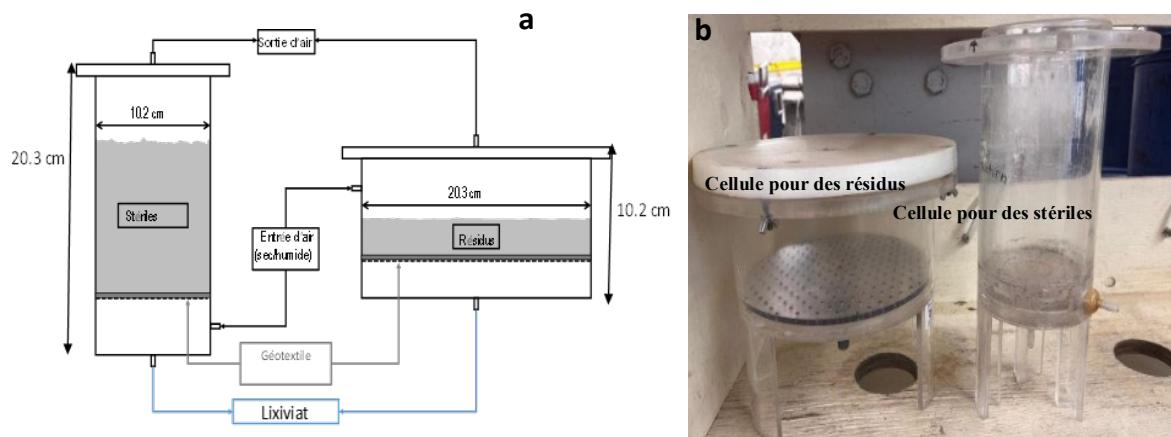


Figure 2.9 : (a) Schéma de cellules humides (Bussière et Guittonny, 2021). (b) Photographies de cellules humides pour des résidus (à gauche) et pour des stériles (à droite).

➤ Principe de l'essai

Le principe consiste à mettre 1 kg de rejet minier dans une cellule en plexiglas. Le matériau est ensuite rincé une fois par semaine avec 500 ml ou 1 L d'eau désionisée. Après l'introduction de l'eau, cette dernière reste en contact avec le matériau pendant 3 à 4 h avant d'être récupérée pour des analyses au laboratoire (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021; MEND, 1991; Villeneuve, 2004). La cellule est ensuite parcourue d'air sec pendant trois jours suivis d'air humide pendant trois autres jours. Au septième jour, le matériau dans la cellule est rincé à nouveau. Le cycle est ainsi répété pendant 20 à 40 semaines (Bouzahzah *et al.*, 2014). Lorsque les résultats des analyses montrent une certaine stabilité (c'est-à-dire lorsque les teneurs des métaux présentes dans

les lixiviats varient presque plus après 5 rinçages successifs), l'essai est arrêté (Bussière et Guittonny, 2021).

2.6.2 Mini-cellules d'altération

L'essai en mini-cellule d'altération est une version à petite échelle de l'essai en cellule humide (MEND, 1991; Villeneuve, 2004; Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021, chapitre 2). Cet essai accélère l'altération des matériaux et est fait sur une petite quantité de matériau (Villeneuve, 2004).

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à mettre environ 67 g de matériau au passant du tamis 2 mm dans un entonnoir de type Buchner d'un diamètre de 9 cm (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021; MEND, 1991; Villeneuve, 2004) (Figure 2.10). Ce dernier est équipé d'un filtre en fibre de verre de 0,45 μm . Le cycle de l'essai est d'une semaine et renferme deux rinçages. Le matériau est rincé avec 50 ml d'eau désionisée. L'eau de rinçage est laissée dans le matériau pendant une durée de 3 h avant d'être récupérée. Après cette étape, le matériau est laissé à l'air libre pendant deux jours. Un autre rinçage est ensuite effectué au troisième jour puis le matériau est laissé à nouveau à l'air libre pendant trois jours avant d'être rincé à nouveau (Bouzahzah *et al.*, 2010; Bussière et Guittonny, 2021; MEND, 1991; Villeneuve, 2004). L'essai est arrêté lorsque les derniers cycles de rinçages présentent des résultats stabilisés.

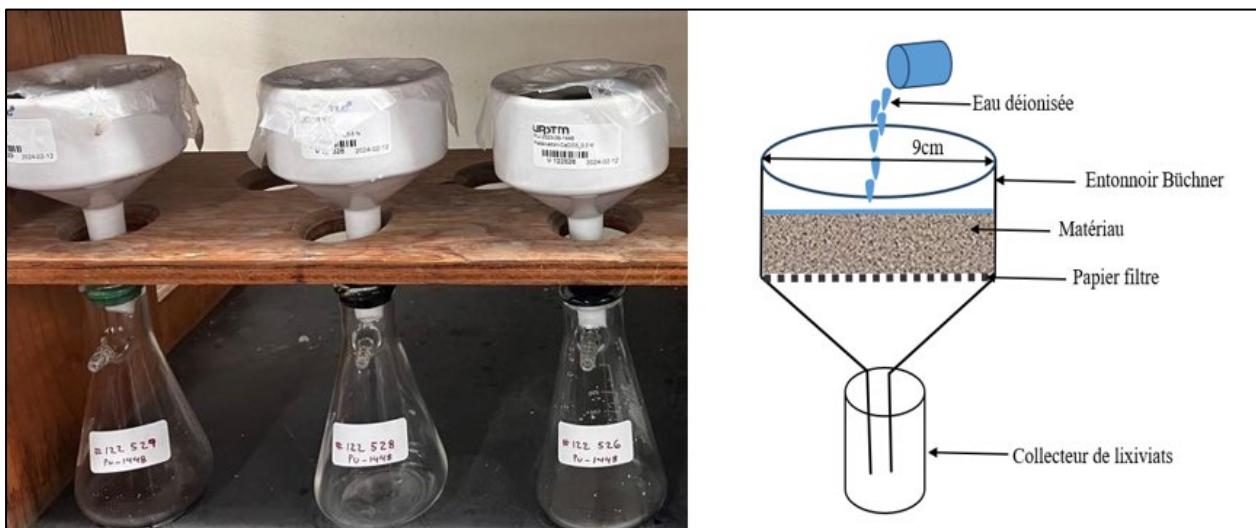


Figure 2.10 : Photographie et schéma de mini-cellule

2.6.3 Essais en colonnes

La conception et les procédures de l'essai cinétique en colonne de laboratoire ne sont pas normalisés en pratique et sont souvent adaptés selon les objectifs visés (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021). Cet essai est utilisé en environnement minier pour étudier des scénarios de restauration, mais également pour l'étude de potentiel de génération de DNC et de DMA des rejets miniers. Il nécessite une quantité de matériau variant de quelques kilogrammes à plus de 100 kg. Le diamètre des particules peut atteindre 2,3 à 5,0 cm avec un cycle qui dure généralement deux ou quatre semaines selon les objectifs du projet. Le diamètre des colonnes à utiliser dépend de la taille des particules. Pour les rejets de concentrateur, des colonnes de 14 cm de diamètre et de hauteur comprises entre 50 et 150 cm (en fonction des objectifs du projet) sont utilisées. Pour les stériles, des colonnes de 14 ou 30 cm de diamètre avec des hauteurs de 0,7 à 100 cm sont utilisées selon le matériau disponible et les objectifs du projet (Figure 2.11). En plus des analyses des paramètres géochimiques des lixiviat, les essais en colonne permettent de réaliser des essais de consommation d'oxygène. (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021; Villeneuve, 2004). L'essai peut durer plusieurs mois voire plus d'une année (Bouzahzah *et al.*, 2014; MEND, 1991). Cependant, il peut être arrêté lorsque les derniers résultats de rinçages se stabilisent.

➤ Principe de l'essai

Le matériau est rincé en général avec environ 2 L d'eau désionisée. Le matériau est imbibe de cette eau pendant 4 h avant d'ouvrir la valve pour récupérer le lixiviat. Des analyses sont ensuite effectuées sur les lixiviat. Le prochain rinçage se fait deux semaines à compter du jour de collecte des lixiviat pour un cycle de deux semaines.



Figure 2.11 : Photographie de colonnes d'essai

L'ensemble de ces essais présentent des avantages et des inconvénients qui sont relatés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Avantages et inconvénients des essais cinétiques en colonnes de laboratoire (Bouzahzah *et al.*, 2014; Bussière et Guittonny, 2021; MEND, 1991; Villeneuve, 2004)

Essais cinétiques	Avantages	Limites
Cellules humides	Pas très compliqué à réaliser	Nécessite plusieurs interventions d'un opérateur
	L'essai est normé	L'interprétation des résultats est complexe
	L'essai permet une évaluation de quelques modes de restaurations environnementales	L'essai nécessite beaucoup de temps
	Permet la modélisation de cycles humides et secs	La réalisation de l'essai demande des coûts élevés
	Permet une évaluation de la qualité des eaux	Ne favorise pas la précipitation des minéraux secondaires
	Permet de conclure sur le DMA entre 20 à 40 semaines	Difficile à statuer pour les matériaux faiblement réactifs
	Il peut donner des renseignements sur l'effet des bactéries	
Mini cellules d'altération	Résultats comparables à celle des cellules humides	La quantité d'eau de rinçage est très petite pour la représentativité des volumes pour les analyses chimiques à faire
	Peuvent être utilisé quand on n'a pas assez de matériau pour faire l'essai en cellule humide,	Il n'y a pas d'étude très poussée sur cet essai
	Plus rapide que les essais en cellule humide et en colonne	
	La réalisation de l'essai est simple	
Colonnes	Permet de suivre plusieurs paramètres	L'essai n'est pas normé
	Permet une estimation du flux et la consommation d'oxygène	Prend beaucoup de temps (des mois voire des années)
	Conditions réalistes par rapport au terrain	Nécessite un grand volume de matériau
	Condition hydrogéologique plus représentative	
	Pertinent pour les stériles	

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE

Des caractérisations physiques (granulométrie par tamisage et laser, et masse volumique), chimiques (spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES), spectrométrie de masse (ICP-MS), fluorescence X (XRF), analyse du soufre et du carbone (S/C) dans un four à induction), minéralogiques (microscopie optique, diffraction des rayons X (DRX), microscopie électronique à balayage (MEB) et analyse minéralogique automatisée (MLA)) et des essais cinétiques en colonne ont été réalisés sur les quatre principales lithologies des futurs stériles qui seront issus de l'exploitation à ciel ouvert du gisement d'Ashram, afin d'évaluer les considérations géoenvironnementales associées à ces stériles (Figure 3.1)

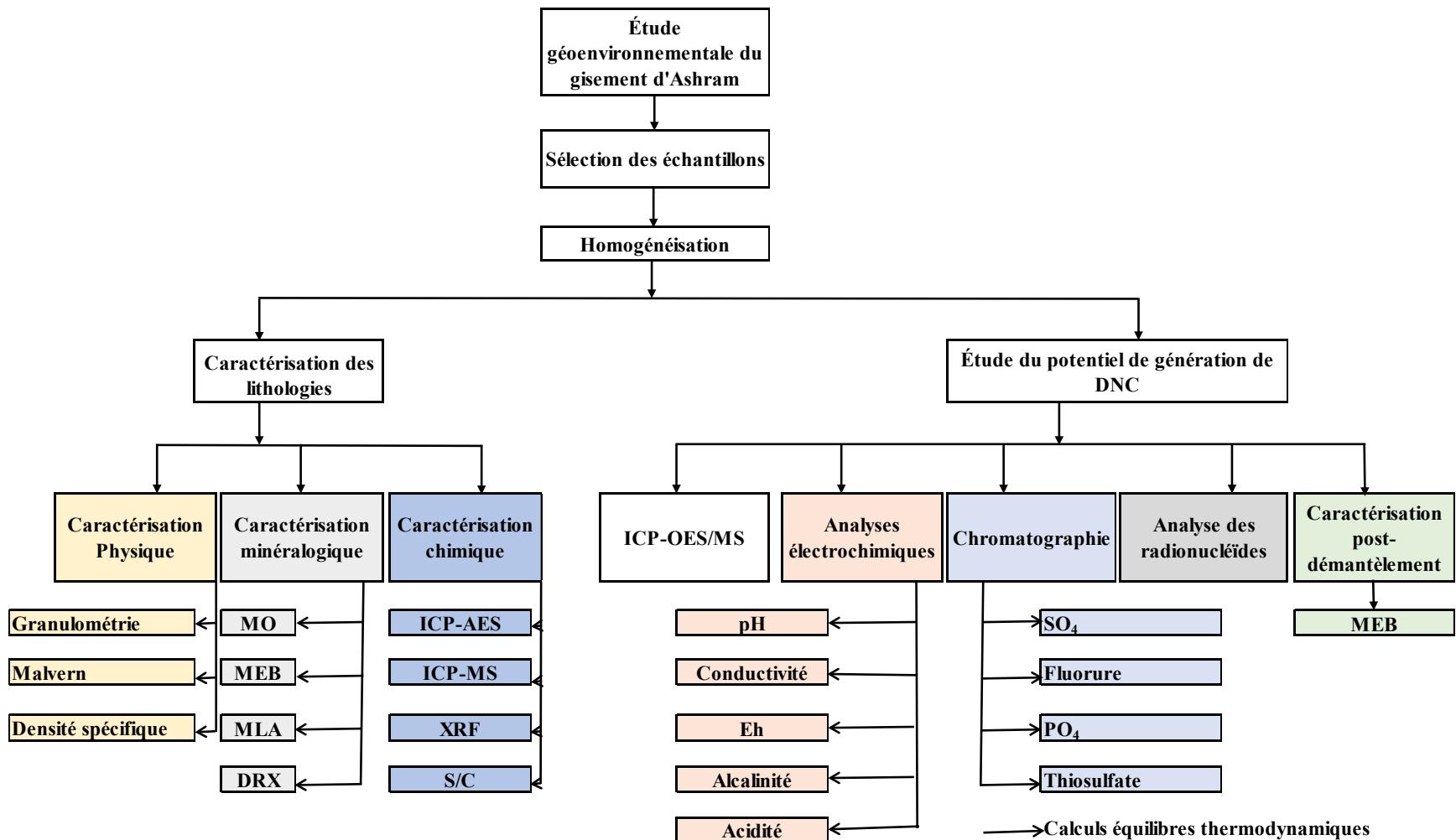


Figure 3.1 : Méthodologie détaillée du projet. Voir le texte pour plus de détails.

3.1 Sélection des échantillons

La société Mont Royal Resources Ltd. a mis à notre disposition des échantillons représentatifs de granulométrie passant au tamis 2 mm des quatre lithologies représentant les futures roches stériles (RS) de la fosse planifiée du gisement d'Ashram (carbonatites RS, fénites RS, brèches RS et lamprophyres RS) ainsi que sa base de données géochimiques. Parmi les échantillons, 842 kg étaient des carbonatites RS, 75 kg des fénites RS, 48 kg des brèches RS et 25 kg des lamprophyres RS. La carbonatite des stériles étudiés (carbonatite RS) provient de la partie à faible teneur de la zone BD et se caractérise par de faibles concentrations en ETR, une forte teneur en carbonates et une faible teneur en sulfures. Les fénites stériles d'Ashram (fénite WR) sont riches en biotite et spatialement associés à la zone BD. Ils sont faiblement minéralisés, mais contiennent quelques minéraux de terres rares comme la parisite et la monazite. La brèche de stérile étudiée (brèche WR) provient d'un mélange d'échantillons de la brèche classique de faible teneur et d'une autre brèche non minéralisée. Cet échantillon est caractérisé par une forte densité de clastes de carbonates et de fénites, et présente la concentration en monazite et en ETR la plus élevée parmi les stériles étudiés. Le lamprophyre observé à Ashram et utilisé dans cette étude (lamprophyre RS) est une roche intrusive mafique non minéralisée qui se présente sous forme de dykes minces. Il se caractérise par une teneur en biotite plus élevée que les autres lithologies et est plus riche en sulfures. Son volume est relativement très petit comparé aux autres types de roches stériles. Le besoin de chaque matériau a été calculé pour cette étude et celle de Zarouk (2025) (Tableau 3.1). Une sélection des échantillons a été effectuée afin d'optimiser leur représentativité. Pour se faire, les moyennes, les 2^e et 3^e quartiles des oxydes de terres rares et d'autres métaux potentiellement délétères (Ba, Pb, Th, V, U, Zn, etc) ont été calculés pour l'ensemble des 4 lithologies de stériles (Tableaux A 3, 4, 5 et 6 de l'annexe A). Une fois les échantillons sélectionnés et combinés, ceux-ci ont été homogénéisés à l'aide d'un diviseur rotatif.

Pour cette étude, 10 kg de chaque lithologie ont été utilisés pour les essais en colonne (colonnes 1 à 4) et 5 kg de chaque lithologie pour les essais de caractérisation. Cependant, suite à une erreur de sélection, le lamprophyre RS a été mélangé avec de la carbonatite RS. La lithologie nommée lamprophyre RS* est donc un mélange de 43% de carbonatite RS et de 57% de lamprophyre RS (colonne lamprophyre contient donc 4,3 kg de carbonatite RS et 5,7 kg de lamprophyre RS). En raison de cette erreur, les résultats par rapport au lamprophyre RS* ne sont pas présentés dans le chapitre 4 (article soumis au Journal of Geochemical Exploration), mais plutôt dans le chapitre 5.

Pour l'étude de Zarrouk (2025), 80 kg de stériles ont été utilisés pour quatre colonnes mixtes où les unités sont disposées de différentes façons à l'intérieur des colonnes (colonnes 5 à 8) avec 7,5 kg de carbonatites RS, 1,2 kg de lamprophyres RS*, 7,3 kg de fénites RS et 4,0 kg de brèches RS) pour chaque colonne. La proportion de ces trois dernières unités a été calculée en fonction de la masse totale disponible de ces matériaux, tandis que la proportion de la première unité est identique au pourcentage de carbonatites stériles qui sera présent dans la fosse planifiée (37,5%) (voir section 2.4.5). En tenant compte de l'erreur de sélection pour le lamprophyre RS*, les proportions de carbonatite RS et de lamprophyre RS sont modifiées. Pour une masse totale de 20 kg pour ces colonnes mixtes, les carbonatites RS représentent 8,0 kg ($7,5+1,2*43/100$), les fénites RS 7,3 kg, les brèches RS 4,0 kg et les lamprophyres RS 0,7 kg ($1,2*57/100$) (Tableau 3.1). Les colonnes mixtes contenaient ainsi 40% de carbonatites RS, 3,5% de lamprophyres RS, 36,5% de fénites RS et 20,0% de brèches RS. Les résultats de la colonne 5 (mixte) dans le cadre des travaux de Zarrouk (2025) ont été intégrés à nos travaux en guise de comparaison.

Tableau 3.1 : Calcul des quantités de chaque lithologie dans chaque colonne pour cette étude et celle de Zarrouk (2025).

Masses disponibles en kg	Étude 1: Cette étude					Étude 2: Zarrouk (2025)				Masse total à homogénéiser de chaque lithologie en kg
	Colonne 1 Carbonatites RS	Colonne 2 Lamprophyres RS*	Colonne 3 Fénites RS	Colonne 4 Brèches RS	essais de caractérisation	Colonne 5 Mixte ennovée	Colonne 6 Stratifiée	Colonne 7 Stratifiée	Colonne 8	
Carbonatites RS	842	10,0	4,3	0,0	0,0	5,0	8,0	8,0	8,0	47
Lamprophyres RS	25	0,0	5,7	0,0	0,0	5,0	0,7	0,7	0,7	14
Fénites RS	75	0,0	0,0	10,0	0,0	5,0	7,3	7,3	7,3	44
Brèches RS	48	0,0	0,0	0,0	10,0	5,0	4,0	4,0	4,0	31
Total	10,0	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	

3.2 Caractérisation physique

3.2.1 Granulométrie

Une analyse granulométrique par tamisage mécanique (RO-Tap) a été effectuée sur les matériaux de stériles au laboratoire de l'URSTM de l'UQAT (Rouyn Noranda, Québec). Le principe consiste à placer le matériau dans une série de tamis en vibration classés du plus grand au plus petit diamètre de maille afin de déterminer la répartition de la taille des particules sous l'effet des mouvements vibratoires. Les masses des fractions retenues sur chaque tamis sont pesées et exprimées en pourcentage de la masse totale de l'échantillon. Après tamisage, les fractions fines ($<300\text{ }\mu\text{m}$) ont été analysées par granulométrie laser de type Malvern Mastersizer 3000. Le principe de cet essai repose sur l'émission d'un faisceau incident à travers un échantillon de particules dispersées dans une solution (Merkus, 2009)

3.2.2 Masse volumique

La masse volumique spécifique des stériles a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à hélium ULTRAPYC 1200e. Le matériau utilisé avait un diamètre inférieur à $75\text{ }\mu\text{m}$. Cette mesure a été réalisée au laboratoire de l'URSTM et permet d'évaluer la masse volumique réelle du matériau en excluant les vides entre les particules. La précision de l'appareil varie de $\pm 0,02\%$ à $\pm 0,03\%$.

3.3 Caractérisation chimique

Des analyses chimiques par spectroscopie d'émissions atomique à plasma à couplage inductif et spectroscopie de masse (ICP-AES/MS), par fluorescence des rayons X (XRF) et par four à induction ont été effectuées sur les échantillons de stériles de granulométrie inférieur à $75\text{ }\mu\text{m}$ afin de déterminer leurs compositions chimiques. Les analyses ICP et XRF ont été réalisés au laboratoire SGS (Val d'Or, Québec) et l'analyse de soufre/carbone au laboratoire de l'URSTM. Des blancs, des analyses d'échantillons de référence et de duplicitas ont été faits à chaque lot d'analyses chimiques. Les analyses ICP ont permis de déterminer la teneur élémentaire des métaux présents dans les échantillons et les analyses par XRF ont permis d'analyser la chimie des éléments majeurs en oxyde.

3.3.1 Analyse chimique élémentaire par ICP-AES/MS

Les échantillons solides ont été analysés par ICP-AES et ICP-MS au laboratoire de SGS. Les échantillons solides sont mis en solution par ajout de quatre acides concentrés (acide nitrique, acide fluorhydrique, acide perchlorique et acide chlorhydrique) tout en les chauffant sur une plaque (Linge, 2024). La solution résultante est ensuite analysée pour évaluer les concentrations des éléments suivants pour l'ICP AES : aluminium (Al), arsenic (As), bore (B), baryum (Ba), béryllium (Be), bismuth (Bi), calcium (Ca), cadmium (Cd), cobalt (Co), chrome (Cr), cuivre (Cu), fer (Fe), lithium (Li), magnésium (Mg), manganèse (Mn), molybdène (Mo), nickel (Ni), plomb (Pb), potassium (K), sélénium (Se), silicium (Si), sodium (Na), soufre (S), strontium (Sr), titane (Ti), uranium (U) et zinc (Zn). L'exactitude des analyses a été évaluée à l'aide des standards certifiés (ES-H) et ES-L) en comparant les concentrations mesurées aux valeurs certifiées. Le biais relatif (%) a été calculé pour chaque élément. Les résultats présentant un biais inférieur à $\pm 10\%$ ont été considérés comme acceptables. La précision de nos analyses est de moins de 10% pour les éléments en traces et de moins de 5% pour les éléments majeurs.

L'analyse ICP- MS a été faite pour déterminer la concentration des éléments d'ETR. Les éléments analysés sont: cérium (Ce), dysprosium (Dy), erbium (Er), europium (Eu), gadolinium (Gd), holmium (Ho), lanthane (La), lutétium (Lu), néodyme (Nd), praseodyme (Pr), scandium (Sc), samarium (Sm), terbium (Tb), l'yttrium(Y) et ytterbium (Yb). Le tableau A7 de l'annexe A présente la limite de détection de quelques éléments. Les analyse ICP ont été faites au laboratoire de SGS avec les modèles 7700 ICP MS de Agilent pour les éléments autres que les ETR et 7850 ICP MS de Agilent pour les ETR.

3.3.2 XRF

Des analyses supplémentaires ont été réalisées sur les échantillons solides au laboratoire SGS afin de déterminer les concentrations des éléments majeurs (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si et Ti) sous forme d'oxydes par la fluorescence X. La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence. Elle utilise un faisceau de rayons X pour irradier un échantillon, provoquant l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques de ses éléments. Ce phénomène résulte de l'excitation des atomes, suivie du réarrangement électronique et de l'émission d'un rayonnement unique à chaque élément. Les rayons X émis sont ensuite dispersés par des cristaux de diffraction et détectés, générant un

signal électrique. L'intensité de ce dernier est comparée à des références pour déterminer la concentration des éléments (MEND, 2009).

3.3.3 Soufre et carbone

L'analyse de soufre total et de carbone total des échantillons solides a été faite par four à induction au laboratoire de l'URSTM avec le modèle ETRA CS-2000 et des limites de détection de 0,05% pour le carbone et 0,009% pour le soufre. Cette méthode repose sur la combustion d'un matériau à des températures pouvant atteindre 1650 °C. La concentration en soufre est ensuite déterminée en mesurant le dioxyde de soufre (SO_2) à l'aide d'un détecteur infrarouge, tandis que la teneur en carbone total est déterminée via le dioxyde de carbone (CO_2) émis (MEND, 2009). Pour les analyses de S/C, le standard AR4017 (C : 0,49%, S : 0,48%) et un blanc ont été utilisés afin de calculer le pourcentage d'erreur de 2% pour le carbone et 9% pour le soufre.

3.4 Caractérisation minéralogique

Les échantillons solides ont été soumis à des analyses minéralogiques telles que la microscopie optique (MO), la diffraction des rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage avec spectromètre à dispersion d'énergie (MEB-EDS) couplée ou non à la minéralogie automatisée (MLA) sur des lames minces polies. Ces lames minces polies ont été préparés avec des échantillons de granulométrie comprise entre 0,3 et 2 mm chez Vancouver Petrographic Ltd. en Colombie Britannique. L'observation au MO ne permettait pas la différenciation des carbonates ou des minéraux porteurs d'ETR. Pour remédier à cette limite, des analyses au MEB ont été réalisées. L'analyse au DRX ont été faites pour la détermination et la quantification des phases minérales. Afin de voir la distribution minérale et de calculer le degré de libération des minéraux, l'analyse au MLA a été effectuée. Des caractérisations minéralogiques post-démantèlements ont également été réalisées sur les stériles de lamprophyre RS* et de brèche RS afin d'identifier les produits d'altération et les minéraux secondaires formés et de voir si une croûte d'oxyde s'est formée autour de la galène et/ou de la pyrrhotite.

3.4.1 Microscopie optique (MO)

Le principe de la MO repose sur l'utilisation d'un faisceau lumineux dont les vibrations sont orientées selon un seul plan grâce à un filtre polarisateur. Deux méthodes d'observation sont possibles, le mode en transmission et le mode réfléchi. L'observation des lames par microscopie

optique en réflexion permet d'observer les minéraux sulfureux et les oxydes contenus dans les matériaux, alors que les minéraux transparents sont examinés en lumière transmise. L'observation des lames a été faite au laboratoire de l'URSTM avec le microscope AXIO Imager.M2m de la compagnie Zeiss. Ces observations avaient pour but d'identifier les principales phases minérales et d'estimer leurs pourcentages afin de servir comme base de comparaison pour les analyses au DRX et MLA.

3.4.2 Diffraction de rayons X (DRX)

L'analyse d'échantillon par DRX est une méthode permettant de déterminer la composition minéralogique d'un matériau. Le principe consiste à bombarder un échantillon avec des rayons X monochromatiques (cobalt) tout en enregistrant les rayons X diffractés en fonction d'un angle de déviation 2θ du faisceau avec un diffractomètre (Broll, 1996). Dans le cadre de nos travaux, les analyses ont été faites au synchrotron de Canadian Light Source (CLS) située à Saskatoon en Saskatchewan. Le synchrotron est un accélérateur d'électrons qui permet une réduction marquée du temps d'acquisition et du bruit de fond ainsi qu'une meilleure résolution des pics vu une énergie supérieure des électrons qui bombardent la source des rayons X monochromatiques. Les échantillons ont été micronisés (granulométrie inférieure à $10 \mu\text{m}$) au laboratoire de L'URSTM avant d'être envoyés. Les résultats obtenus et les spectres de DRX ont été analysés en utilisant le logiciel DiffracPlus EVA v.5.2.0.3. pour la détermination des phases et le logiciel TOPAS pour la quantification des phases au laboratoire de l'URSTM. La limite de détection est d'environ 0,5 à 1%.

3.4.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Afin d'avoir plus de détails sur la composition minéralogique des échantillons identifiés par les méthodes précédentes, les échantillons ont été analysés au MEB au laboratoire de l'URSTM avec le MEB de table de type TM4000III de la compagnie Hitachi. Ce microscope est couplé d'un détecteur d'électrons secondaires, d'électrons rétrodiffusés et d'un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) (Bruker Quanta x75). Ce MEB ayant une limite de détection de l'ordre de 0,1% à l'aide du EDS et du logiciel « Oxford Instrumental » permet également d'observer des minéraux de diamètre inférieur à $25 \mu\text{m}$. L'analyse au MEB a permis d'observer et d'identifier les différents minéraux carbonatés présents dans nos échantillons ainsi que les minéraux porteurs d'ETR, ce qui était difficile, voire impossible, avec le microscope optique.

3.4.4 Minéralogie automatisée MLA

Une analyse de minéralogie automatisée avec l’application MLA a été réalisée sur les échantillons à l’Université Queen’s afin d’avoir une évaluation quantitative et systématique de l’abondance, des associations, de la taille et de la forme des minéraux. Le modèle du MEB utilisé était le 650 FEG ESEM. Cette technique permet de distinguer les minéraux intercalés, fins ou complexes à l’échelle micrométrique (Sandmann, 2015). Cette analyse calcule également le degré de libération des minéraux (le pourcentage de particule libres dans le minéral par rapport à sa teneur total), l’association minérale et la distribution élémentaire des ETR.

3.5 Essai cinétique

Afin de se rapprocher aux conditions de terrain, l’essai cinétique en colonne de laboratoire a été effectué dans le cadre de ce mémoire. Quatre colonnes de hauteurs comprises entre 50 et 100 cm et de 14 cm de diamètre ont été montées (Figure 2.12). Les trois premières colonnes (carbonatites RS, fénites RS et brèches RS) contenaient 10 kg d’une seule lithologie et la colonne lamprophyre RS* contenait 4,3 kg de carbonatite RS et 5,7 kg de lamprophyre RS. Les colonnes étaient ensuite rincées avec 1,8 L d’eau désionisée toutes les deux semaines pendant presqu’une année pour un total de 24 rinçages. Cette quantité d’eau (c.à.d. 1,8 L) correspond au volume de précipitations mensuelles moyenne sur le site du gisement. Par ailleurs, les rinçages 10 et 11 ont été faits avec 0,9 L d’eau (la moitié) et les rinçages 14 et 15 avec 3,6 L (le double) afin d’apprécier la sensibilité de la qualité des lixiviats à des changements de régime hydriques. Une pompe a été utilisée pour faciliter l’infiltration de l’eau; le matériau étant fin (< 2 mm), le drainage par gravité n’était pas suffisamment efficace. Les colonnes ont également été réfrigérées à 4°C pendant la période précédant les rinçages 18 à 20 afin de visualiser l’effet de la température. Après chaque rinçage, les mesures de pH, conductivité électrique, potentiel d’oxydoréduction (POR), alcalinité et acidité ont été faites sur les lixiviats.

Les mesures de l’alcalinité et de l’acidité ont été réalisées avec le titreur automatique Metrohm 848 Titrino Plus avec une précision de 5% et une électrode combinée pour la mesure du pH. La mesure de l’acidité a été arrêtée après les quatre premiers rinçages, car les valeurs mesurées étaient trop faibles (< 4 mg CaCO₃/L). Avant d’analyser nos échantillons, une étape d’étalonnage (contrôle qualité) de la solution de titrage a été faite. Pour la détermination de l’acidité, une solution d’hydroxyde de sodium (NaOH) 0,02 N a été utilisé comme titrant. Pour l’alcalinité une solution

d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 0,02 N a été utilisée. Pour étalonner la solution de NaOH à 0,02 N, 2,5 ml de solution d'hydrogénophtalate de potassium concentré à 0,05 N a été introduit dans un contenant de 50 ml à l'aide d'une pipette et complété à environ 40 mL avec de l'eau déionisée pour ensuite être titré jusqu'à un pH d'environ 8,3. La même procédure fut reprise pour l'étalonnage de la solution de H_2SO_4 à 0,02 N. Cependant, la solution d'hydrogénophtalate de potassium était remplacée avec une solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 0,05 N et titré jusqu'à un pH d'environ de 4,3. Pour la mesure de l'acidité des lixiviats, 25 ml de ces derniers sont mis dans un contenant en plastique de 50 ml et titré avec la solution de NaOH jusqu'à un pH d'environ 4,3.

Les mesures du pH ont été faites avec un pH-mètre VWR Symphony B30PCI couplé à une électrode Thermo-scientifique Orien Green. Le pH mesure la concentration des ions H^+ présent dans les lixiviats. Avant de prendre les mesures, l'appareil a été calibré avec des solutions tampons de pH de 4, 7 et 10 suivis d'une lecture d'une solution à pH = 5 pour la confirmation de la calibration de l'électrode. Les valeurs lues lors des analyses étaient 4,99 ou 5 ou 5,01, ce qui donne une précision de $\pm 0,01$ unité.

Le POR a été mesuré avec le même appareil utilisé pour la mesure du pH mais muni d'une électrode d' Ag/AgCl (6800 BV Inspection HI 3230 de la marque HANNA Instruments) avec une précision de 0,2 mV. L'appareil est calibré via une solution certifiée à 220 mV et la valeur lire doit être additionnée à 204 mV pour avoir le Eh par rapport à l'électrode normale d'hydrogène.

Les mesures de la conductivité ont été faites avec un conductimètre VWR® Traceable Expanted Range et calibré à 1413 μS avec une précision de 1%.

Les analyses de cations par ICP-OES et d'anions par chromatographie ionique ont été respectivement faites sur les lixiviats après chaque rinçage avec les modèles 5800ICP-OES de Agilent et 940 Professional IC Vario de Metrohn. Les anions analysés étaient les sulfates, les thiosulfates, les fluorures et les phosphates. Avant d'être envoyé pour les analyses ICP-OES et MS et de chromatographie ionique, les lixiviats ont été filtrés à 0,45 μm . Ensuite les lixiviats ont été acidifiés à 2% d'acide nitrique (HNO_3) concentré pour les analyses ICP afin de préserver et de maintenir en phase soluble les métaux dissous. L'ensemble de ces travaux ont été effectués au laboratoire de l'URSTM. L'analyse ICP-MS a été faite au laboratoire de SGS pour la détermination des éléments en trace tels que les ETR. Le tableau A7 de l'annexe A donne les limites de détection

des éléments analysés. La mesure des radionucléides a été faite avec les lixiviats des rinçages 1 à 6 et ceux du rinçage 10 à 15 au laboratoire de SRC. Pour des fins de contrôle qualité, des analyses de blancs et de duplicitas ont été effectuées. Des analyses chromatographiques ont été faites pour déterminer les teneurs des sulfates, phosphates, fluorures et thiosulfates présents dans les lixiviats. Des analyses de radionucléides ont été également faites afin de voir si les échantillons ont lixivé des éléments radioactifs tels que ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th . Des calculs d'équilibres thermodynamiques ont été faites dans le but de voir la spéciation des ETR et les minéraux secondaires susceptibles de se précipiter.

3.6 Modélisation géochimique avec le logiciel PHREEQC

PHREEQC est un logiciel de modélisation géochimique qui permet d'effectuer une grande variété de calculs géochimiques aqueux tels que des calculs de spéciation et d'indice de saturation (Parkhurst et Appelo, 1999). Ce logiciel a été utilisé dans le cas de ces travaux afin de calculer la spéciation des espèces dissoutes et vérifier les indices de saturation de minéraux secondaires potentiels pour chacun des rinçages. La version 3.8.6-17100 de PHREEQC et les bases de données thermodynamiques V1.10_15Dec2020.dat and llnl.dat (pour l'investigation de l'influence du pH dans la spéciation des ETR) sont utilisées. L'ensemble des métaux analysés par ICP et les anions sur les lixiviats ont été introduits dans le logiciel en ajoutant le pH, le Eh (lié au potentiel d'oxydoréduction) et l'alcalinité. Les éléments dont les teneurs mesurées étaient sous la limite de détection ont été retirés dans les calculs d'équilibre thermodynamique.

3.7 Démantèlement des colonnes

Le démantèlement des colonnes a été fait en cinq couches (0 à 2 cm, 2 à 5 cm, 5 à 10 cm, 10 à 15 cm et 15 cm jusqu'à la base de la colonne) sur toutes les colonnes (Figure 3.2). Le matériau a été ensuite séché à l'étuve avant d'être mis dans des chaudières. Des analyses au MEB sur section polies ont été effectuées sur la couche 0 à 2 cm des colonnes de brèches RS et de lamprophyres RS* afin d'observer l'association de la galène et de la pyrrhotite vue au MEB sur les lames de ces lithologies. Cette couche fut choisie car elle a subi le plus d'oxydation vu la finesse de notre matériau et le temps d'infiltration de l'eau.

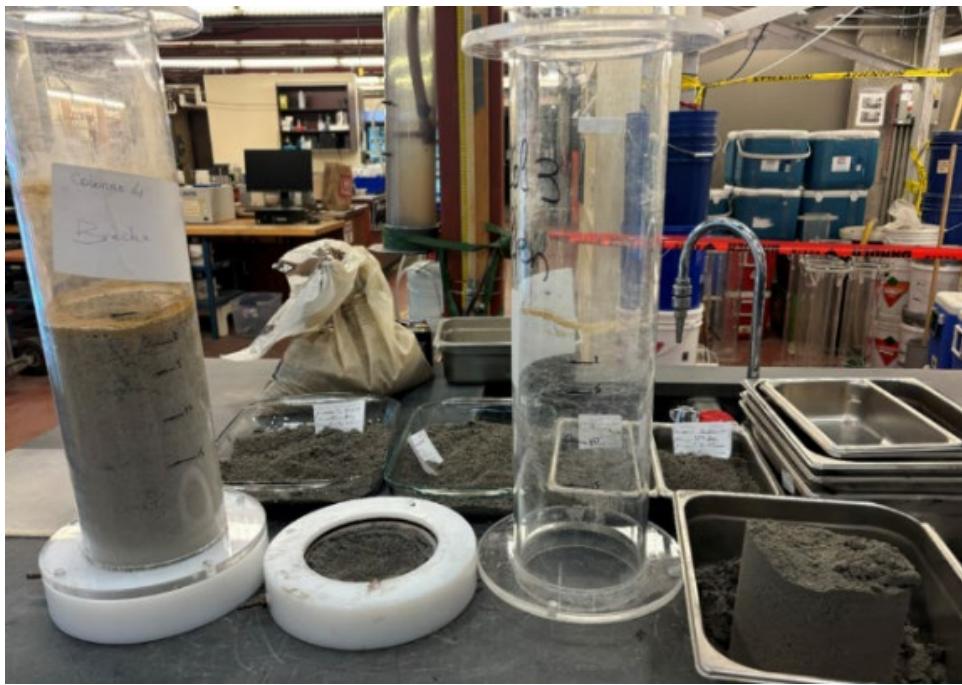


Figure 3.2 : Démantèlement des colonnes

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 « GEOENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS ASSOCIATED WITH WASTE ROCK FROM THE ASHRAM RARE EARTH ELEMENT (REE) AND FLUORSPAR CARBONATITE DEPOSIT, NUNAVIK, QUEBEC, CANADA »

Ce chapitre présente l'article intitulé « **Geoenvironmental considerations associated with waste rock from the Ashram Rare Earth Element (REE) and Fluorspar Carbonatite Deposit, Nunavik, Quebec, Canada** » a été déposé le 11 novembre 2025 à la revue the Journal of Geochemical Exploration.

L'ensemble des résultats des échantillons carbonatite RS, fénite RS et brèche RS de cette étude sont présentés dans l'article. Vu la contamination de l'échantillon de lamprophyre RS, les résultats de lamprophyre RS* sont plutôt présentés au chapitre 5 et ne sont donc pas inclus dans l'article.

Auteurs :

Mariama Sow¹, Marc Legault², Benoît Plante³, Darren L. Smith⁴, Marie-Pier Boivin⁵

¹Institut de Recherche en Mine et en environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue (UQAT), Rouyn-Noranda, Québec, Canada, Mariama.Sow@uqat.ca

²Institut de Recherche en Mine et en environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue (UQAT), Rouyn-Noranda, Québec, Canada, Marc.Legault@uqat.ca

³Institut de Recherche en Mine et en environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue (UQAT), Rouyn-Noranda, Québec, Canada, Benoit.Plante@uqat.ca

⁴Mont Royal Resources Limited, Québec, Canada, darren.smith@dahrouge.com

⁵Mont Royal Resources Limited, Québec, Canada, marie-pier.boivin@dahrouge.com

Mots clés : stériles minier, carbonatite, ÉTR, DNC, lixiviation, Gisement d'Ashram,

Abstract:

The Ashram Deposit, located in Nunavik, Quebec, Canada, is a promising source of REEs associated with the Eldor Carbonatite Complex. This study aims to evaluate the geochemical behaviour of the waste rock that will be produced from the proposed pit mining of the Ashram Deposit. An integrated approach combining physical, chemical and mineralogical characterizations, laboratory column leaching tests, and geochemical modelling was implemented. The results show that the waste rock from the Ashram Deposit has a low potential for contaminant generation and is potentially non-acid-generating. Speciation data suggest saturation of potential secondary phases such as fluorite (CaF_2), barite (BaSO_4) and some carbonates (calcite (CaCO_3), cerussite (PbCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), magnesite (MgCO_3), strontianite (SrCO_3), and whiterite (BaCO_3)). However, all carbonates, fluorites, and rare earth hydroxides remain undersaturated. This assessment makes it possible to anticipate the risks of contaminated neutral drainage (CND) and to guide the management of waste rock from a responsible mining development perspective.

Keywords: waste rock, carbonatite, REE, CND, leaching, Ashram deposit

4.1 Introduction

In the global context of the transition to clean technologies, such as wind turbines, electric vehicles and energy-efficient lighting, the demand for critical metals, including rare earth elements (REEs), continues to grow. These metals are essential for the manufacture of many modern technologies (Zhou and al., 2017), which is pushing many countries to secure their supply and reduce their dependence on major producing powers. Canada, which has a strong geological potential for REEs, could derive significant economic benefits from the development of their own deposits. This strategy would notably reduce its dependence on China, the world's leading producer of REEs with 70% of total global production and 87% of refined global production (Natural Resources Canada, 2024). REEs include the 15 lanthanides, from lanthanum (La) to lutetium (Lu), and yttrium (Y), and sometimes scandium (Sc). The latter two are often included in the REE group because of their physical and chemical properties similar to those of lanthanides (Lima and Leal Filho, 2016; Preinfalk and Morteani, 1989; Schulz *et al.*, 2017; Voncken, 2016). REEs are generally classified into two subgroups according to their atomic weight: light rare earths (LREEs), which range from lanthanum to gadolinium, and heavy rare earths (HREEs), from terbium to lutetium, including

yttrium. Scandium, on the other hand, does not fit into these two groups (Dushyantha and al., 2020; Schulz and al., 2017) and is found in separate deposits and minerals, and therefore will not be addressed in this study. Although their name may suggest otherwise, REEs are not particularly rare in the Earth's crust, with concentrations ranging from 0.3 to 64 ppm (Taylor and McLennan, 1985). However, deposits that are sufficiently concentrated to be exploited in an economically viable manner are rare on a global scale (Castor and Hedrick, 2006; Verplanck *et al.*, 2014). As a result, REEs are now considered critical metals (CMs) in several industrialized countries, including Canada, the United States, the European Union, and Australia. In response to this growing demand, many mining and mineral exploration companies are conducting exploration campaigns in which regions with high potential such as the Labrador Trough in Nunavik are of particular interest. Among the advanced exploration projects is Ashram, a carbonatite-hosted REE and fluorspar deposit being developed by Mont Royal Resources Ltd., and the subject of this study. As with other metals, the exploitation of REEs can have significant environmental impacts, particularly in relation to drainage water from waste rock piles. To date, very few studies have been conducted on the environmental effects of waste rock from REE deposits, particularly those associated with carbonatites, as is the case for Ashram. In addition, the majority of historical mines of REEs, such as Mountain Pass (U.S.) and Bayan Obo (China), do not have enough detailed public environmental data (Van Gosen, and al., 2017). This lack of information is a major obstacle in understanding the geochemical risks associated with these operations, especially in sensitive environments such as subarctic-arctic ecosystems. In this context, the study presented here aims to fill these gaps by characterizing the geochemical risks associated with the future waste rocks that will result from the potential exploitation of the Ashram Deposit. This work is based on two specific sub-objectives: (1) the identification of the minerals present in the waste rocks of the deposit by making physico-chemical and mineralogical characterizations of the different lithologies, in order to assess the environmental risks; and (2) the evaluation of the potential for generating contaminated neutral drainage (CND) by kinetic column testing over a period of 12 months in the laboratory.

4.2 Ashram Deposit

The Ashram Deposit is located in northern Quebec (Nunavik) approximately 130 km south of the community of Kuujjuaq (Figure 4.1). It is located in the Eldor Carbonatite Complex which was emplaced in the Paleoproterozoic metasedimentary and metavolcanic sequences of the New

Quebec Orogen (Cassoff *et al.*, 2024; Clark and Wares, 2006). The Ashram Deposit is a major Canadian REE exploration project held by Mont Royal Resources Ltd. It is a carbonatite-type deposit, rich in light REEs, but also with an unusually high percentage of Nd-Pr and of heavy REEs for this deposit type (Beland and Williams-Jones, 2021a,b). It is also one of the largest REE deposits in the world (Wang *et al.*, 2020; Dushyantha *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023) and has a monazite-dominated REE mineralogy with a strong fluorite (CaF_2) component. The main minerals associated with mineralization are mainly monazite-(Ce), monazite-(Nd) with lesser amounts of bastnaesite-(Ce) and bastnaesite-(Nd) (Beland and Williams-Jones, 2021a,b; Mitchell and Smith, 2017). REE minerals are very fine with an average of 15 to 20 μm and along with fluorine (10 to 30% F via fluorite) are the main commodities of interest for the Ashram deposit. However, other products such as niobium (Nb), tantalum (Ta), and phosphate are concentrated in certain areas of the area (Gagnon *et al.*, 2015). The work done by Beland and Williams-Jones (2021a) on the Ashram deposit shows that REEs were precipitated from hydrothermal fluids to be concentrated in minerals and show fractionation of REE typical of carbonatite REE deposit type (Wang *et al.*, 2020).

The Ashram Deposit hosts a Mineral Resource of 73.2 Mt at 1.89% total rare earth oxide (TREO) and 6.6% CaF_2 Indicated, and 131.1 Mt at 1.91% TREO and 4.0% CaF_2 Inferred³ (Cassoff and al., 2024). The Ashram deposit has several similarities with other REE deposits such as the Mountain Pass deposit in California (United States)(Gagnon *et al.*, 2015) (Table 4.1).

³ TREO = sum of all lanthanide oxides + yttrium oxide. Ashram Mineral Resource Estimate is reported at a cut-off of CAD \$287 Net Metal Return (NMR) per tonne with an Effective Date of April 4, 2024. Mineral resources are not mineral reserves as they do not have demonstrated economic viability.

Table 4.1 : Similarities between the Ashram Deposit and other REEs carbonatites deposits around the world.

Deposit / Mine	State of Activity	Region	Deposit Type	Primary Rare Earth Mineralogy	Deposit Grade ⁵ (REO)	Mineral Concentrate Grade ⁵ & Recovery ⁶	Comments
Bayan Obo ¹	Production		Carbonatite ⁴	Monazite, Bastnaesite	1-6%	Two concentrates 55-65% REO & 36% REO @ 60% combined recovery	Dominates global production, primary iron mine with REO by-product
Mount Weld ² 	Production		Carbonatite (laterite)	Monazite (secondary)	7-11%	40% REO @ 70% recovery	Significant technical challenges
Mountain Pass 	Production		Carbonatite	Bastnaesite	6-9%	60 to 65% at high recovery	Once primary REO producer globally
Sichuan ³	Production		Carbonatite	Bastnaesite	2-3%	60-70% REO @ >80% recovery	Second largest producing region globally
Weishan	Production		Carbonatite	Bastnaesite	1-3%	Two concentrates 60% REO & 35% REO @ 80% combined recovery	Head grade is falling, lower quality material, inconsistent producer
Ashram	Development		Carbonatite	Monazite, Bastnaesite	2%	40-50% @ >75% recovery	Unique enrichment in Pr, Nd, Dy, Tb
Karnasurt, (Lovozero)	Production (minor)		Granitoid	Loparite	0.9%	30% REO @ 70% recovery	Unique to Russia, REE by-product of Nb-Ta-Ti
Placer	Production (minor)		Placer (heavy sands)	Monazite, Xenotime	<0.2%	50-60% REO @ >80% recovery	Source of HREO, REO co-product with Ti-Zr...
Clay	Production		Clay	n/a (ion-absorbed)	0.05-0.2%	n/a	Primary source of HREO

The deposit is structured into four REE zones (A-Zone, B-Zone, Breccia Classic, and BD-Zone) (Figure 4.1) (Cassoff *et al.*, 2024). The A-Zone is located in the centre of the deposit and represents the largest and most mineralized unit, ranging from 1.5 to more than 3.0% TREO. The unit is fine-grained with magnesium siderite clasts richer in fluorite and monazite in a ferro-dolomite matrix with trace amounts of sulfides. Monazite and to a lesser extent bastnaesite are the main REE-carrying minerals. Xenotime is also present in small amounts. Geochemically, the zone varies between magnesiocarbonatite and ferrocarbonatite. The B-Zone is composed primarily of coarse-grained cataclastic ferro-dolomites, with fewer fluorite-monazite clasts. There are also clasts of quartz-phlogopite, calcite, microcline, as well as veins of niobian rutile, ferrocolumbite, xenotime and bafertisite. Fluorite is uncommon but locally abundant, while sulfides are rare. This B-Zone is less deformed and more homogeneous than the A-Zone with an REE grade generally between 1 and just over 2% TREO. It is geochemically classified as a magnesiocarbonatite. The transition to the BD-Zone is manifested by a decrease in yellow-beige mineralization (monazite-fluorite) and the appearance of orange-pink fluorocarbonate REE minerals, giving a pinkish tone to the BD-Zone. The BD-zone (which is not included in the resource calculation) has a texture similar to the B-zone. It contains crystalline dolomite, with frequent fluorocarbonates (parasite, bastnaesite), and

small amounts of phlogopite, quartz, calcite and microcline. Fluorite and monazite are rare or absent. Its REE content is lower than those of the A- and B-zones (between 0.6 and just over 1% TREO), but with relative enrichment in Nd and Pr as well as heavy REEs. Geochemically, it is also classified as a magnesiocarbonatite. The Breccia Classic is composed of angular to rounded polymict centimeter sized clasts in an aphanitic to very fine carbonatitic matrix slightly enriched in REE (about 1% TREO). It also features dolomite, calcite, and carbonatite clasts with pyrochlore that geochemically differentiates it from the other types of REE carbonatite rocks. This breccia intersects the three other zones at depth and also exhibits traces of sulfides (Figure 4.1).

The deposit is envisioned to be mined in an open pit with a stripping ratio of 2.7:1 (Cassoff *et al.*, 2024). Weakly mineralized carbonatites and breccia, fenites and lamprophyres (minor volume (< 10%)) constitute the main sterile lithologies of the Ashram Deposit. The proximity to the surface, combined with a high REE grade, places Ashram among the most promising deposits in Canada for the production of critical and strategic metals (Natural Resources Canada, 2024). However, due to its location in a subarctic-arctic ecosystems and limited number of environmental studies on this type of deposit, a geoenvironmental assessment on future waste rocks is necessary.

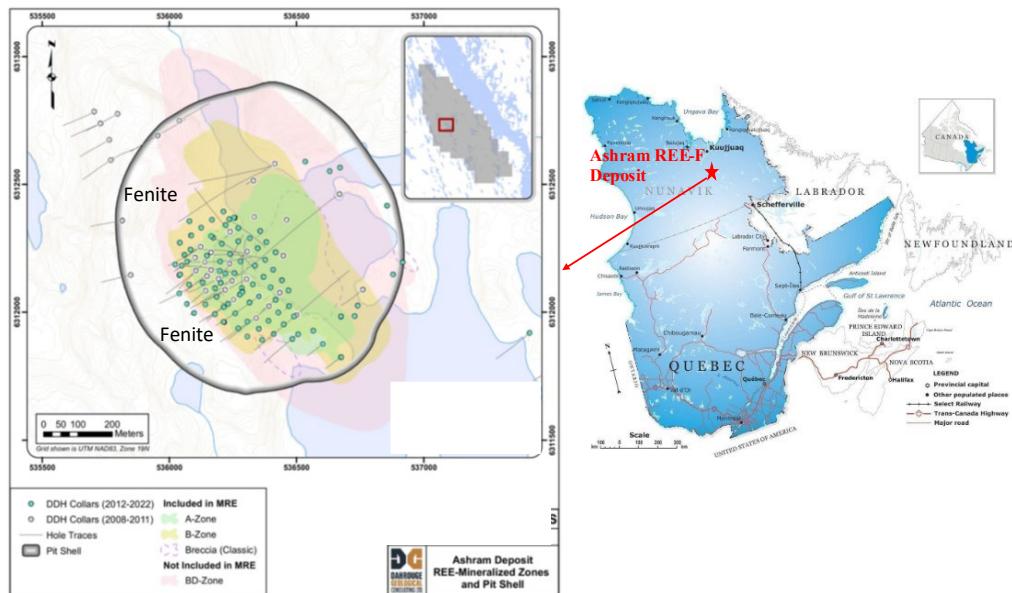


Figure 4.1: Plane section of the geological model of the Ashram deposit located in northern Quebec (Cassoff *et al.*, 2024).

4.3 Materials and Methodology

Physical characterizations (sieve and laser particle size, and specific density), chemical characterizations (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), mass spectroscopy (ICP-MS), X-ray fluorescence (XRF), sulfur and carbon analysis (S/C) in the induction furnace), mineralogical characterizations (optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and automated mineralogy (MLA)) and kinetic laboratory column tests were carried out on the three main lithologies of the future waste rock that are expected to be produced from an open pit operation at Ashram, in order to characterize the geochemical risks associated with these waste rocks. The carbonatite of the waste rocks for this study (carbonatite WR) comes from the low-grade portion of the BD-Zone and is characterized by low concentrations of REEs, high carbonate and low sulfide contents. Fenites come from the metasomatism of carbonatite-host rocks by alkaline hydrothermal fluids. Ashram fenite waste rocks for this study (fenite WR) are biotite-rich and spatially associated with the BD-Zone. It is poorly mineralized but has some REE minerals such as parisite and monazite. Waste rock breccia for this study (breccia WR) is from a mixture of samples from the low-grade Breccia Classic and another unmineralized breccia. The breccia WR is characterized by a high density of carbonate and fenite clasts and it is the richest in monazite and REE content compared to other waste rock lithologies.

4.3.1 Sample selection

Mont Royal Resources has provided representative samples (< 2 mm) of the three main lithologies of the future potential waste rocks of the Ashram Deposit: carbonatite WR (842 kg), fenite WR (75 kg) and breccia WR (48 kg). The samples selected for the kinetic tests were chosen to represent the average concentrations of REE and potentially deleterious metals of the samples supplied by Mont Royal Resources. To do this, descriptive statistics (means and quartiles) were used to ensure that waste rock samples used in this study were representative of the lot sent by Mont Royal Resources. Subsequently, the samples within a same lithology were homogenized using a rotating sample divider. Each lithology was treated separately, with three successive passes through the divider selecting opposite compartments to optimize the mix. After homogenization, the samples were subjected to physical, chemical and mineralogical characterizations, carried out in the laboratory of the Mineral Technology Research and Service Unit (URSTM) at the Université du

Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) (Rouyn-Noranda) and in various specialized laboratories before the kinetic column tests.

These samples were divided between this project and Zarrouk (2025), with specific needs depending on the kinetic tests to be performed (pure lithology columns, mixed lithology columns, characterization). For this project, columns of pure lithologies were constituted (10 kg per lithology) and an additional 5 kg per lithology were reserved for characterization.

4.3.2 Physical characterizations

The particle size of the waste rock was analyzed at the URSTM laboratory by mechanical sieving (Ro-Tap) for the fractions $>300\text{ }\mu\text{m}$, then by laser particle size (Malvern Mastersizer 3000) for the finer fractions, to obtain an accurate distribution of particle sizes. Specific gravity was measured using an ULTRAPYC 1200e helium pycnometer on an aliquot sprayed to less than $75\text{ }\mu\text{m}$. Systematic calibration allows the device to be accurate $\pm 0.02\%$ to $\pm 0.03\%$.

4.3.3 Chemical characterizations

Chemical analyses were performed on waste rock samples with a particle size $<75\text{ }\mu\text{m}$ to determine their composition. Three main techniques were used. ICP-AES/MS analyses were performed in the SGS laboratory after digestion by four concentrated acids (nitric acid, hydrofluoric acid, perchloric acid, and hydrochloric acid) with an Agilent 7700 ICP MS for major elements and Agilent 7850 ICP MS for REEs. XRF analysis were also made in the SGS laboratory. This method was used to measure the concentrations of major elements in the form of oxides. The S/C was measured at the URSTM laboratory with an induction furnace (ETRA CS-2000), by combustion and infrared detection of the emitted gases (SO_2 , CO_2). The accuracy of ICP and XRF analyses is approximately 5% for major elements and 10% for trace elements, and the detection limits for carbon and sulfur are 0.05% and 0.009%, respectively. Blanks, analyses of reference samples and duplicates were made for each round of analysis.

4.3.4 Mineralogical characterizations

Several techniques were used to analyze the mineralogy of the waste rocks. Polished thin sections were prepared from samples with a grain size between 0.3 and 2 mm and were observed under an optical microscope at the URSTM laboratory. This analysis made it possible to observe opaque minerals (sulfides, oxides) in reflected light and transparent minerals in transmitted light in order

to identify the mineral phases and estimate their proportions. X-ray diffraction (XRD) was performed at the Brockhouse Diffraction Sector of the Canadian Light Source Synchrotron (Saskatoon, Saskatchewan) after micronization of the samples ($<10\text{ }\mu\text{m}$). Identification and quantification of the mineral phases were done with the DiffracPlus EVA v.5.2.0.3 and TOPAZ softwares. The detection limit is about 0.5 to 1%. The scanning electron microscope (SEM) examination was performed at the URSTM with a benchtop TM4000III SEM (Hitachi) coupled with the secondary, backscattered electron detectors and a Bruker Quanta x75 energy dispersive spectrometer (EDS). This analysis identified carbonate minerals and REE carriers not identified with the optical microscope. The SEM has a detection limit of the order of 0.1% using the EDS and the "Oxford Instrumental" software. Another mineralogical analysis was done at Queen's University with a Quanta 650 FEG SEM coupled with Mineral Release Analysis (MLA) to provide a quantitative analysis of the minerals, their associations, sizes, shapes, and degree of liberation in the matrix.

4.3.5 Laboratory Column Kinetic Testing

To study the geochemical behaviour of the waste rock, kinetic column tests were performed at the URSTM laboratory on three columns (height 50–100 cm, diameter 14 cm), each containing 10 kg of a single lithology (Figure 4.2).

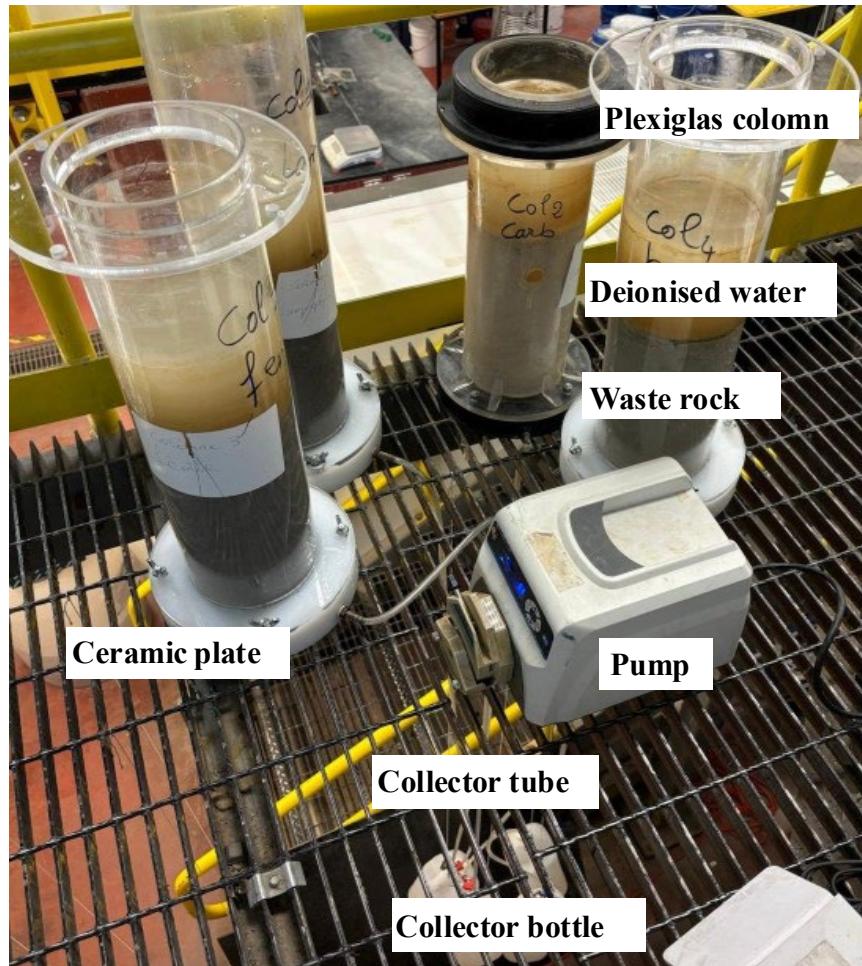


Figure 4.2 : The setup for laboratory column kinetic testing.

The columns were then rinsed with 1.8 L of deionized water every two weeks for a total of 24 flushes. This quantity of water represents the volume of average monthly precipitation at the deposit site. In addition, flushes 10 and 11 were carried out with 0.9 L of water (half) and flushes 14 and 15 with 3.6 L (double) of deionized water in order to assess the sensitivity of leachate quality to changes in water regime. The use of a pump facilitated the infiltration of water into the material, which was not very permeable. During flushes 18 to 20, the columns were refrigerated at 4°C to assess the effect of colder temperatures on the quality of the leachates. After each rinse, electrochemical measurements (pH, conductivity, redox potential, alkalinity, acidity) were taken. The pH measurements were made with a VWR Symphony B30PCI pH meter coupled to an Orien Green thermo-scientific electrode with an accuracy of 0.2 units. Before taking the measurements, the device was calibrated by buffer solutions with pH of 4, 7 and 10 followed by a pH 5 reading to

confirm the electrode calibration. The redox potential was measured with the same device used for pH measurement but equipped with a platinum electrode (6800 BV Inspection HI 3230 from HANNA Instruments) with an accuracy of 1 mV. The device was calibrated to 220 mV and the reading value was corrected by adding 204 mV to obtain the Eh. Conductivity measurements were made with a VWR® Traceable Expanded Range conductivity meter and calibrated to 1413 µS with an accuracy of ± 1 mg CaCO₃/L for alkalinity samples between 10 and 500 mg CaCO₃/L. Alkalinity and acidity measurements were performed with the Metrohm 848 Titrino plus automatic titrator with an accuracy of 5% and a combination electrode for pH measurement. However, the acidity measurement was stopped after the first four rinses because the measured values were too low (< 4 mg CaCO₃/L). Before analyzing the samples, a calibration and quality control were done. For calibration of alkalinity, a sulfuric acid solution (H₂SO₄) at 0.02 N was used as the titrant and the leachate was titrated to a pH of approximately 4.3. For acidity, the leachate was titrated with a solution of NaOH 0.02 N up to pH of 8.3.

Chemical analyses of the leachates were performed by ICP-OES (major elements; Agilent model 5800ICP-OES) at the URSTM laboratory, and ICP-MS (trace elements) at the SGS laboratory after filtration (0.45 µm) and acidification to 2% concentrated nitric acid (HNO₃), while anions (sulfates, thiosulfates, fluorides, phosphates) were analyzed by ion chromatography (940 Professional IC Vario from Metrohn) at the URSTM laboratory. Radionuclide measurements were performed on selected rinses at the Saskatchewan Research Council (SRC). Quality controls, blank and duplicate, ensured the reliability of the analyses.

4.3.6 Geochemical modeling with PHREEQC software

PHREEQC, a software used to perform calculations of aqueous geochemical equilibria (Parkhurst and Appelo, 1999), was used to calculate ion speciation and saturation indices of potential secondary phases in the leachates of each rinse, incorporating the measured concentrations of dissolved metals, anions, pH, redox potential and alkalinity. Elements with concentrations below the detection limit were considered using half the value of the detection limit. Several databases have been developed for this software by researchers according to their study objectives. For this study, PHREEQC version 3.8.6-17100 and databases thermoddemV1.10_15Dec2020.dat and llnl.dat (to investigate the influence of pH and temperature in REE speciation) were used in modelling.

4.4 Results and discussions

4.4.1 Physical characterizations

The particle size analysis by sieving shows that all the lithologies have a relatively similar distribution with the breccia showing a slightly coarser grain size (Table 4.2). The density of the three lithologies is similar and is shown in Table 4.2. The higher density of the breccia WR is probably due to a higher concentration of ferro-magnesian minerals while the lower density of the fenite WR is consistent with a mineralogy rich in feldspars and quartz.

Table 4.2 : Physical properties of the waste rocks used in the study.

Parameter	Units	Carbonatite WR	Fenite WR	Breccia WR
D10	(µm)	8.80	11.3	8.60
D60	(µm)	553	712	744
D90	(µm)	1448	1604	1616
Specific density (Gs)		2.96	2.94	3.02

4.4.2 Chemical characterizations

Chemical XRF and S/C analyses performed on solids show that the Fenites WR have the highest SiO₂, Al₂O₃, Na₂O and K₂O contents. However, the other lithologies show similar and higher grades of MgO, CaO and P₂O₅ with slightly higher values in the carbonatites WR. All samples are low in sulfur and high in carbon, which is consistent with the near absence of sulfides and the abundance of carbonates (Table 4.3).

Table 4.3 : Chemical characterization of waste rocks used in the study by XRF and sulfur-carbon.
L.O.I. = loss on ignition.

Major oxides (%)	Carbonatite WR	Fenite WR	Breccia WR
SiO ₂	2.35	9.73	3.47
Al ₂ O ₃	0.27	2.43	0.80
Fe ₂ O ₃	5.33	7.16	9.01
MgO	15.9	14.9	13.9
CaO	30.6	26.1	28.2
Na ₂ O	0.04	0.24	0.08
K ₂ O	0.06	1.23	0.37
TiO ₂	0.06	0.80	0.42
P ₂ O ₅	2.96	3.02	2.98
MnO	0.85	0.63	0.98
P.O.I	41.6	33.8	39.8
C _{total}	11.3	8.92	10.45
S _{total}	0.09	0.365	0.348

Chemical analyses by ICP/OES-MS show that the breccia WR samples do contain higher values of zinc and lead (Table 4.4). However, the other chalcophile elements (Cu, Ni, Co, As, Bi, Mo) show generally very low values. In addition, the fluorine values are very low considering the large CaF₂ resource of the deposit (< 60 ppm). The high levels of Ca, Fe, Mg, Mn, and Sr are probably due to an abundance of ferro-magnesian carbonates (ankerite, dolomite).

Table 4.4 : Concentration of elements in ppm in samples

Elements (ppm)	Carbonatite WR	Fenite WR	Breccia WR
Al	970	14000	3600
As	28	15	36
Ba	190	1500	350
Be	3.5	24	6.3
Bi	0.49	0.35	1.8
Ca	190000	180000	170000
Cd	1.6	1.6	1.6
Co	4.4	17	12.
Cr	14	8.0	15
Cu	2.9	55	11
Fe	32000	48000	54000
K	860	14000	4200
Li	19	130	28.0
Mg	84000	88000	71000
Mn	5900	5000	6700
Mo	5.4	3.7	8.6
Na	400	1600	670
Ni	11	7.6	14
Pb	69	22	400
Se	7.0	3.1	10
Sr	3200	3100	2500
Ti	140	1300	730
Zn	190	260	430
F	22	33	39
U	0.62	9.2	12
Th	21	90	11

The samples contain appreciable amounts of REEs (between 0.27% and 0.82%) showing a strong fractionation in favor of light REEs versus heavy REEs (Table 4.5). This REE distribution is typical of carbonatite-associated mineralizations (Wang *et al.*, 2020) and is similar to that of the A zone of the Ashram Deposit (Figure 4.3).

Table 4.5 : REE concentrations in ppm.

Element (ppm)	Carbonatite WR	Fenite WR	Breccia WR
La	1100	510	1700
Ce	2600	1200	3500
Pr	320	140	390
Nd	1200	510	1500
Sm	180	74.6	240
Eu	50	20	67
Gd	140	60	200
Tb	16	6.9	25
Dy	66	30	110
Ho	10.5	4.9	16
Er	26	12	39
Tm	2.8	1.3	3.9
Yb	16.4	7.8	22
Lu	2.0	1.0	2.6
Y	240	120	360
Σ LREE	5590	2515	7597
Σ HREE	380	184	578
Σ ETR	5970	2698	8176

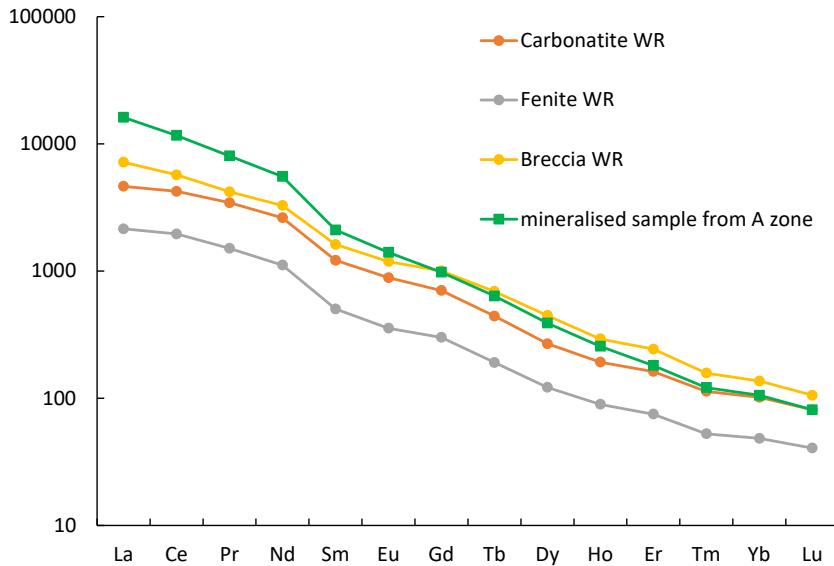


Figure 4.3 : REEs normalized with chondrite. This mineralized sample from the A Zone is from Beland and Williams-Jones (2021a). Chondrite values from McDonough and Sun (1995).

4.4.3 Mineralogical characterizations

Mineralogical analyses have made it possible to identify assemblages for each lithology. Observation of the samples under an optical microscope established that carbonates are the main minerals in the three lithologies. Apatite was also observed in appreciable amounts in all three lithologies. With the SEM, the different types of carbonates were distinguished, and they show great variability (Figure 4.4). The results show that all lithologies are generally enriched in dolomite compared to calcite and ankerite, and that the carbonatites WR contain hardly any calcite. We also note the presence of siderite in all three lithologies. The work of Mitchell and Smith (2017) and Beland and Williams-Jones (2021b) show similar mineralogy in mineralized carbonatites. Other minerals such as fluorite, monazite, and parisite were also observed, the latter being usually included in the carbonates in all lithologies. Several sulfide accessory minerals (pyrite, pyrrhotite, sphalerite, and galena) have also been identified with the SEM despite the fact that they form a very small proportion in the waste rocks ($\leq 1\%$) (Figure 4.5). Other than pyrrhotite, these sulphides were also observed in the A and B zones although in very small proportions (Mitchell and Smith, 2017). In particular, there is an association between galena and pyrrhotite in the breccia WR where the galena is not free and is included in the pyrrhotite (Figure 4.5D).

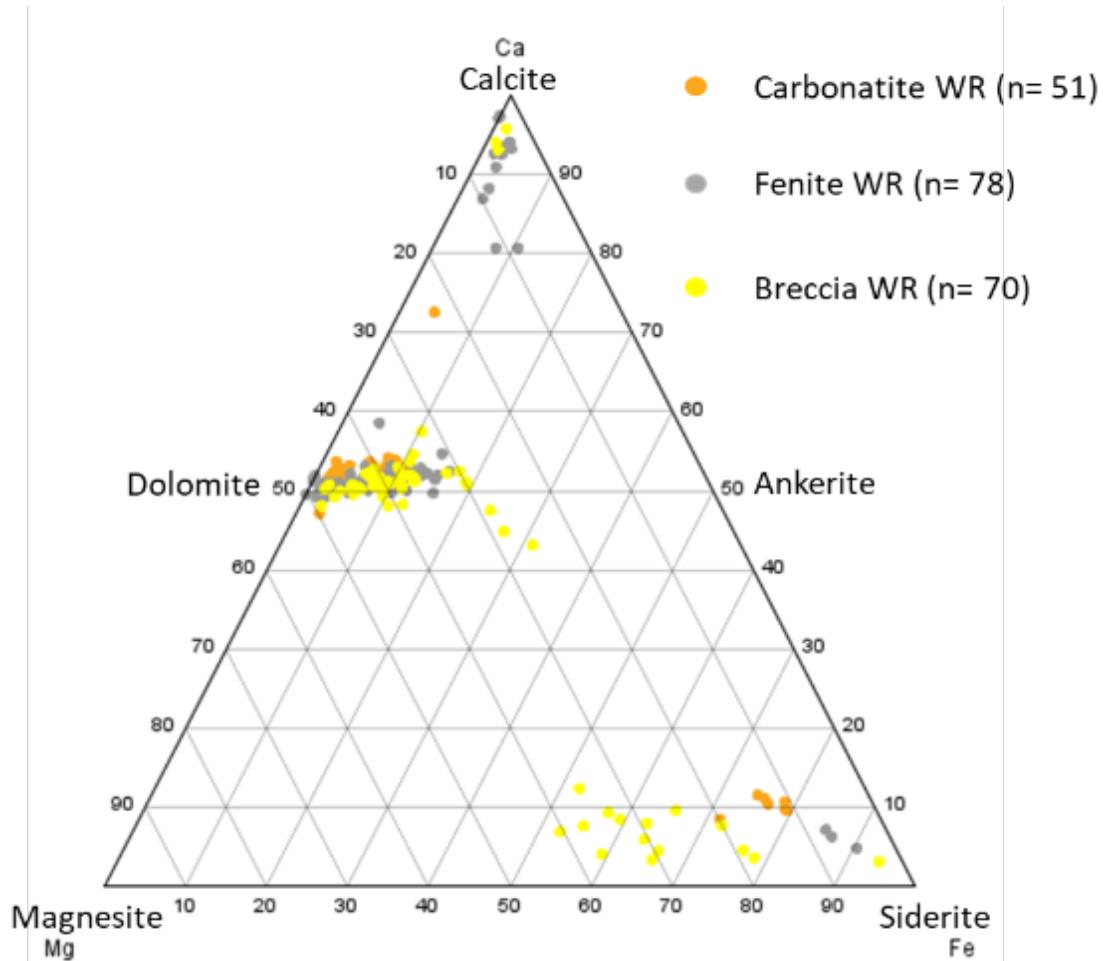


Figure 4.4 : Ternary diagram of carbonates from waste rocks analyzed with SEM-EDS showing the presence of several types of carbonates (n is the number of analyses).

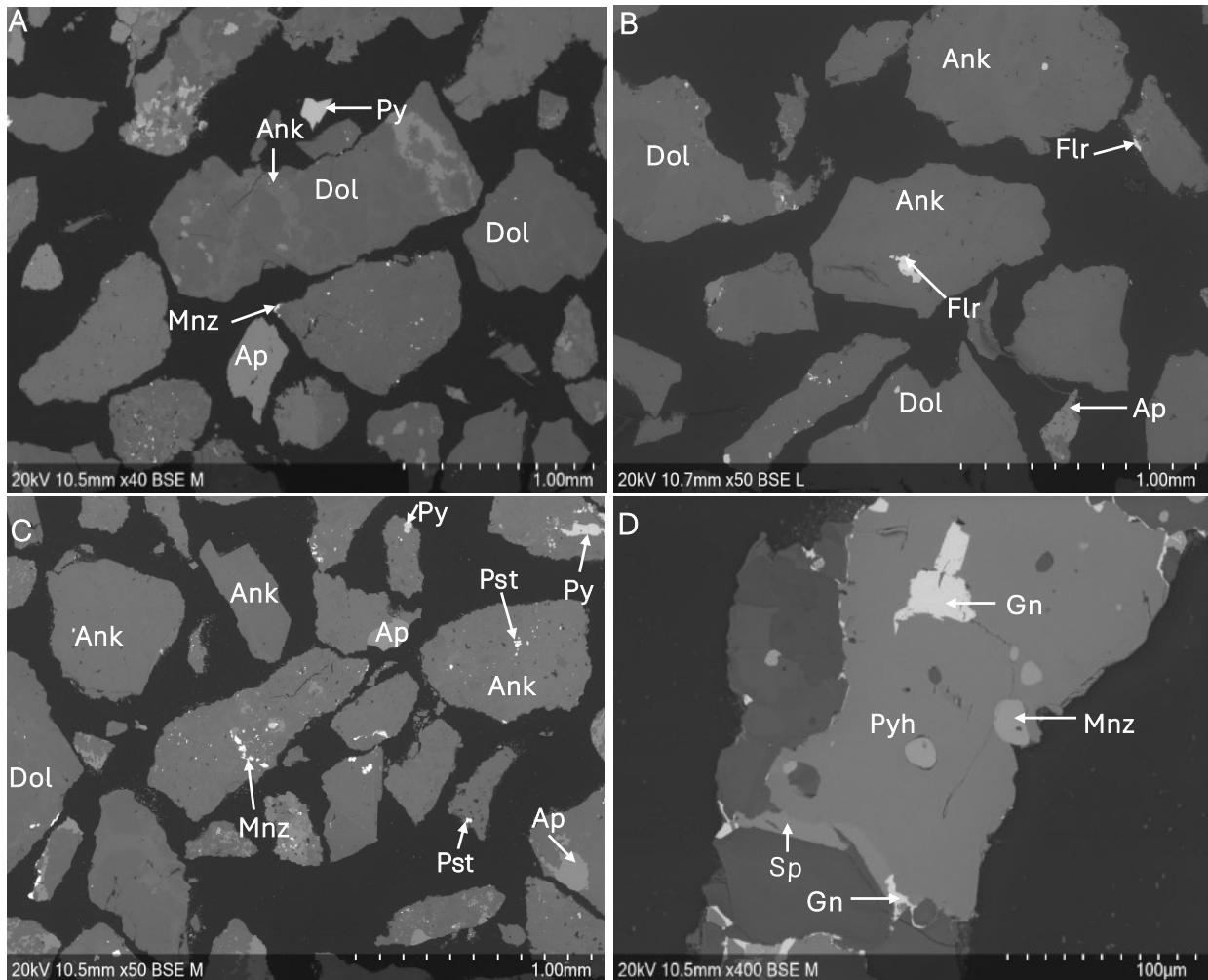


Figure 4.5 : SEM-BSE images of the fenite WR (A), the carbonatite WR (B) and the breccia WR (C and D) samples. Ank (Ankerite), Ap (Apatite), Dol (Dolomite), Flr (Fluorite), Gn (Galena), Mnz (Monazite), Pst (Parisite), Py (Pyrite), Pyh (Pyrrhotite), Sp (Sphalerite).

Table 4.6 : Mineral proportions of waste rocks from MLA and XRD analysis.

	Carbonatite WR		Fenite WR		Breccia WR	
Minerals	MLA	DRX	MLA	DRX	MLA	DRX
Ankerite	79.21	40.0	57.80	5.9	83.8	45.3
Albite	0.24	0.8	1.34	1.4	0.23	1.0
Apatite	8.21	1.3	7.36	1.3	6.17	1.3
Biotite	1.24	1.1	18.20	51.1	1.92	1.3
Dolomite	7.77	46.9	9.50	19.1	3.08	37.5
Fluorite	0.86	0.5	0.23	0.4	0.77	0.8
Pyrite	0.17	1.1	0.66	1.6	0.36	1.3
Quartz	0.38	1.0	1.02	1.2	0.18	1.2
Orthoclase	0.12	5.5	0.11	5.9	1.08	5.7
Calcite	0.06	---	2.68	2.5	0.05	---
Chlorite	0.12	---	0.13	1.2	0.27	---
Muscovite	0.02	---	0.02	---	0.01	---
Rutile	---	---	0.36	1.2	0.01	---
Hematite	0.18	1.4	0.01	---	0.68	1.4
Pyrochlore	0.10	---	0.01	---	0.03	---
Sphalerite	0.01	---	---	---	0.04	---
Galena	---	---	---	---	0.01	---
Pyrrhotite	---	---	---	---	0.07	---
Bastnasite-(Ce)	0.17	---	0.07	---	0.17	---
Parisite-(Ce)	1.03	0.4	0.06	---	0.15	---
Monazite- (Ce)	0.04	---	0.32	3.2	0.72	3.2
Rutile_Nb Nd	---	---	0.19	1.8	0.13	---

Further mineralogical analysis were performed by XRD and MLA (Table 4.6). However, the values for the different mineral proportions were very variable between the two methods, especially for dolomite, ankerite and apatite. Carbonate analysis (Figure 4.4) show that in fact ferro-dolomite is present with a variable Fe/Mg ratio (< 0.5) and that end-member ankerite is not present. In order to obtain more representative percentages of the different minerals present, a mineralogical reconciliation was performed based on chemical analysis (Tables 4.3 to 4.5) of the three units so that the chemical compositions obtain by XRF, ICP and S/C best reflect the percentages of minerals present. Since Fe/Mg ratio of ferro-dolomite is variable, end-members dolomite and ankerite were left for the proportion calculations. Mineralogical reconciliation values are more consistent with optical microscope observations (Table 4.7).

Table 4.7 : Mineralogical proportions of waste rocks used in this study after reconciliation. Chemical formula used for calculation of mineral percentages are presented.

Minerals	Chimical formula	Carbonatite WR	Fenite WR	Breccia WR
Ankerite	Ca(Fe,Mn)(CO ₃) ₂	21.00	22.00	30.00
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	0.24	2.00	0.50
Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F,Cl)	7.00	7.36	6.17
Biotite	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	4.00	15.00	1.92
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	60.00	46.00	49.00
Fluorite	CaF ₂	0.86	0.23	0.77
Pyrite	FeS ₂	0.17	0.66	0.80
Quartz	SiO ₂	0.38	2.00	2.00
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	0.12	0.11	1.08
Calcite	CaCO ₃	3.00	2.68	0.05
Chlorite	(Mg,Fe,Mn,Al) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆	0.12	0.13	0.27
Muscovite	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	0.02	0.02	0.02
Hematite	Fe ₂ O ₃	0.02	0.02	0.68
Pyrochlore	(Na,Ca) ₂ Nb ₂ O ₆ (OH,F)	0.10	0.02	0.03
Rutile	TiO ₂	0.02	0.36	0.02
Sphalerite	(Zn, Fe)S	0.02	---	0.04
Galena	PbS	---	---	0.06
Pyrrhotite	Fe _(1-x) S	---	---	0.10
Bastnasite-(Ce)	Ce(CO ₃)F	0.17	0.07	0.17
Parisite-(Ce)	Ca(Ce.La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂	1.50	0.06	0.15
Monazite-(Ce)	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄	0.04	0.32	0.72
Rutile_Nb Nd	(Nb, Nd) TiO ₂	---	0.19	0.13
Total Fe-MgCarbonates		81.00	68.00	79.00
Total Sulphides		0.19	0.66	1.00

This mineralogical reconciliation shows that dolomite is particularly abundant in all lithologies which is reflected in the number of analysis in figure 4.4. These carbonates control a significant part of the chemical composition of the waste rocks, especially the high concentrations of CaO, MgO, Fe₂O₃, L.O.I. and C_{total}. There is also a high percentage of biotite in the fenite WR which is to be expected as it exhibits higher silica and potassium content. The carbonatite WR, on the other hand, is characterized by a more carbonate-rich mineralogy, and relatively poor in silicates such as muscovite and albite. The breccia WR, although also dominated by carbonates, is distinguished by the diversity of its accessory minerals present such as quartz, orthoclase, pyrite and hematite. Barium minerals were not observed in the three sterile units despite the fact that barite and bafertisite are common accessory minerals at Ashram (Mitchell and Smith, 2017). Phlogopite at Ashram contains between 1 and 5% weight BaO (Mitchell and Smith, 2017) and therefore biotite in waste rocks may contain the majority of barium. This is supported by the proportional relationship between the barium concentration and the biotite content of the waste rock samples. Also, no strontium carbonates were observed at Ashram, where strontium appears to be found largely in dolomites (< 1% wt% SrO) and fluorites (< 0.27% SrO) (Mitchell and Smith, 2017). This could also be the case in waste rocks.

Finally, REE carrying phases were identified in low proportions in all facies (< 2%). Observations made on waste rocks have shown that in the carbonatite WR, the majority of REEs are mainly concentrated in REE carbonates (bastnaesite and parisite), whereas in the breccia WR and the fenite WR, REEs are mainly carried by monazite. This is especially true for light REEs such as La and Ce (Figure 4.6). Nd is found mainly in monazite, while heavy REE and Y are found mainly in columbite (Figure 4.6). The distribution of REEs in of the different mineralized zones at Ashram show different mineral associations as LREE are mostly found in monazite except for the BD zone where they are mostly found in bastnäsite (Mitchell and Smith, 2017; Beland and Williams, 2021b). HREE and Y are found mostly in xenotime whereas in the BD zone, they are found in xenotime and fluorapatite.

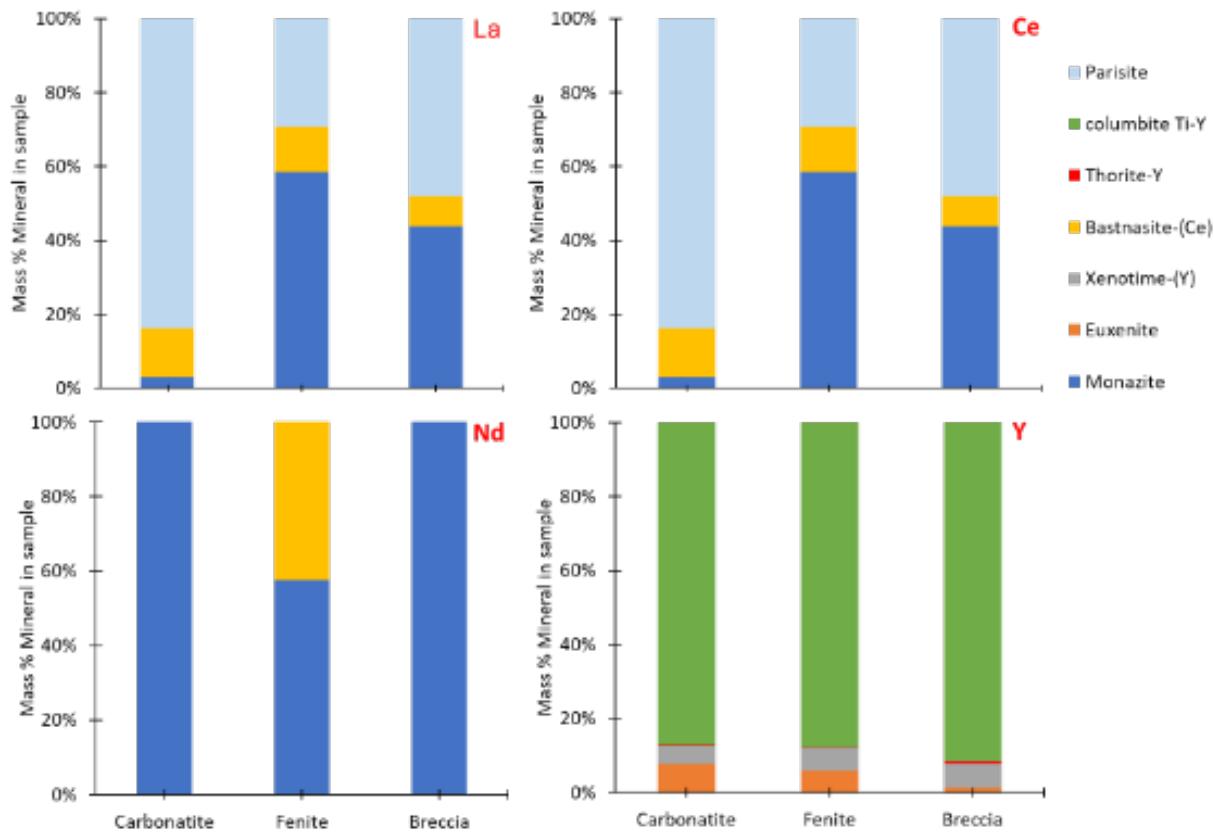


Figure 4.6 : Distribution of REEs in carrier minerals from the waste rocks.

4.4.4 Laboratory Column Kinetic Testing

The geochemical study of the waste rocks of the Ashram Deposit was carried out using kinetic laboratory column tests. The changes in pH, conductivity (EC), Eh and alkalinity are shown in Figure 4.7. The pH is generally stable and alkaline (between 8.0 and 8.5) for all lithologies (Figure 4.7a). This stability is indicative of the strong buffering capacity of the system, linked to the strong presence of carbonate minerals (ankerite and dolomite). The water cycles and the drop in temperature to 4°C did not significantly affect this stability. A gradual drop in conductivity (from 1400 to 300-400 µS/cm) indicates a greater initial release of dissolved ions, followed by stabilization (Figure 4.7b). The highest initial values are observed for the fenite WR, due to the dissolution of soluble minerals (carbonates and micas); fenite WR also leached potassium, aluminium and silica. The carbonatite WR and the fenite WR have the lowest conductivities. This trend confirms a mineral alterability that varies according to the lithologies. The redox potential remains in an oxidizing range and very similar for the three lithologies (400-700 mV). Peaks of Eh are observed at the beginning of the experiment, reflecting a well-oxygenated environment typical

of these tests (Bouzahzah *et al.*, 2014; MEND, 2009) (Figure 4.7c). The initial high alkalinity (up to 350 mg/L CaCO₃) drops rapidly to stabilize around 100-150 mg/L in all lithologies (Figure 4.7d). The breccia WR has the highest values at the beginning of the test but after approximately 100 days the values are like the other waste rocks. Variations in the water regime cause a slight variation in conductivity, Eh and alkalinity, and refrigeration of the columns at 4°C leads to a decrease in the latter.

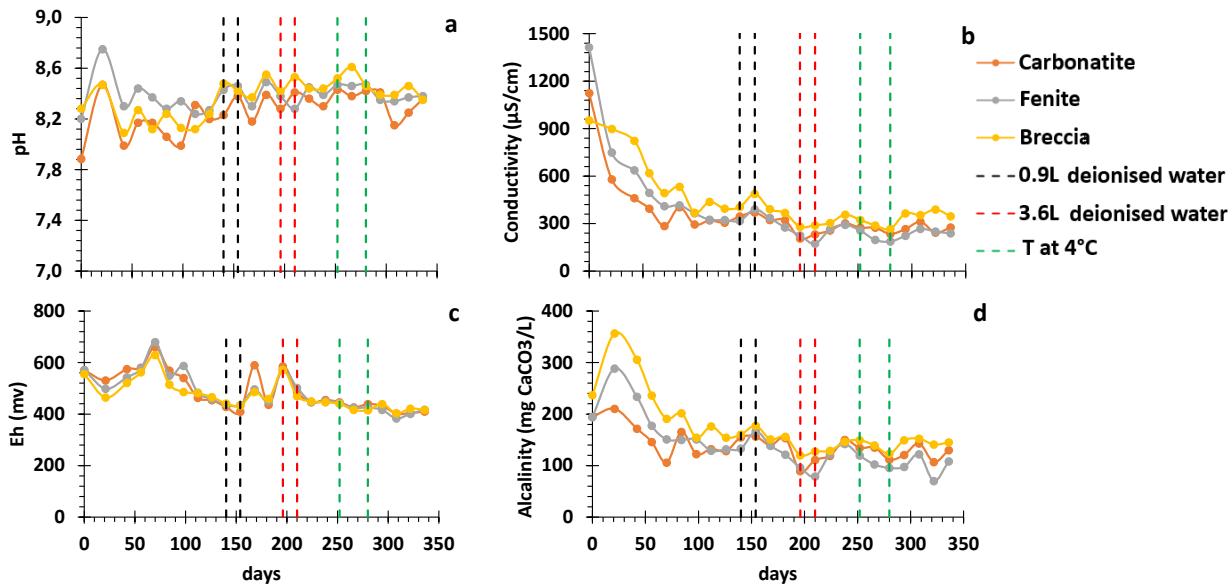


Figure 4.7 : Evolution of pH (a), conductivity (b), redox potential (c) and alkalinity (d) for the three waste rock lithologies.

The changes in the concentration of anions and metals in the leachate during the tests are shown in Figures 4.8a to 4.8m and show some variation according to the lithology. Sulfates and fluorides are trending downward in all lithologies (Figures 4.8a and b). Leachates of the breccia WR for sulfates show the highest values. The reason may be that this lithology contains more sulfides compared to the fenite WR and the carbonatite WR. At the beginning of the rinses, there is a gradual decrease in the sulfates in the leachate for all lithologies. This can be explained by the phenomenon called the "first flush effect" (Maest and Nordstrom, 2017; Nordstrom, 2009). A very rapid reactivity of the finest particles combined with the dissolution of the soluble species initially present on the surface of the material and the passivation of sulfides during the first rinses could explain this trend. Although fluorides do not exhibit the "first flush effect" to the same extent as sulfates, their concentrations gradually decrease until the end of the tests.

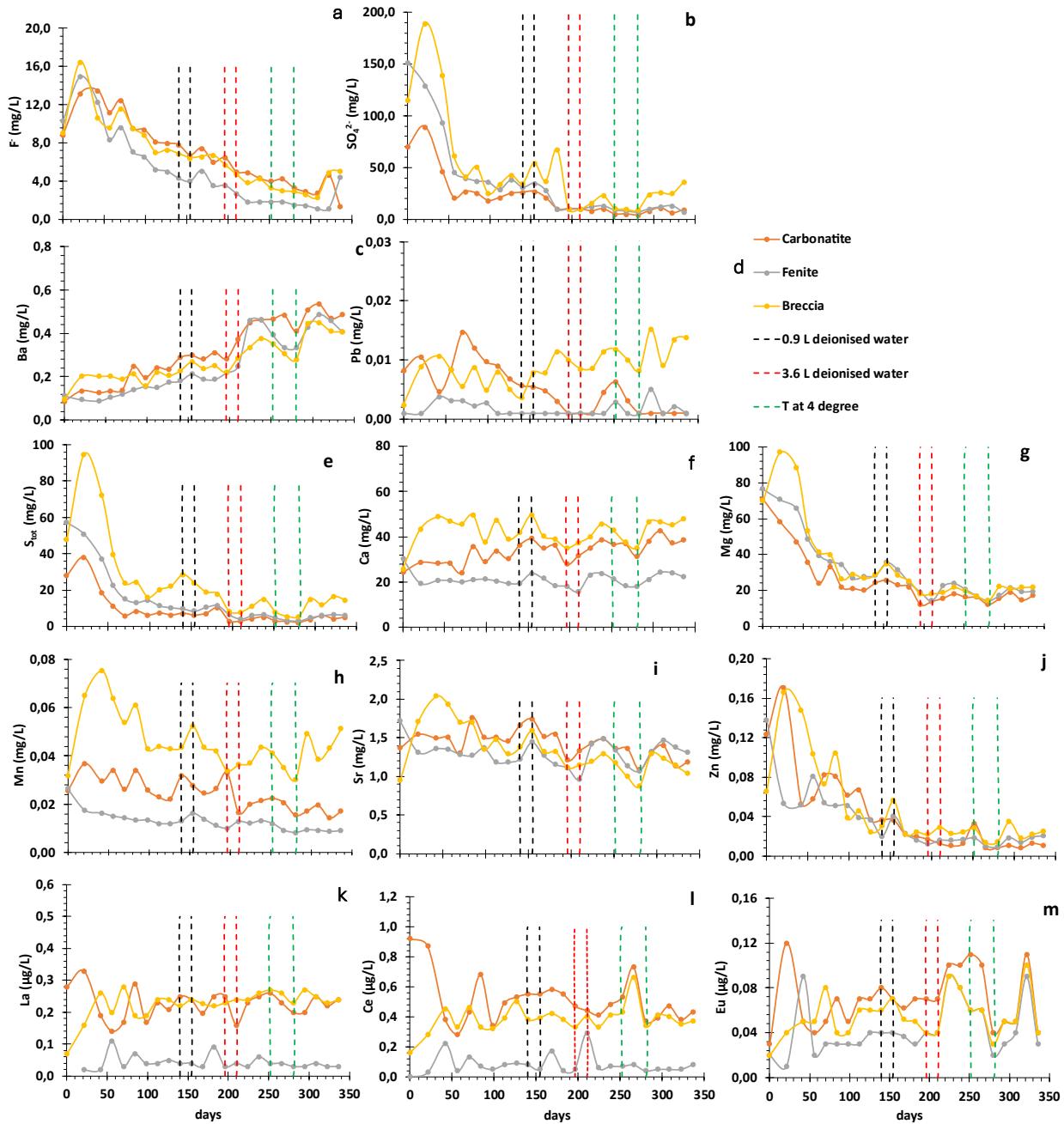


Figure 4.8 : Evolution of the concentration of anions and dissolved metals for the three main waste rock lithologies : fluorides (a), sulphates (b), Ba (c), Pb (d), Stotal (e), Ca (f), Mg (g), Mn (h), Sr (i), Zn (j), La (k), Ce (l), Eu (m).

Some metals such as iron, thorium, uranium, and some REEs are below the method's detection limit (MDL) and are therefore not presented here. Although present in appreciable quantities in the chemical analysis of solid samples, the solubility of iron is low at these pH conditions (Aubertin *et*

al., 2002). Most metals show a downward trend in all lithologies except barium (Figure 4.8c). Mineralogical analyses did not identify the mineral carrying Ba. However, the latter could be a substitute for magnesium and iron in the biotite as is the case in the mineralization at Ashram (Mitchell and Smith, 2017). This could explain why Ba increases in leachate, while Sr, which is chemically similar to barium but appears to reside in dolomite instead, shows a small decrease in leachate (Figure 4.8i). Taking into account the hypothesis that Ba can substitute for Fe and Mg in biotite. fenite being the most biotite-rich lithology, should leach more Ba than the others. This is not the case in this study. However, the mineral biotite carrying Ba can be included in the fenite minerals and therefore will not be free to be leached easily. From 205 days onwards, the fenite had begun to leach more Ba, Mg and Sr (Figure 4.8c. g and i) than the other lithologies. The reason could be that the minerals carrying these elements were not accessible to be leached at the beginning of the rinses. The breccia WR leachates also show the highest values of lead (Figure 4.8d) because galena is more important in the breccia WR. Sulfur concentrations are similar to sulfates (Figure 4.8b) and are higher in the breccia WR leachate (Figure 4.8e). Since sulfide oxidation causes carbonate leaching, this may be the reason why more Ca, Mg, and Mn are leached into the breccia WR (Figures 4.8f, g, and h). Breccia WR is the lithology that leaches the most concentrations of Zn (Figure 4.8j). Table 4.8 shows the limits in Directive 019 for certain elements. All of these elements are below the limit of Directive 019 in the samples in this study.

Table 4.8 : Final effluent discharge point requirements of directive 019 of some elements (Ministry of the Environment, the Fight Against Climate Change, Wildlife and Parks (MELCCFP), 2025).

Parameter	Maximum monthly average concentration	Maximum daily concentration
Arsenic extractible	0,1 mg/l	0,2 mg/l
Copper extractible	0,1 mg/l	0,2 mg/l
Iron extractible	3 mg/l	6 mg/l
Nickel extractible	0,25 mg/l	0,5 mg/l
Lead extractible	0,08 mg/l	0,16 mg/l
Zinc extractible	0,4 mg/l	0,8 mg/l
Radium 226	0,37 Bq/l	1,11 Bq/l

The evolution of the more common REEs in the leachates is shown in Figures 4.8k through 4.8m. The fenite WR represents the lithology that leaches the least REE. Although having the lowest content of REEs, the majority of REEs are carried by monazite in place of REE-fluorocarbonates (bastnaesite and parisite) which are more soluble than phosphates (Blowes *et al.*, 1994)

(Figure 4.6). The breccia WR, as well as the fenite WR, have the majority of these REEs concentrated in monazite (Figure 4.6). All these factors may explain why less REEs are leached in the breccia WR, despite the fact that it is the lithology most enriched in REEs. Carbonatite WR, although poorer in REEs compared to the breccia WR, leaches more REEs. The reason may be due to the fact that the carbonatite WR carries the majority of its REE deportment in fluorocarbonate minerals (Figure 4.6).

The geochemical study of the leachates shows that the waste rock samples from the Ashram Deposit are slightly sensitive to changes in water and temperature regime. A reduction in the amount of deionized water by half leads to an increase in the concentration of metals in the leachate. Conversely, doubling the quantity of water and refrigeration of the columns at 4°C leads to a decrease in the concentration of metals in the leachates.

Figure 4.9a shows the oxidation-neutralization curve of the three waste rock lithologies and Figure 4.9b gives the extrapolation using the equations on the right of the curves in Figure 4.9a. The extrapolation curve makes it possible to predict whether a material is potentially acid-generating (Benzaazoua *et al.*, 2004; Bussière and Guittonny, 2021). In this study, the points constituting the initial quantities of sulfur and Ca+Mg+Mn of the three lithologies are well above the oxidation-neutralization lines, suggesting that the waste rocks of the Ashram Deposit are not potentially acid-generating (NPGA) which is expected considering the percentages of carbonates and sulfides contained in these rocks. These results are also consistent with the studies of Gagnon *et al.* (2015) on the acid-generating potential of mine waste from the Ashram Deposit, and with the work done by other researchers such as Verplanck *et al.*, (2010), Vans Gossen *et al.* (2017) and Edahbi *et al.* (2018) on other REE deposits associated with carbonatites.

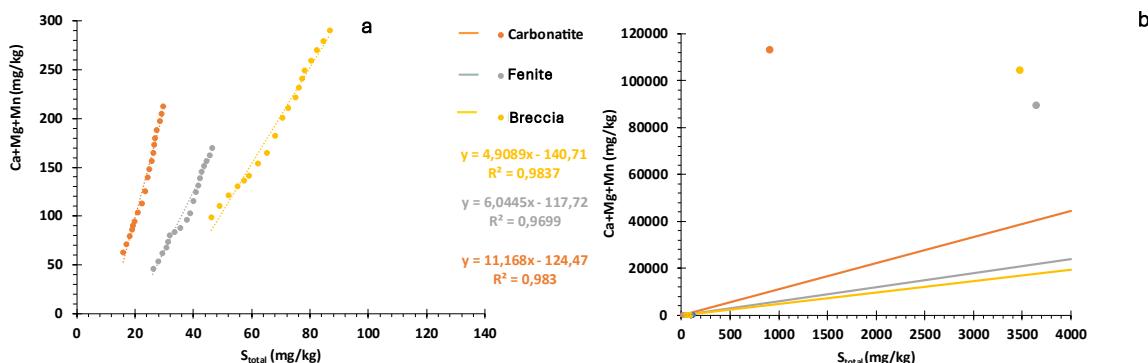


Figure 4.9 : Oxidation-neutralization curves of the three waste rock lithologies.

4.4.5 Geochemical modeling with PHREEQC software

Thermodynamic equilibrium calculations on PHREEQC suggest that the solutions frequently reach saturation with respect to secondary phases such as fluorite (CaF_2), barite (BaSO_4), calcite (CaCO_3), cerussite (PbCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), magnesite (MgCO_3), strontianite (SrCO_3) and whiterite (BaCO_3) (Figure 4.10). These results suggest that secondary precipitation may exert control over the solution concentrations of several species. This saturation of carbonate phases seems to agree with the mineralogical composition of the samples, which are mainly composed of carbonate minerals. Speciation is practically similar for the three waste rocks. The saturation indices of several of these mineral phases are close to zero, while some phases are slightly more saturated (between 0 and 2), suggesting a state of equilibrium.

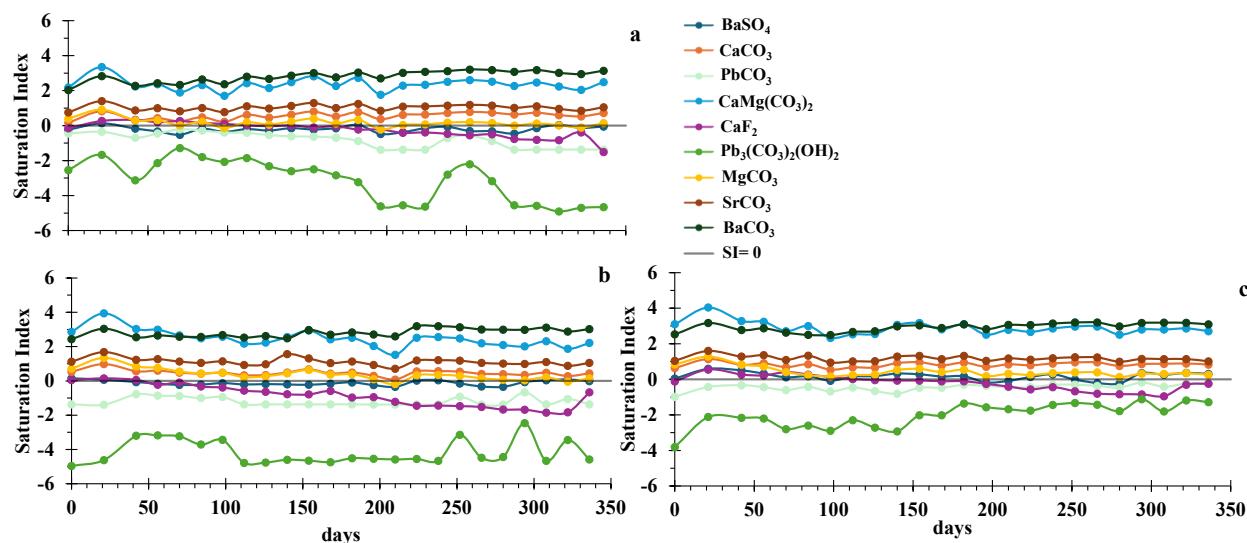


Figure 4.10 : Secondary minerals likely to be precipitated in the carbonatite WR (a), the fenite WR (b) and the breccia WR (c).

REE speciation calculations suggest that carbonate, hydroxide and fluorinated minerals are undersaturated in all leachates (Figure 4.11). As a result, the low concentrations of REE in leachate appear not to be due to secondary precipitation of REE minerals.

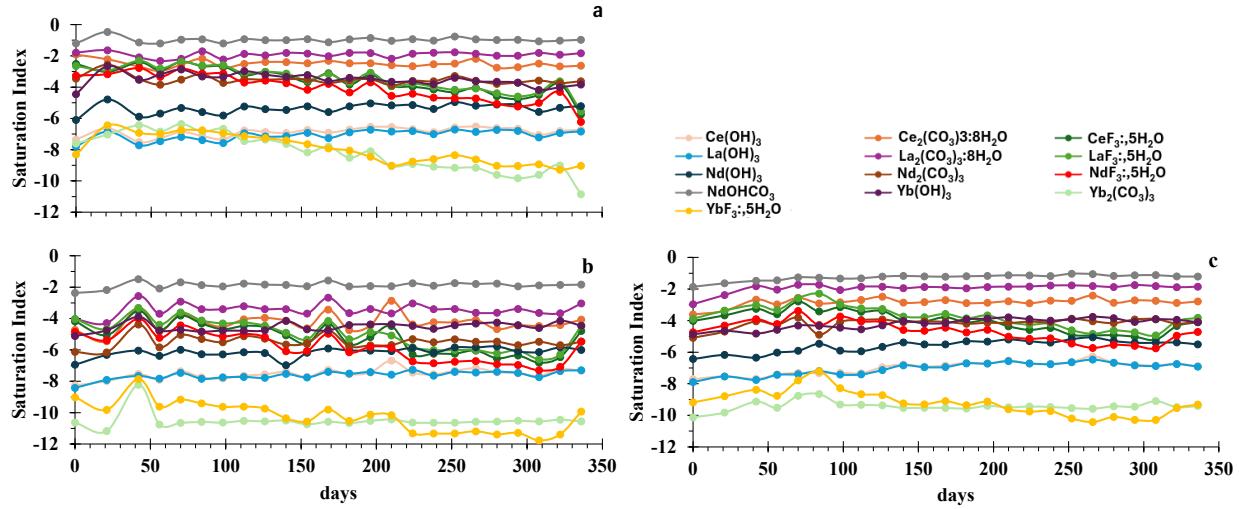


Figure 4.11: Saturation indices of rare earth minerals in the carbonatite WR (a), the fenite WR (b) and the breccia WR (c).

These results demonstrate that the geochemical behaviour of the waste rocks from the Ashram Deposit is similar for all lithologies, with marked stability and undersaturation of the REE phases. The influence of pH was evaluated in this study. Over a pH range of 6 to 9, the results suggest an undersaturation of REE minerals in all lithologies. The results of this study show the limited metal lixiviation associated with the future waste rocks and also indicate which metal should be more carefully monitored for the environmental protection of the area.

4.5 Conclusion

The results of this study demonstrate that the geochemical behaviour of waste rocks from the Ashram Deposit is strongly controlled by the lithological and mineralogical nature of the materials. The carbonatite WR is distinguished by a notable chemical stability, attributable to its richness in primary carbonate phases (ankerite, dolomite). Conversely, the breccia WR has a more significant initial release, particularly in LREE, fluorine and sulfur, showing greater geochemical reactivity despite a significant quantity of carbonates. The waste rocks of the Ashram Deposit have a low potential for contaminant generation. However, elements such as lead, fluorine, barium and zinc could potentially be leached and need to be further addressed, especially at more representative scales, for example via experimental field plots. The column leaching tests revealed a two-phase dynamic: a marked initial leaching, followed by a controlled stabilization of concentrations by

secondary precipitation phenomena for certain elements. Thermodynamic equilibrium calculations suggest a frequent saturation of solutions with respect to secondary minerals such as fluorite, barite, calcite, cerussite, dolomite, magnesite, strontianite and whiterite which play a key role in the regulation of dissolved element concentrations. They also suggest an undersaturation of the REE phases. This integrated approach, combining multi-scale characterizations and thermodynamic modeling, makes it possible to anticipate the risks of contaminated neutral drainage associated with certain waste rock lithologies. It provides essential data for the design of strategies for the differentiated management of mining materials with a view to sustainable development and the prevention of long-term environmental impacts.

Acknowledgments

The first author would like to thank the entire URSTM team, especially A. Perrault, J. Beauregard, R. Germain, J. Beaulieu and T. Gaxotte for technical assistance and for the realization of the tests, and A.S. Akué, director of the URSTM. The study was funded by NSERC-Alliance and Elements08 grants as well as the Institutional Chair for environmental chemistry of critical and strategic mineral resources of B. Plante.

References

- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. and Li, L. (2002). *Management of mining waste in the context of sustainable development and environmental protection*.
- Beland, C. M. J. and Williams-Jones, A. E. (2021a). The genesis of the Ashram REE deposit, Quebec: *Insights from bulk-rock geochemistry, apatite-monazite-bastnäsite replacement reactions and mineral chemistry*. *Chemical Geology*, 578, 120298. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120298>
- Beland, C. M. J. and Williams-Jones, A. E. (2021b). The mineralogical distribution of the REE in carbonatites: *A quantitative evaluation*. *Chemical Geology*, 585, 120558. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120558>
- Benzaazoua M, Bussière B, Dagenais AM, Archambault M (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environ Geol* 46(8):1086–1101.

- Blowes, D.W., and Ptacek, C.J. (1994). Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of sulfide Mine-Waste, Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 22, p.272-292*
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M. and Bussière, B. (2010). *A modified protocol of the ASTM normalized humidity cell test as laboratory weathering method of concentrator tailings.*
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussière, B. and Plante, B. (2014). Detailed literature review on static and kinetic tests as tools for predicting acid mine drainage. *Environnement, Ingénierie & Développement, N°66-mars 2014, 7824.* <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.340>
- Bussière, B.t and Guittonny, M. (2021). Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage (1st éd.). CRC Press. [1 online resource : illustrations (black and white)].<http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781351680752>
- Natural Resources Canada. (2022). Facts about rare earth elements. Natural Resources Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/donnees-statistiques-et-analyses-sur-lexploitation-miniere/faits-mineraux-metaux/faits-sur-les-elements-des-terres-rares/20631>
- Cassoff, J., Eng, P., Richard, P.-L., Geo, P., Larochelle, T., Eng, P., Zampini, J. et Eng, P. (2024). Mineral Resource Estimate for the Ashram Rare Earth Element and Fluorspar Deposit. *Technical Report.*
- Castor, S. B. and Hedrick, J. B. (2006). Rare Earth Elements. *Industrial Minerals and Rocks.*
- Clark, T. and Wares, R. (2006). Lithotectonic and metallogenic synthesis of the New Quebec Orogen (Labrador Trough). *Ministry of Natural Resources and Forests of Quebec. MM2005-01*
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Ratnayake, N. and Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): *Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. Ore Geology Reviews, 122, 103521.* <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- Edahbi, M., Plante, B., Benzaazoua, M., Kormos, L. and Pelletier, M. (2018). Rare Earth Elements (La, Ce, Pr, Nd, and Sm) from a Carbonatite Deposit: Mineralogical Characterization and Geochemical Behavior, 19. <https://doi.org/10.3390/min8020055>
- Gagnon, G., Rousseau, G., Camus, Y. and Gagné, J. (2015). Ashram Rare Earth Deposit For Commerce Resources Corp., 199.
- Lima, I. B. de and Leal Filho, W. (dir.). (2016). Rare earths industry: technological, economic, and environmental implications. Elsevier.

- Liu, S.-L., Fan, H.-R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A. R., Yann, L., Yang, K.-F. and Li, X.-C. (2023). Global rare earth elements projects: *New developments and supply chains*. *Ore Geology Reviews*, 157, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>
- Maest, A. S. and Nordstrom, D. K. (2017). A geochemical examination of humidity cell tests. *Applied Geochemistry*, 81, 109-131. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.016>
- MEND. (2009). Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulfidic Geology (Rapport n°1.20.1).
- Ministry of the Environment, the Fight Against Climate Change, Wildlife and Parks (MELCCFP). *Directive 019 on the mining industry 2025*.
- Mitchell, R. H. and Smith, D. L. (2017). Geology and mineralogy of the Ashram Zone carbonatite, Eldor Complex, Quebec. *Ore Geology Reviews*, 86, 784-806. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.004>
- Nordstrom, D. K. (2009). Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2-3), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.002>
- Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): *A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. <https://doi.org/10.3133/wri994259>
- Preinfalk, C. and Morteani, G. (1989). The Industrial Applications of Rare Earth Elements. *Dans P. Möller, P. Černý et F. Saupé (dir.), Lanthanides, Tantalum and Niobium* (p. 359-370). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87262-4_19
- Natural Resources Canada. (2024). Information on rare earth elements - Natural Resources Canada.
- Schulz, Klaus. J., DeYoung, J. H., Seal II, R. R. and Bradley, D. C. (2017). Critical Mineral Resources of the United States—*Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply* [Professional Paper].
- Smith, D., D'Souza, R. et Knox, A. W. (2008). Exploration of the Eldor Property, Northern Quebec. Assessment Report, 21 pages plus figures and appendices.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution: *an examination of the geochem. record preserved in sedimentary rocks*. Blackwell.
- Van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Seal II, R. R., Long, K. R. and Gambogi, J. (2017). Rare-Earth Elements [Professional Paper].
- Verplanck, P. L., Gosen, B. S., Seal, R. R. and McCafferty, A. E. (2010). A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion-Related Rare Earth Element Deposits [Scientific Investigations Report].

- Verplanck, P. L., Van Gosen, B. S., Seal, R. R. and McCafferty, A. E. (2014). A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion-Related Rare Earth Element Deposits (2010-5070) [Scientific Investigations Report]. 10.3133/sir20105070J
- Voncken, J. H. L. (2016). The Rare Earth Elements. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5>
- Wang, B., Pang, Y., Zhang, Y., Zhang, L., Ye, R., Yan, L., Li, Z. and Ren, A. (2021). Thorium and fetal neural tube defects: an epidemiological evidence from large case-control study. *Genes and Environment*, 43(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s41021-021-00227-w>
- Zarrouk, W. (2025). Le comportement géochimique et la valorisation potentielle des stériles du gisement Ashram (*UQAT*).
- Zhou, B., Li, Z. and Chen, C. (2017). Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 7(11), 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'ensemble des résultats qui ne sont pas présentés dans l'article sont discutés dans ce chapitre notamment l'échantillon lamprophyre RS*.

5.1 Caractérisations physiques, chimiques et minéralogiques

Des analyses physiques, chimiques et minéralogiques ont été effectué sur la lithologie dénommée lamprophyre RS* dans cette étude.

Les résultats des analyses physiques et chimiques effectuées sur le lamprophyre RS* sont renseignées dans le tableau 5.1. Les analyses XRF et S/C montrent que le lamprophyre RS* présentent des teneurs élevées en SiO₂ (20,9%), Al₂O₃ (7,69), Fe₂O₃ (10,0%), Na₂O (1,08%) et K₂O (2,82). Ces teneurs élevées en Ca, Fe, Mg Mn et Sr sont probablement dû à l'abondance des minéraux ferromagnésiens (ankérite, dolomite). On observe également des teneurs assez élevées en plomb (860 ppm) et en zinc (820 ppm) dans cette lithologie. Les teneurs élevées de ces deux éléments dans le lamprophyre RS* sont clairement liées à leur concentration dans le lamprophyre RS qui est beaucoup plus enrichi dans ces deux éléments que dans la carbonatite RS. Cependant, les autres éléments chalcophiles (Cu, Ni, Co, As, Bi, Mo) présentent généralement des valeurs très faibles. De plus, les concentrations de fluor sont très faibles. L'échantillon est également riche en LREE et en Y.

Tableau 5.1 : Caractérisations physiques et chimiques du lamprophyre RS* utilisé dans l'étude par XRF, S/C et ICP OES/MS.

Oxides (%)	Lamprophyre RS*	Éléments (ppm)	Lamprophyre RS*	Éléments (ppm)	Lamprophyre RS*
SiO ₂	20,9	La	710	Al	40000
Al ₂ O ₃	7,69	Ce	1600	As	21
Fe ₂ O ₃	10,0	Pr	200	Ba	3800
MgO	11,4	Nd	760	Be	23
CaO	17,6	Sm	110	Bi	0,51
Na ₂ O	1,08	Eu	30	Ca	120000
K ₂ O	2,82	Gd	87	Cd	3,0
TiO ₂	0,95	Tb	10	Co	28
P ₂ O ₅	1,27	Dy	43	Cr	27
MnO	0,61	Ho	7,1	Cu	47
L.O.I.	25,7	Er	18	Fe	66000
C _{total}	6,50	Tm	1,8	K	23000
S _{total}	0,397	Yb	10,3	Li	66
D10 (µm)	9,80	Lu	1,3	Mg	62000
D60 (µm)	627	Y	170	Mn	4500
D90 (µm)	1591	Σ LREE	3497	Mo	2,8
Specific density (Gs)	2,97	Σ HREE	262	Na	7900
		Σ ETR	3758	Ni	51
				Pb	860
				Se	4,3
				Sr	1900
				Ti	4300
				Zn	820
				F	60
				U	0,81
				Th	130

Les analyses minéralogiques des échantillons ont débuté par des observations de lames minces au microscope optique. Cette analyse a renseigné sur la présence des carbonates et des différents sulfures, mais également des minéraux silicatés en quantités appréciables tels que la biotite et les feldspaths. Le microscope optique ne permet pas d'identifier les différents carbonates mais a montré que tous les échantillons étaient principalement constitués de ceux-ci (Figure 5.1).

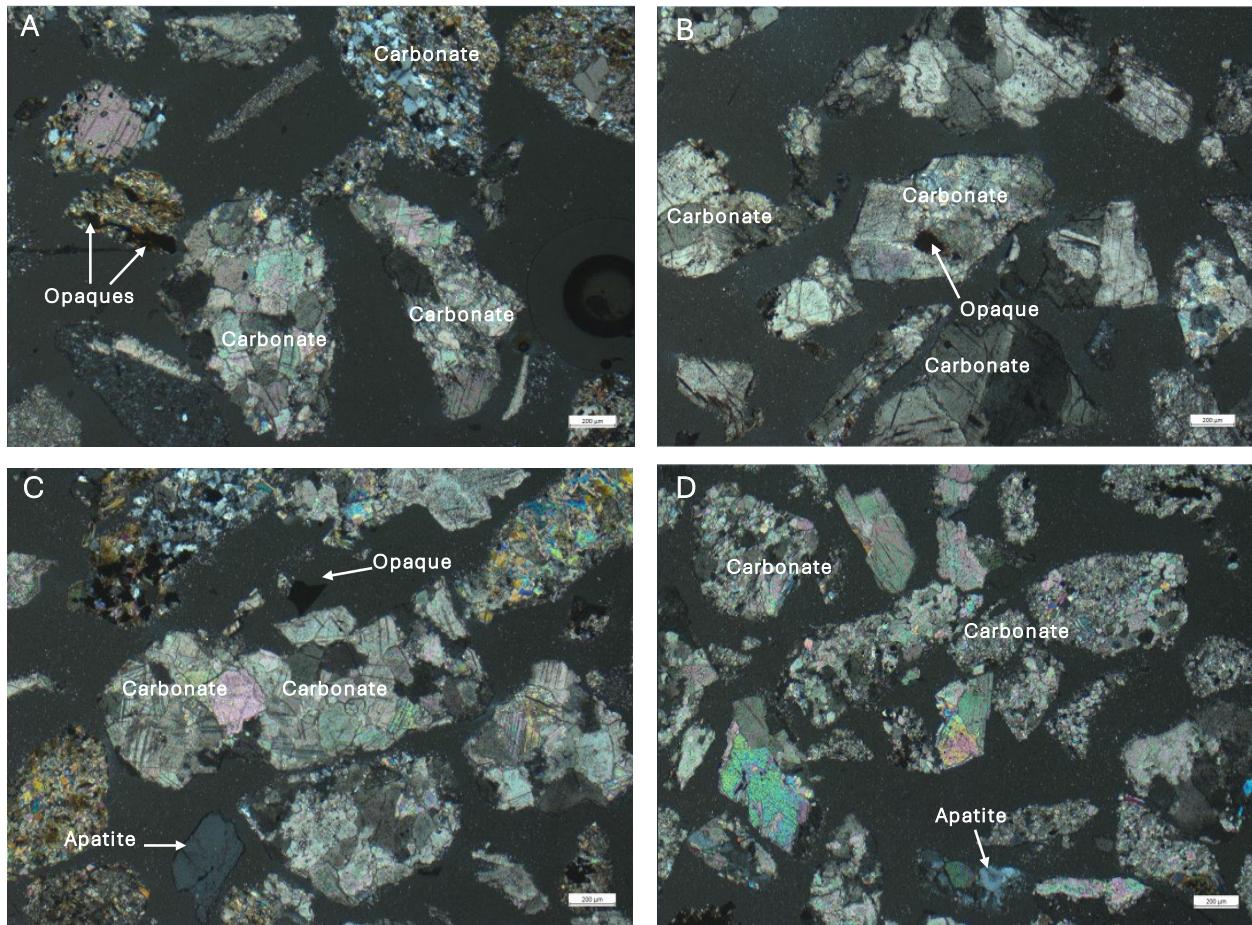


Figure 5.1 : Lames minces polies de lamprophyre RS* (A), de carbonatite RS (B), de fénite RS (C) et de brèche RS (D) observés au microscope optique.

La réconciliation minéralogique avec les analyses chimiques par XRF, et ICP montre que le magnésium était sous-estimé dans toutes les lithologies alors que le fer était surestimé par la méthode MLA (Figure A2 de l'annexe A). Cela est dû à une surestimation de l'ankérite et une sous-estimation de la dolomite par le MLA (Tableau 5.2). Cette estimation s'explique dans le diagramme ternaire des analyses de carbonates réalisé avec les résultats du MEB de table. Les observations montrent une grande variabilité de composition des carbonates (Figure 5.2) dont le pourcentage ne peut pas être bien évalué par le DRX ou le MLA (Tableau 5.2) qui assument des compositions homogènes pour l'interprétation des analyses. Cependant cette variation est moins marquée dans le lamprophyre RS* qui ne montrait que de la dolomite enrichie en fer (Figure 5.2).

Tableau 5.2 : Composition minéralogique en % du lamprophyre RS* par MLA et par DRX

Mineraux	MLA	DRX
Ankerite	49,49	34,3
Albite	9,41	4,5
Apatite	2,84	1,3
Biotite	21,2	2,1
Dolomite	2,02	33,1
Fluorite	1,97	2,8
Pyrite	0,74	1,5
Quartz	0,80	5,4
Orthoclase	1,35	5,2
Calcite	0,15	1,1
Chlorite	1,07	1,5
Muscovite	8,06	3,4
Rutile	0,06	---
Hématite	0,01	---
Pyrochlore	0,03	---
Sphalerite	0,04	---
Galène	0,02	---
Pyrrhotite	0,02	---
Bastnasite-(Ce)	0,11	3,4
Parisite-(Ce)	0,49	0,5
Monazite- (Ce)	0,01	---
Rutile_Nb Nd	0,02	---

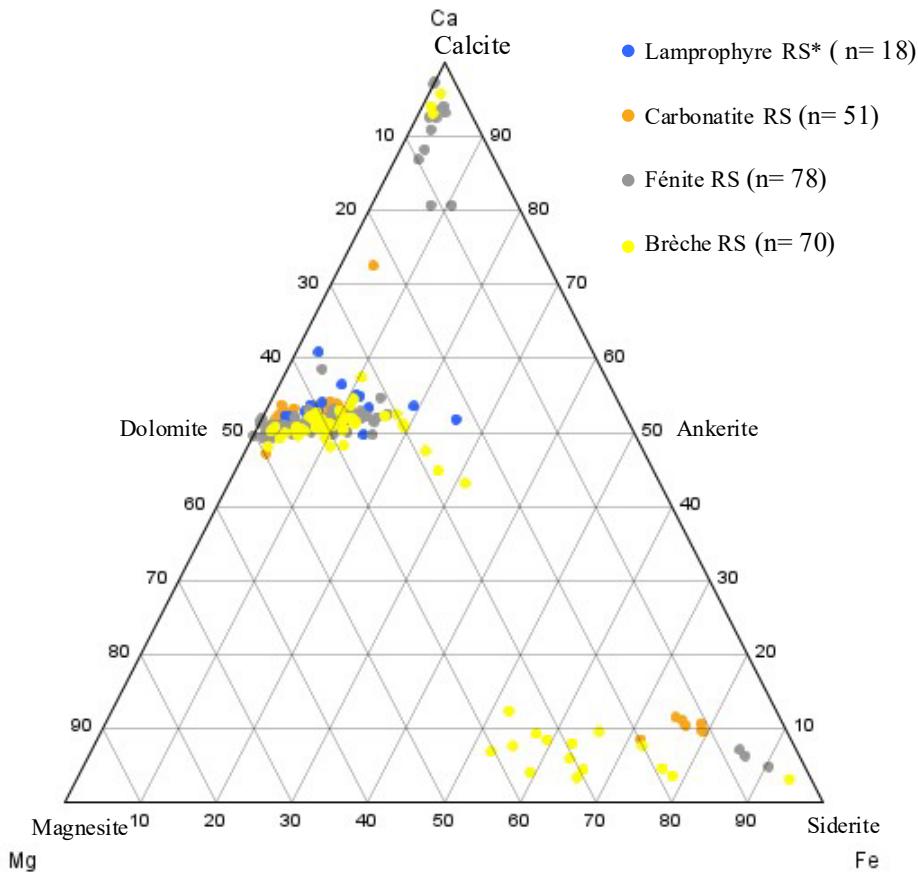


Figure 5.2 : Diagramme ternaire des carbonates issus de stériles analysés par MEB-EDS montrant la présence de plusieurs types de carbonates (n est le nombre d'analyses).

Des analyses au MEB ont également été faites sur le lamprophyre RS*. De la biotite et de l'albite ont été observées en quantités significatives dans celui-ci. Cependant, les carbonates dominent (ankérite, dolomie) (Tableau 5.3). D'autres minéraux tels que la fluorite et l'apatite ont été également observés (Figure 5.3A). Des minéraux accessoires sulfurés tel que la pyrrhotite, la sphalérite et la galène ont également été identifiés au MEB avec une association entre la galène et la pyrrhotite (Figure 5.3B). La pyrrhotite est incluse dans la galène et donc contrairement à l'échantillon de brèche RS, la galène est généralement exposée dans le lamprophyre RS*.

Tableau 5.3 : Composition minéralogique en % du lamprophyre RS* suite à une réconciliation minéralogique.

Minéraux	Formule chimique	Lamprophyre RS*
Ankerite	$\text{Ca}(\text{Fe}^{++} \cdot \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	30,00
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	11,00
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH} \cdot \text{F} \cdot \text{Cl})$	2,84
Biotite	$\text{K}(\text{Mg} \cdot \text{Fe}^{++})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH} \cdot \text{F})_2]$	20,00
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	21,00
Fluorite	CaF_2	1,97
Pyrite	FeS_2	0,72
Quartz	SiO_2	0,10
Orthoclase	KAlSi_3O_8	1,50
Calcite	CaCO_3	0,15
Chlorite	$(\text{Mg} \cdot \text{Fe}^{++} \cdot \text{Fe}^{+++} \cdot \text{Mn} \cdot \text{Al})_{12}$	1,07
	$[(\text{Si} \cdot \text{Al})_8 \text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$	
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH} \cdot \text{F})_2$	8,00
Hematite	Fe_2O_3	0,02
Pyrochlore	$(\text{Na} \cdot \text{Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH} \cdot \text{F})$	0,03
Rutile	TiO_2	0,50
Sphalerite	$(\text{Zn} \cdot \text{Fe})\text{S}$	0,04
Galena	PbS	0,08
Pyrrhotite	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	0,06
Bastnasite-(Ce)	$\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}$	0,11
Parisite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	0,49
Monazite- (Ce)	$(\text{Ce} \cdot \text{La} \cdot \text{Nd} \cdot \text{Th})\text{PO}_4$	0,02
Rutile_Nb Nd	$(\text{Nb} \cdot \text{Nd})\text{TiO}_2$	0,30
Carbonates		51,00
Fe-Mg total		
Sulfures total		0,90

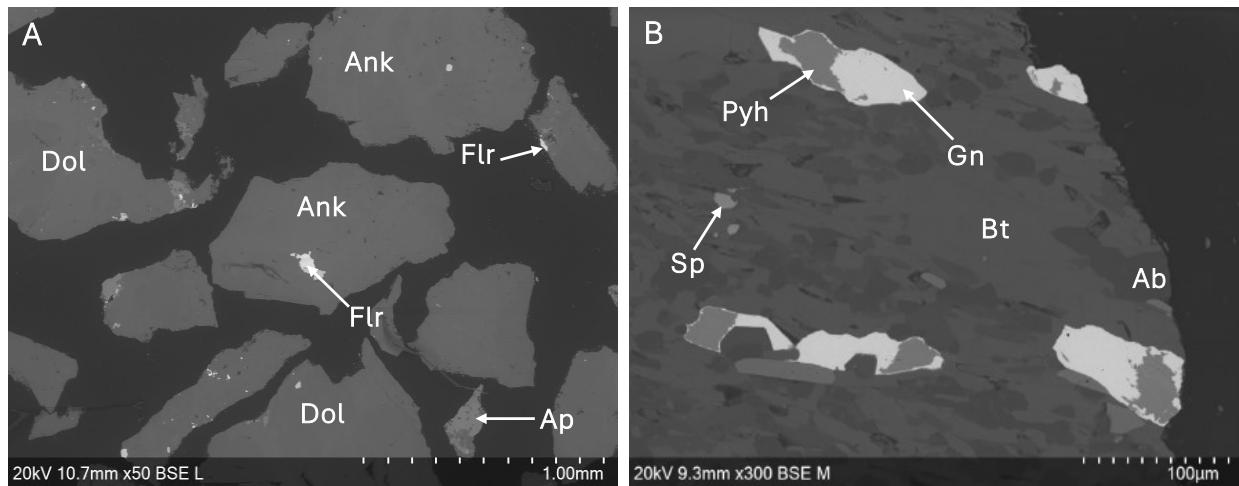


Figure 5.3 : Images de MEB-BSE d'un échantillon de lamprophyre RS* montrant la présence de fluorite (Flr) et d'apatite (Ap) parmi de grains de dolomite (Dol) et d'ankérite (Ank) (A) et l'association galène (Gn) et pyrrhotite (Pyh) (B). Ab = albite; Bt = biotite; Sp = sphalérite.

Dans le lamprophyre RS* comme dans la carbonatite RS, la majorité des LREE sont principalement concentrés dans la bastnaésite et la parisite, tandis que les HREE tels que l'yttrium se trouvent principalement dans la columbite (Figure 5.4).

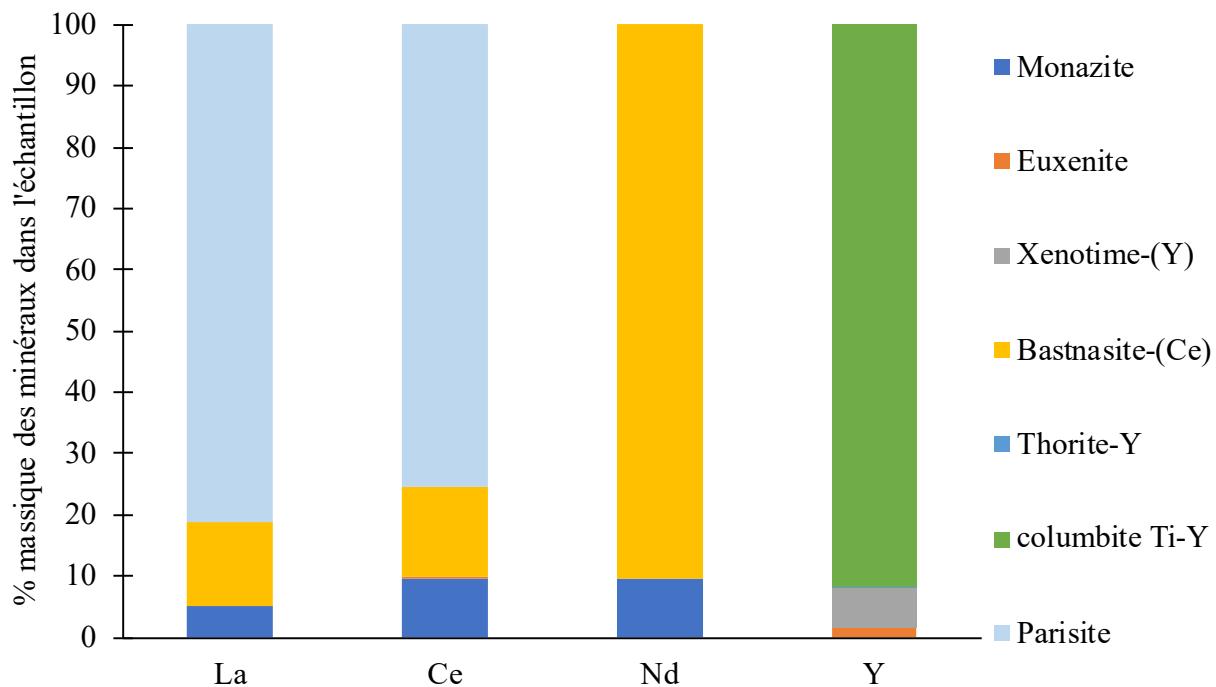


Figure 5.4 : Distribution des ETR dans les minéraux porteurs pour l'échantillon de lamprophyre RS*.

Des analyses au MEB ont également été faites sur le matériau post-démantèlement de la tranche 0-2 cm de la brèche RS et du lamprophyre RS*. L'objectif pour les analyses post démantèlement était de voir si une croûte d'oxyde s'est formée autour de la galène et/ou de la pyrrhotite afin de comprendre la raison de la lixiviation du plomb uniquement dans le lamprophyre RS* par rapport aux autres lithologues. Bien que la galène soit beaucoup plus exposée dans le lamprophyre RS* que dans la brèche, les résultats n'ont pas montré la présence d'oxydation autour de ces deux minéraux (Figure 5.5). L'essai n'ayant duré qu'un an, ce faible délai est possiblement la raison pour l'absence de croûte d'oxydation.

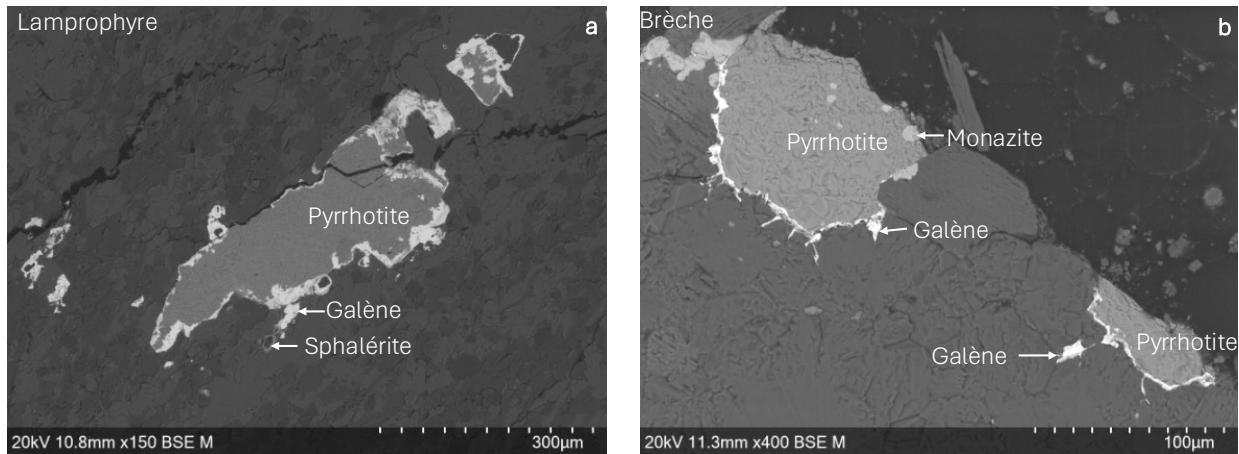


Figure 5.5 : Observation au MEB-EDS des échantillons post-démantèlements du lamprophyre RS* (a) et de la brèche RS (b).

5.2 Essai cinétique en colonne de laboratoire

Lors des essais de lixiviation, il fallait 4 à 5 jours pour que l'eau s'infiltre dans les colonnes car le matériel était fin (< 2 mm pour toutes les lithologies). Les particules fines tapissaient la base de la colonne et empêchaient le passage de l'eau au fil des rinçages. Une pompe a donc été utilisée pour faciliter l'infiltration de l'eau et réduire le temps d'infiltration à un jour.

Les variations de pH, de conductivité (CE), de potentiel redox (Eh) et d'alcalinité du lamprophyre RS* sont similaire à celles des trois autres lithologies étudiées dans ce projet (figure 5.6).

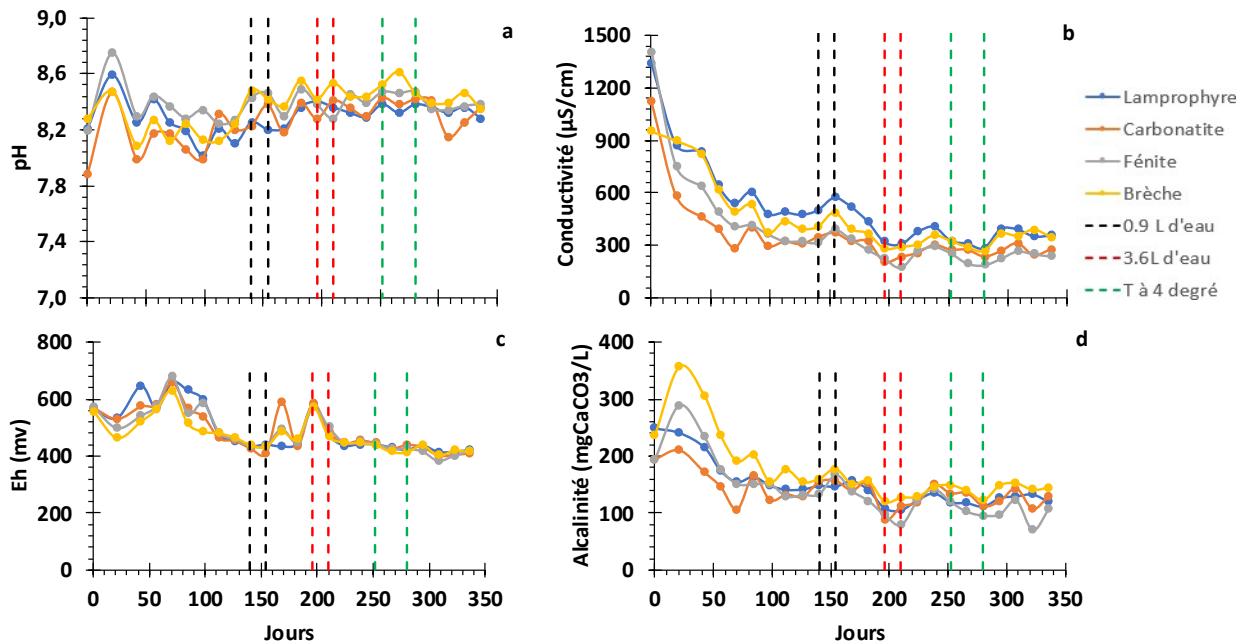


Figure 5.6 : Évolution du pH (a), de la conductivité (b), du potentiel redox (c) et de l'alcalinité (d) pour les quatre lithologies de stériles.

Les lixiviats de lamprophyre RS* montrent les valeurs les plus élevées en sulfates (Figure 5.7b). Ceci pourrait s'expliquer du fait que cette lithologie contient plus de sulfures par rapport aux autres lithologies. Dans le lamprophyre RS*, certains métaux tel que le fer, le thorium, l'uranium et certains ETR sont en-dessous de la limite de détection. La plupart des métaux présentent une tendance baissière (Figure 5.7) à l'exception du baryum et du plomb (Figures 5.7c et d). Cependant lorsque 3,5% de lamprophyres RS sont mélangés avec les autres lithologies (40% de carbonatite RS, 36,5% de fénite RS et 20% de brèches RS) (colonne mixte), les concentrations du baryum et de plomb dans les lixiviats sont beaucoup plus bas et varient entre 1 et 5 µg/L pour le plomb (Figure 5.7d) (Zarrouk, 2025). Le cas du plomb dans le lamprophyre RS* est complexe et sa concentration élevée dans le lixiviat par rapport aux trois autres lithologies peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, l'échantillon de lamprophyre RS* contient davantage de galène, le minéral porteur de plomb. La brèche RS contient une concentration en galène (0,06%) similaire à celle du lamprophyre RS* (0,08%), mais les teneurs de son lixiviat en plomb est beaucoup plus faible et stable que la tendance élevée et à la hausse de celui du lamprophyre RS* (Figure 5.7d). La seconde explication est que la galène et la pyrrhotite présentent des associations minérales différentes. Dans le lamprophyre RS* (Figure 5.3B), la pyrrhotite est généralement entourée de galène,

contrairement à la brèche RS où la galène est incluse dans la pyrrhotite et n'est donc pas exposée (Figure 4.5D). La galène est plus exposée dans le lamprophyre RS* que dans la brèche RS, et par conséquent plus facile à lessiver dans le premier. Cependant, le lamprophyre ne représente qu'une faible fraction des futurs résidus miniers. Bien que le lamprophyre RS* soit un mélange de lamprophyre RS et de carbonatite RS, le plomb provient surtout du lamprophyre RS d'après les teneurs en Pb de la base de données partagées par la compagnie et de la valeur de plomb de la carbonatite RS.

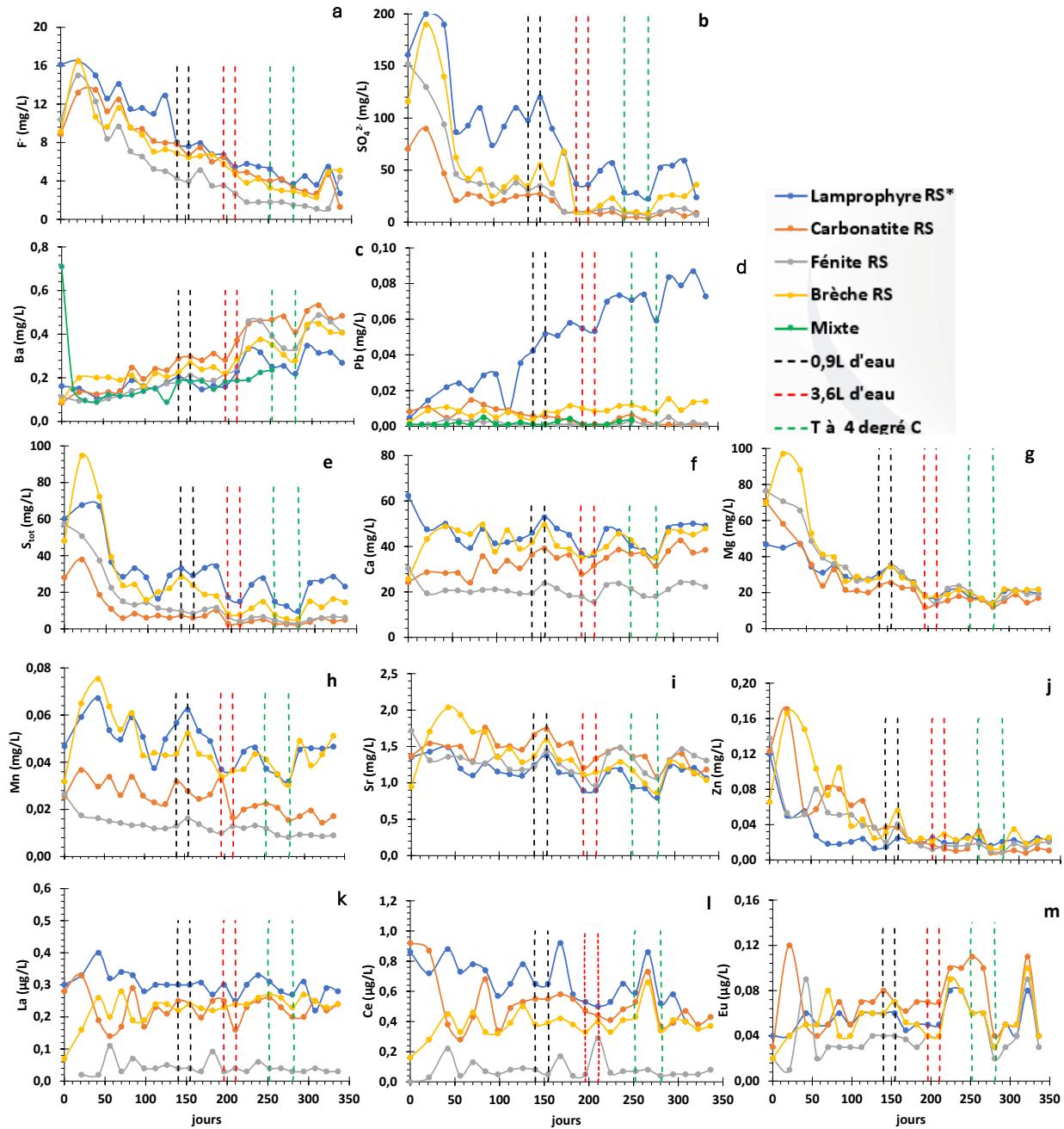


Figure 5.7 : Évolution de la concentration des anions et des métaux dissout pour les quatre lithologies : fluorures (a), sulfates (b), Ba (c), Pb (d), S total (e), Ca (f), Mg (g), Mn (h), Sr (i), Zn (j), La (k), Ce (l), Eu (m).

Au cours des 150 premiers jours, le lamprophyre RS* est la lithologie qui lessive les plus faibles concentrations de Zn (Figure 5.7j), bien qu'il présente les mêmes pourcentages de sphalérite que la

brèche RS. Cependant, il contient deux fois plus de zinc que la brèche RS; cette différence pourrait donc s'expliquer par la présence de zinc dans un autre minéral inconnu plus difficile à lessiver.

L'évolution des terres rares les plus courantes dans les lixiviat est illustrée par les figures 5.7k à 5.7m. Le lamprophyre RS* et la carbonatite RS, bien que plus pauvres en ETR que la brèche RS, les lessivent davantage. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que, dans le lamprophyre RS* et dans la carbonatite RS, la majeure partie des terres rares est contenue par des carbonates de terres rares (Figures 4.5 et 5.4). La lixiviation de la carbonatite devrait libérer davantage d'ETR que celle du lamprophyre RS*, car celle-ci contient plus de minéraux d'ETR. En effet, ceci pourrait être dû au fait que le lamprophyre RS* est plus riche en sulfures que la carbonatite RS et que l'oxydation des sulfures favorise la solubilité des carbonates.

Un calcul du poids cumulé des métaux lixiviés normalisé (par rapport à 10 kg la masse totale de matériau dans chaque colonne) sur la masse solide a été fait et les résultats sont présentés dans les figures 5.8 à 5.10. On constate une relation proportionnelle pour certains éléments entre leur degré de lixiviation élevé et leurs hautes concentrations dans le solide pour une lithologie donnée. C'est le cas du lithium pour la fénite RS, du potassium, du sodium et du plomb pour le lamprophyre RS* et autres. Par contre, pour certains éléments comme le zinc pour le lamprophyre RS*, Cu pour la brèche RS et la carbonatite RS, les teneurs dans ces lithologies sont plus élevées que dans les autres lithologies alors qu'ils sont moins lixiviés. Dans ces cas, c'est plutôt la distribution élémentaire de ces métaux qui dicte la susceptibilité des métaux à la lixiviation. L'analyse des résultats montre que les LREE sont plus lixiviés dans le lamprophyre RS* alors que les HREE le sont plus dans la carbonatite RS (Figure 5.10). Encore ici, c'est une question de distribution élémentaire et de susceptibilité variable des minéraux à la lixiviation; la monazite étant moins lixiviable que les carbonates d'ETR.

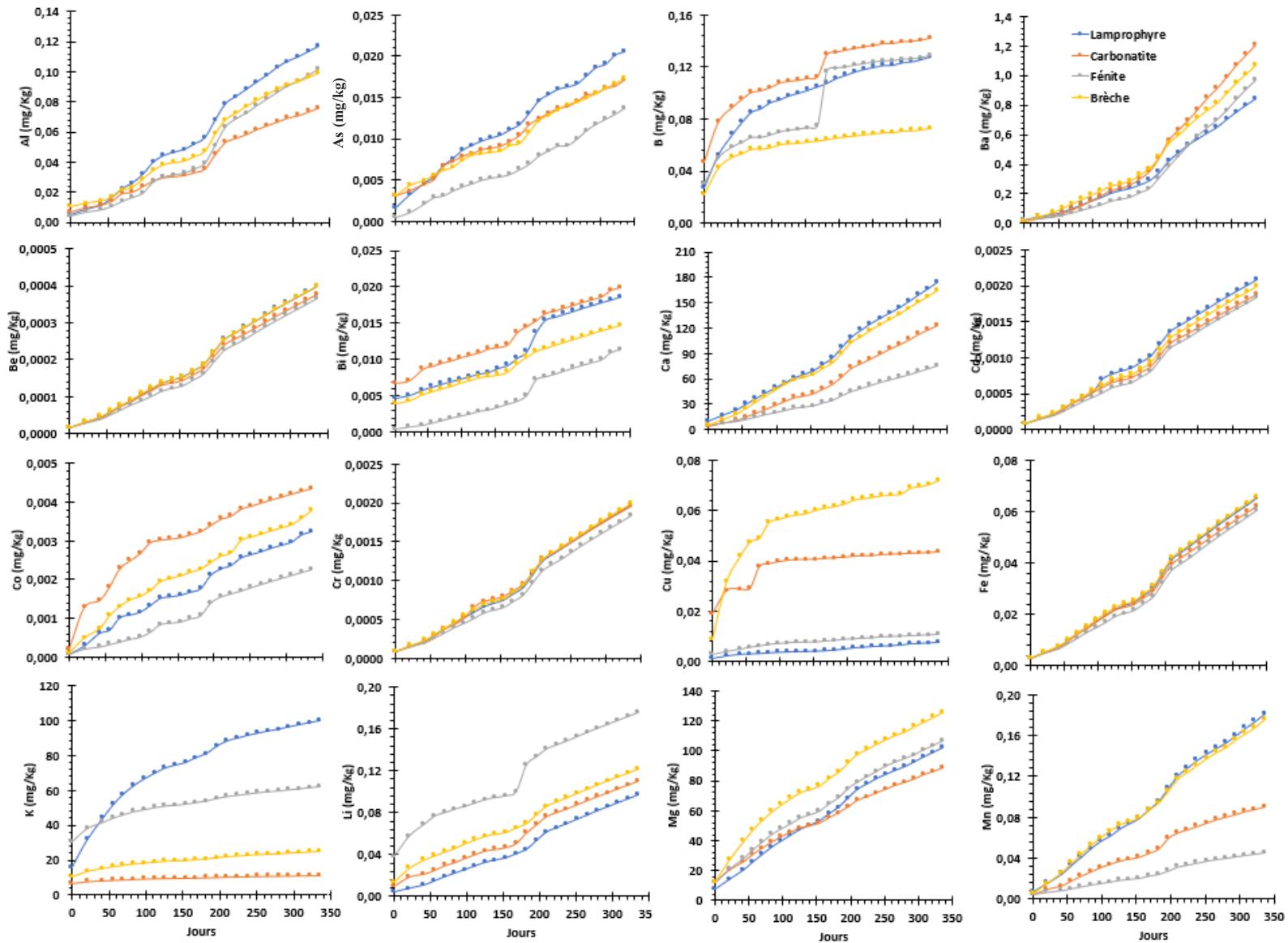


Figure 5.8 : Courbes cumulées normalisées des métaux dans les lixiviat des quatre lithologies.

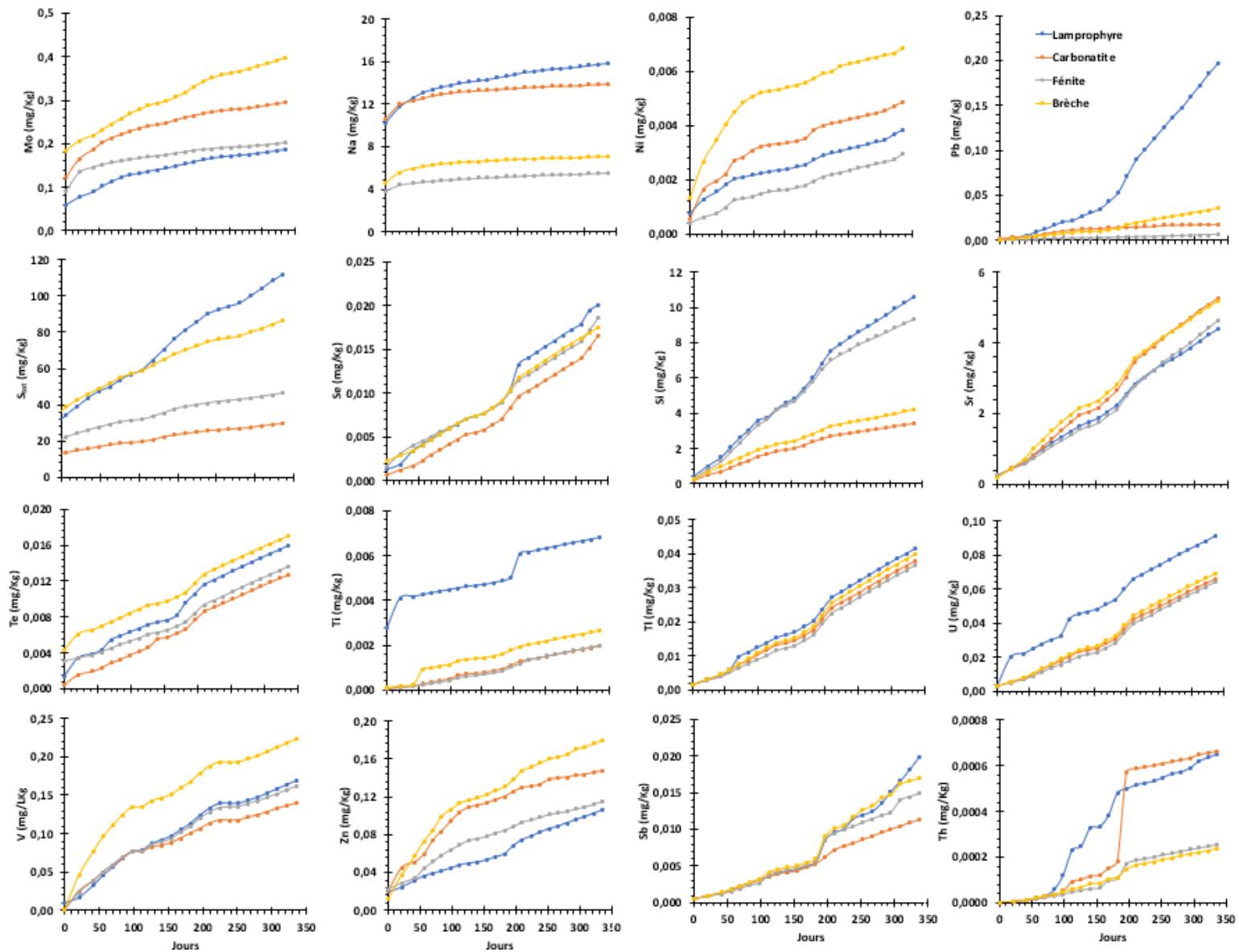


Figure 5.9 : Courbes cumulées normalisées des métaux dans les lixiviat des quatre lithologies (suite).

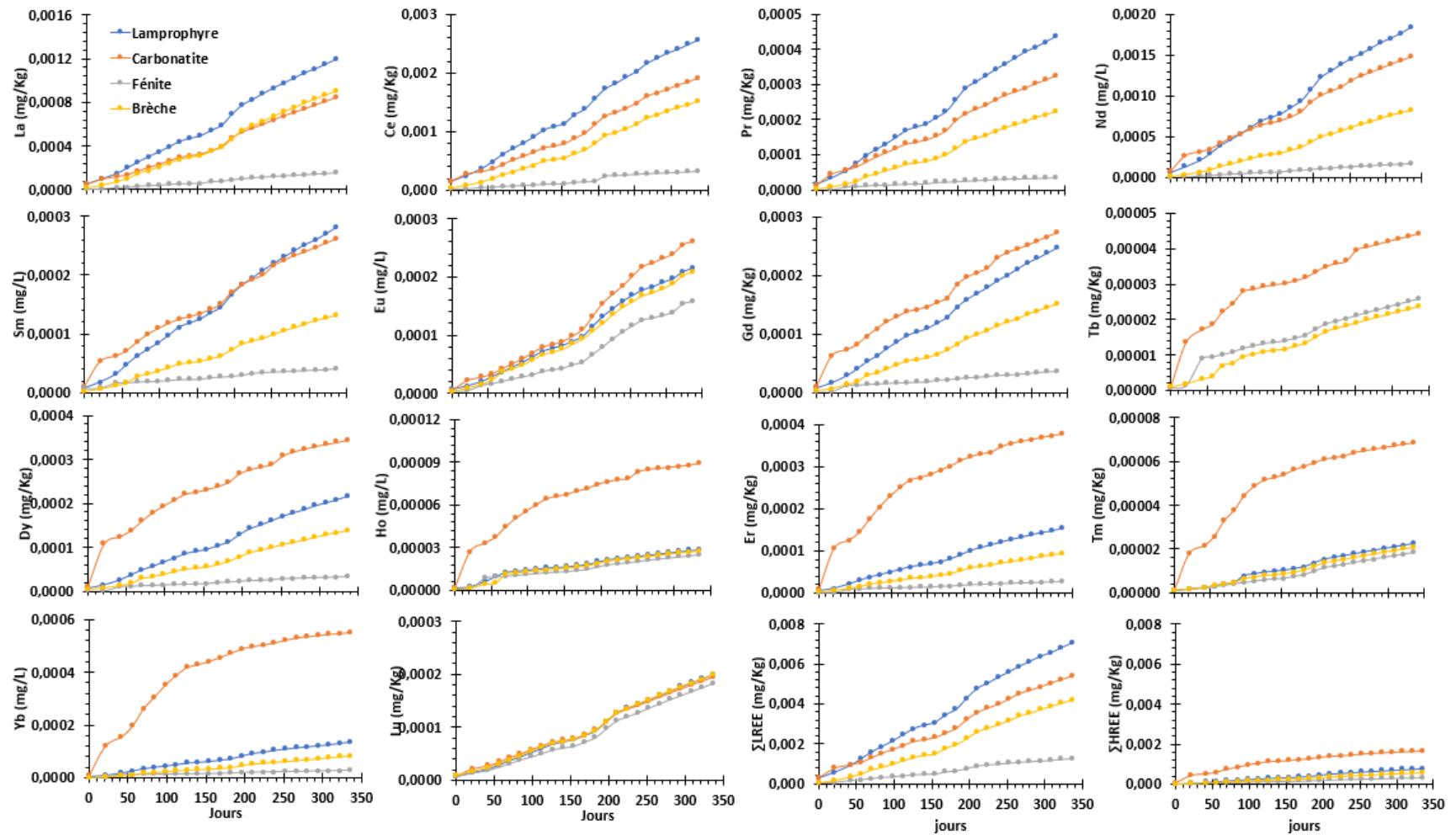


Figure 5.10 : Courbes cumulées normalisées des ETR dans les lixiviat des quatre lithologies.

Des courbes montrant l'épuisement du soufre présent dans les différentes lithologies versus celui de la somme du Ca+Mg+Mn sont présentées à la figure 5.11. Celles-ci montrent que les matériaux contiennent suffisant de carbonates pour neutraliser les sulfures.

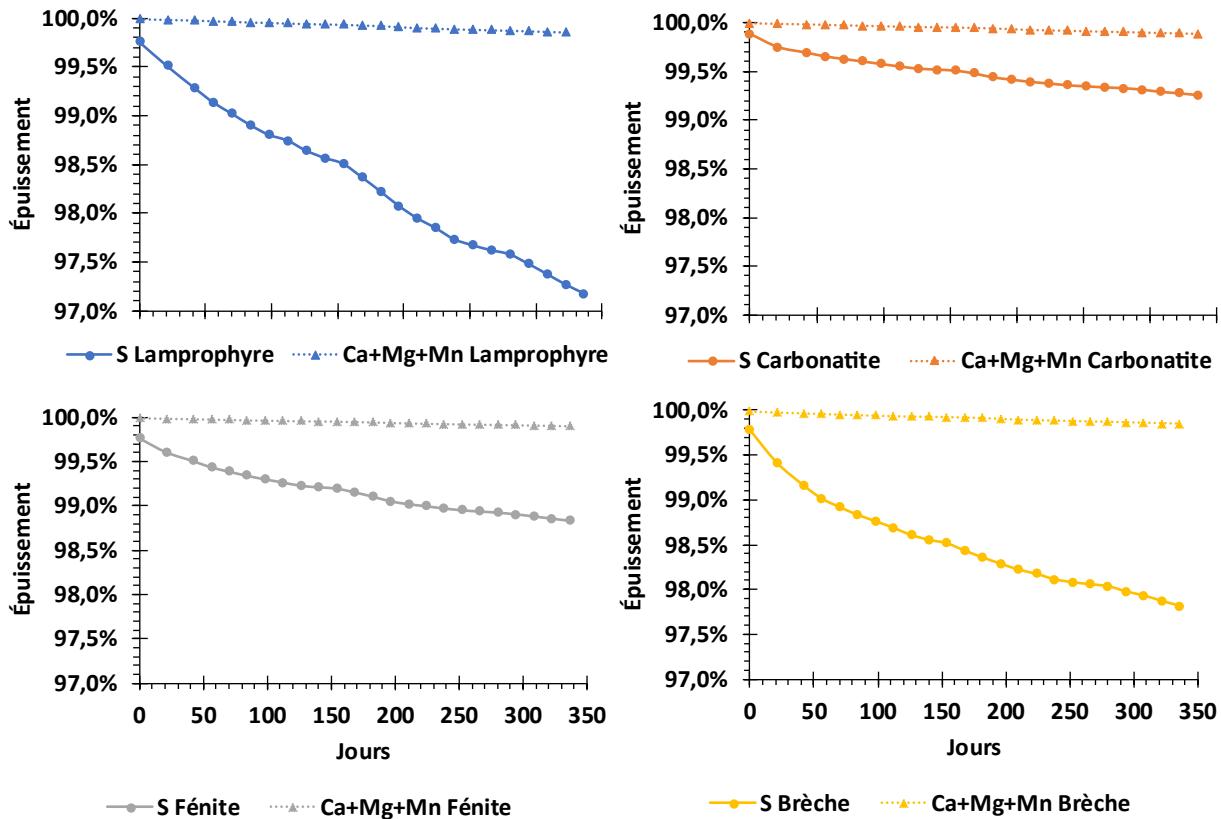


Figure 5.11 : Courbes d'épuisements du soufre et du Ca+Mg+Mn pour les quatre lithologies de stérile.

Une analyse des radionucléides a été faite sur les lixiviat des rinçages 1 à 6 et 10 à 15. Ces analyses ont nécessité une quantité d'eau de 3 L, et donc une combinaison de rinçages a dû être faite pour avoir le volume nécessaire. Les éléments visés étaient le ^{210}Pb , le ^{226}Ra , le ^{228}Th , le ^{230}Th et le ^{232}Th . Les résultats des analyses montrent des teneurs faibles, voire en dessous de la LMD (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Analyses des radionucléides

		Lamprophyre RS*	Carbonatite RS	Fénite RS	Brèche RS
^{210}Pb (Bq/L)	R1 à 6	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
	R10 à 15	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
^{226}Ra (Bq/L)	R1 à 6	0,01	0,01	0,05	0,13
	R10 à 15	0,01	0,007	0,04	0,1
^{228}Th (Bq/L)	R1 à 6	0,03	0,02	<0,01	0,04
	R10 à 15	0,03	0,11	0,01	0,08
^{230}Th (Bq/L)	R1 à 6	<0,01	0,01	<0,01	<0,01
	R10 à 15	0,05	<0,01	0,01	<0,01
^{232}Th (Bq/L)	R1 à 6	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	R10 à 15	0,03	0,08	0,01	0,04

5.3 Modélisation géochimique

Le calcul des équilibres thermodynamiques avec le logiciel PHREEQC 3.8.6-17100 en utilisant la base de données llnl.dat a permis de suivre la spéciation des ÉTR versus les variations de pH (de 6 à 9). Les résultats suggèrent une sous saturation des phases d'ÉTR pour toutes les valeurs de pH testées. On constate que l'indice de saturation des carbonates et hydroxydes d'ÉTR augmente avec le pH mais reste toujours en dessous de zéro pour les quatre lithologies (Figure 5.12). Cela peut être expliqué par le fait que les solides sont tous riches en carbonates.

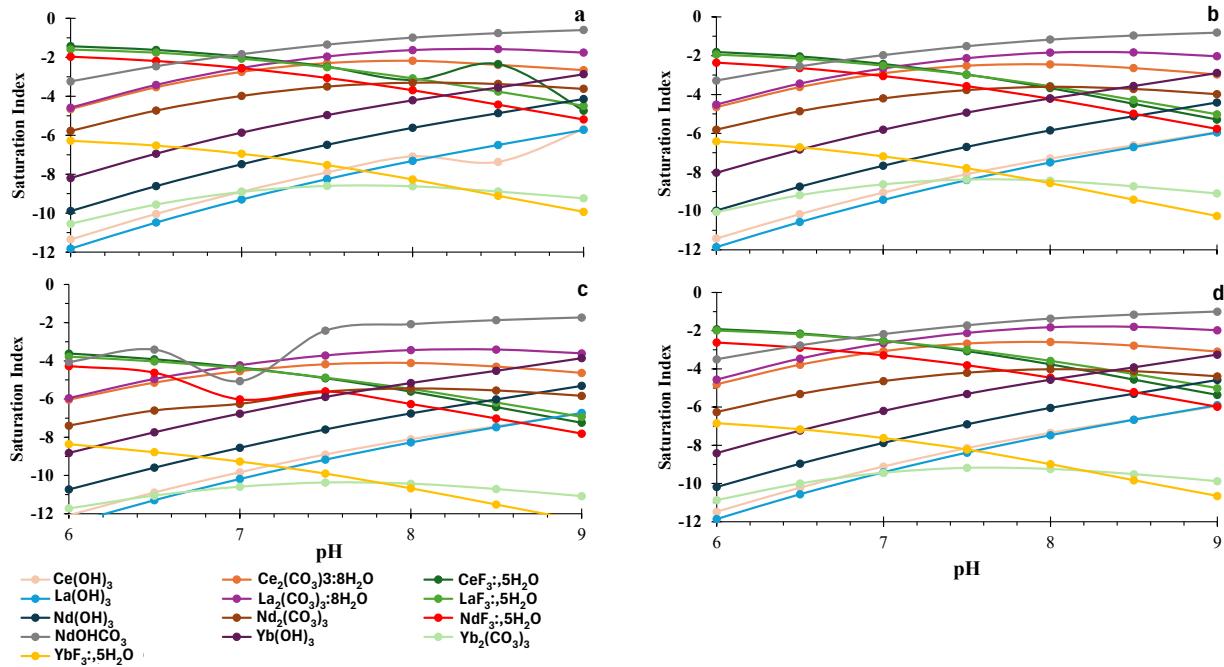


Figure 5.12 : Effet du pH sur la distribution des ÉTR du lamprophyre RS* (a), carbonatite RS (b), fénite RS (c) et brèche RS (d).

Dans l'intervalle de pH 6 à 7, peu d'ions CO_3^{2-} sont présents en solution pour favoriser la formation des carbonates (Figure 5.13). Ainsi, plus le pH augmente, plus CO_3^{2-} augmente, ce qui peut favoriser la formation des complexes carbonatés.

Pour les espèces fluorées, les résultats montrent que l'indice de saturation diminue avec l'augmentation du pH. À ces conditions de pH, la formation des ions OH^- et CO_3^{2-} est favorisée et ces derniers entrent en compétition avec les ions fluorures pour se complexer avec les métaux (ETR). La formation de complexes carbonatés et hydroxydés est favorisée à ce stade. Cependant vu le peu d'ions d'ETR en solution pour se complexer avec les ions fluorures, les indices de saturation des complexes fluorés diminuent. Cependant, aucune étude dans ce sens a été trouvée dans la littérature pour le cas des indices de saturation des fluorures d'ETR.

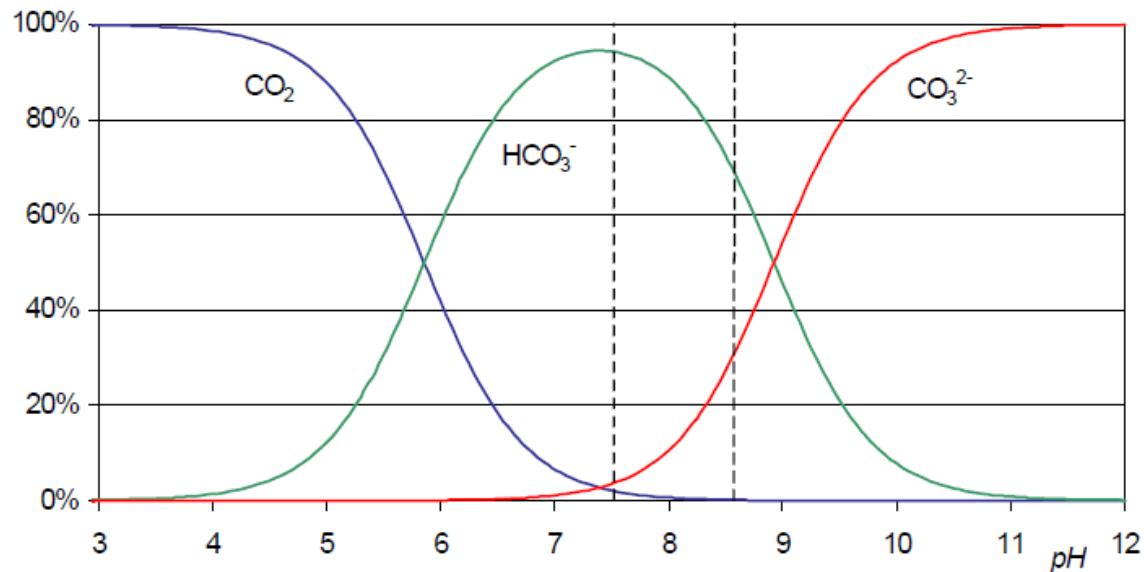


Figure 5.13 : Distribution des espèces carbonatées en solution (Zosel *et al.*, 2011)

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les éléments de terres rares (ETR) jouent un rôle central dans les technologies modernes, notamment dans les secteurs des énergies renouvelables, de l'électronique et de la défense. Toutefois, leur extraction et leur traitement présentent des défis environnementaux majeurs, encore insuffisamment étudiés. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette recherche, qui vise à mieux comprendre les impacts géoenvironnementaux des stériles qui seront issus de l'exploitation du gisement de carbonatite d'ETR d'Ashram. Cette étude fournit des données précieuses sur le comportement des stériles miniers associés aux gisements de carbonatites d'ETR, permettant ainsi une meilleure gestion environnementale des stériles miniers. En effet ce projet se distingue par sa rigueur méthodologique et son approche expérimentale à long terme. Peu d'études ont examiné l'évolution des lixiviat sur des stériles d'un gisement d'ETR pour une période aussi étendue (presque 12 mois pour un total de 24 rinçages), en intégrant des variations de conditions expérimentales telles que la température et le volume de rinçage.

Les travaux menés sur les futurs stériles ont montré un comportement géochimique contrôlé par la nature lithologique et minéralogique des matériaux. Les caractérisations chimiques et minéralogiques montrent que les stériles (lamprophyre RS*, carbonatite RS, fénite RS et brèche RS) sont majoritairement constitué de carbonates (ankérite et dolomite) avec une phase importante de biotite dans le lamprophyre RS* et la fénite RS. Des phases de fluorures et de minéraux phosphatés (apatite et monazite) sont également observées avec la présence accessoire de minéraux sulfureux. Les stériles du gisement d'Ashram sont NPGA et présentent un faible potentiel de génération de contaminants. Toutefois les éléments comme le plomb, le fluor, le baryum et le zinc doivent être étudiés davantage car ils sont en concentration non négligeable dans les lixiviat.

Les essais de lixiviation en colonnes ont mis en évidence une dynamique en deux phases : un lessivage initial marqué, suivi d'une stabilisation des concentrations contrôlée par des processus de précipitation secondaire. La modélisation par PHREEQC suggère une saturation fréquente des solutions vis-à-vis des minéraux secondaires tels que la fluorite, la baryte, la calcite, la cérusite, la dolomite, la magnésite, la strontianite et la whitérite qui jouent un rôle clé dans la régularisation des concentrations en éléments dissous.

Cette approche intégrée, combinant caractérisations multi-échelles et modélisation thermodynamique, permet d'anticiper les risques de drainage neutre contaminé (DNC) associés à certaines lithologies des stériles. Elle fournit des données essentielles à la conception de stratégies de gestion différenciée des matériaux miniers dans une optique de développement durable et de prévention des impacts environnementaux à long terme.

Pour finir, nous recommandons quelques travaux pour la suite du projet:

- Effectuer des essais à plus grande échelle sur le terrain pour mieux étudier le comportement de certains éléments tels que le baryum, les fluorures, le plomb et le zinc.
- Caractériser à la microsonde certains minéraux (biotite, carbonates, pyrite, pyrrhotite) pour déterminer les minéraux porteurs du baryum, strontium, zinc et plomb dans les quatre unités.
- Réaliser des essais cinétiques en colonne de laboratoire pour le lamprophyre RS afin de confirmer les résultats sur le lamprophyre RS*.
- Réaliser des essais de toxicité pour le Ba et le Pb.
- Réaliser un suivi environnemental à long terme sur site afin de vérifier les résultats issus des analyses de laboratoire.

RÉFÉRENCES

- Anenborg, M., Mavrogenes, J. A., Frigo, C. et Wall, F. (2020). Rare earth element mobility in and around carbonatites controlled by sodium, potassium, and silica. *Science Advances*, 6(41), eabb6570. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb6570>
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. and Li, L. (2002). *Management of mining waste in the context of sustainable development and environmental protection.*
- Beaumier, M. (1987). Geochimie des Sediments de Lac: *Region du Lac Otelnuk, DP 87- 14, Publication du M.E.R., 35 maps.*
- Beland, C. M. J. (2021). The contrasting geochemical behaviour of Sc and other REEs as illustrated by the Crater Lake and Ashram deposits in Quebec, Canada.
- Beland, C. M. J. and Williams-Jones, A. E. (2021a). The genesis of the Ashram REE deposit, Quebec: *Insights from bulk-rock geochemistry, apatite-monazite-bastnäsite replacement reactions and mineral chemistry.* Chemical Geology, 578, 120298. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120298>
- Beland, C. M. J. and Williams-Jones, A. E. (2021b). The mineralogical distribution of the REE in carbonatites: *A quantitative evaluation.* Chemical Geology, 585, 120558. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120558>
- Benzaazoua M, Bussière B, Dagenais AM, Archambault M (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environ Geol* 46(8):1086–1101.
- Blowes, D.W., and Ptacek, C.J. (1994). Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of sulfide Mine-Waste, Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 22, p.272-292*
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M. and Bussière, B. (2010). A modified protocol of the ASTM normalized humidity cell test as laboratory weathering method of concentrator tailings.
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussière, B. and Plante, B. (2014). Detailed literature review on static and kinetic tests as tools for predicting acid mine drainage. *Environnement, Ingénierie & Développement, N°66-mars 2014, 7824.* <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.340>
- British Geological Survey. Rare Earth Element. novembre 2011 (*Technical Raport*).
- Broll, N. (1996). Caractérisation de solides cristallisés par diffraction X. *Techniques d'analyse.* <https://doi.org/10.51257/a-v2-p1080>

Bussière, B.t and Guittonny, M. (2021). Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage (1st éd.). CRC Press. [*1 online resource : illustrations (black and white)*]. <http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781351680752>

Cassoff, J., Eng, P., Richard, P.-L., Geo, P., Larochelle, T., Eng, P., Zampini, J. and Eng, P. (2024). Mineral Resource Estimate for the Ashram Rare Earth Element and Fluorspar Deposit. *Technical Report*.

Castor, S. B. and Hedrick, J. B. (2006). *Rare Earth Elements. Industrial Minerals and Rocks*.

Charles, N., Tuduri, J., Lefebvre, G., Pourret, O., Gaillard, F. and Goodenough, K. (2021). *Ressources en terres rares de l'Europe et du Groenland : un potentiel minier remarquable mais tabou*

Clark, T. and Wares, R. (2006). Lithotectonic and metallogenic synthesis of the New Quebec Orogen (Labrador Trough). *Ministry of Natural Resources and Forests of Quebec. MM2005-01*

Commerce Resources Corp. The Ashram Rare Earth Element & Fluorspar Deposit. novembre 2023.

Dostal, J. (2017). Rare Earth Element Deposits of Alkaline Igneous Rocks. *Resources*, 6(3), 34. <https://doi.org/10.3390/resources6030034>

Dressler, B. (1974). Geochimie des Sediments de Ruisseau: Region du Lac Nachikapau (Nouveau Quebec), DP 422, Publication du M.E.R., 15 pages with maps.

Dressler, B. and Ciesielski, A. (1979). *Region de la Fosse du Labrador, rapport geologique RG-195, MRN Quebec, 130 pages with maps*.

Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Ratnayake, N. and Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): *Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production*. *Ore Geology Reviews*, 122, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>

Edahbi, M., Plante, B., Benzaazoua, M., Kormos, L. and Pelletier, M. (2018). Rare Earth Elements (La, Ce, Pr, Nd, and Sm) from a Carbonatite Deposit: *Mineralogical Characterization and Geochemical Behavior*, 19. <https://doi.org/10.3390/min8020055>

Elliott, H. A. L., Wall, F., Chakhmouradian, A. R., Siegfried, P. R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A. A., Marks, M. A. W., Dowman, E. et Deady, E. (2018). Fenites associated with carbonatite complexes: A review. *Ore Geology Reviews*, 93, 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.003>

Gagnon, G., Rousseau, G., Camus, Y. and Gagné, J. (2015). Ashram Rare Earth Deposit For Commerce Resources Corp., 199. Technical Raport

- Gupta, C. K. and Krishnamurthy, N. (2005). Extractive metallurgy of rare earths. CRC Press.
- Jordens, A., Cheng, Y. P. and Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97-114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Jowitt, S. M., Werner, T. T., Weng, Z. et Mudd, G. M. (2018). Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.008>
- Khan, M. N., Harani, R., Ahmed, M. M. and Hogarth, C. A. (1985). A comparative study of the effects of rare-earth oxides on the physical, optical, electrical and structural properties of vanadium phosphate glasses. *Journal of Materials Science*, 20(6), 2207-2214. <https://doi.org/10.1007/bf01112305>
- Laferrière, A. (2011). Technical Report: Mineral Resource Estimation, Eldor Property – Ashram Deposit, Nunavik, Quebec. *For Commerce Resources Corp.*, 99 pages with maps and figures.
- Lafontaine, M. (1984). Permis 669 Prospection et Cartographie, for Eldor Resources Ltd, GM40910, 19 pages with maps.
- Le Maitre, R. W. (2002). Igneous Rocks: a classification and glossary of terms recommendations of the international union of geological sciences, subcommission on the systematics of igneous rocks (2nd ed). *Cambridge university press*.
- Lefèvre, G. (2022). Le marché des terres rares en 2022: filières d'approvisionnement en aimants permanents | *MineralInfo*.
- Lima, I. B. de and Leal Filho, W. (dir.). (2016). Rare earths industry: technological, economic, and environmental implications. Elsevier.
- Linge, K. L. (2024). GGR Handbook of Rock and Mineral Analysis Chapter 5 The Inductively Coupled Plasma. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 48(4), 737-761. <https://doi.org/10.1111/ggr.12558>
- Liu, S.-L., Fan, H.-R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A. R., Yann, L., Yang, K.-F. and Li, X.-C. (2023). Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, 157, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>
- Maest, A. S. and Nordstrom, D. K. (2017). A geochemical examination of humidity cell tests. *Applied Geochemistry*, 81, 109-131. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.016>
- Marmier, V., Plante, B., Demers, I. and Benzaazoua, M. (2025). Development of a Neutral Mine Drainage Prediction Method Using Modified Kinetics Tests and Assessment of Sorption Capacities. *Mine Water and the Environment*, 44(1), 16-29. <https://doi.org/10.1007/s10230-025-01023-6>

- MEND. (1991). Acid rock drainage prediction Manual. MEND project I. I6.Ib, report by Coastech Research. MEND, Naturel Ressources .
- MEND. (2009). Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulfidic Geology (Rapport n°1.20.1).
- Merkus, H. G. (2009). Particle size measurements: fundamentals, practice, quality. *Springer Netherlands*.
- Meusy and al., (1984). The Carbonatite Complex of Permit 669, New Quebec, for Eldor Resources Ltd.,.
- Ministry of the Environment, the Fight Against Climate Change, Wildlife and Parks (MELCCFP). *Directive 019 on the mining industry 2025*.
- Mitchell, R. H. and Smith, D. L. (2017). Geology and mineralogy of the Ashram Zone carbonatite, Eldor Complex, Quebec. *Ore Geology Reviews*, 86, 784-806. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.004>
- Natural Resources Canada. (2022). Facts about rare earth elements. Natural Resources Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/donnees-statistiques-et-analyses-sur-lexploitation-miniere/faits-mineraux-metaux/faits-sur-les-elements-des-terres-rares/20631>
- Natural Resources Canada. (2024). Information on rare earth elements - Natural Resources Canada.
- Néron, A., Bédard, L. P. and Gaboury, D. (2018). The Saint-Honoré Carbonatite REE Zone, Québec, Canada: Combined Magmatic and Hydrothermal Processes. *Minerals*, 8(9), 397. <https://doi.org/10.3390/min8090397>
- Nicholson, R. V. Overview of neutral pH drainage and its mitigation: results of a MEND study. *Proceedings of the MEND Ontario Workshop, Sudbury, 2003. 2004.*
- Nordstrom, D. K. (2009). Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2-3), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.002>
- Orris, G. J. and Grauch, R. (2002). Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences [Open-File Report].
- Ozsvath, D. L. (2009). Fluoride and environmental health: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 8(1), 59-79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
- Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. <https://doi.org/10.3133/wri994259>

- Preinfalk, C. and Morteani, G. (1989). The Industrial Applications of Rare Earth Elements. *Dans P. Möller, P. Černý et F. Saupé (dir.), Lanthanides, Tantalum and Niobium (p. 359-370).* Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87262-4_19
- Redina, A. A., Doroshkevich, A. G., Veksler, I. V. and Wohlgemuth-Ueberwasser, C. C. (2021). Fluorite Mineralization Related to Carbonatitic Magmatism in the Western Transbaikalia: *Insights from Fluid Inclusions and Trace Element Composition.* Minerals, 11(11), 1183. <https://doi.org/10.3390/min11111183>
- Ressources naturelles Canada. (2024). Informations sur les terres rares - *Ressources naturelles Canada.*
- Roy, V. (2019). Acceleration de l'oxydation et passivation de sulfures dans des steriles miniers afin de reduire le potentiel de generation de drainage neutre contamine.
- Schulz, Klaus. J., DeYoung, J. H., Seal II, R. R. and Bradley, D. C. (2017). Critical Mineral Resources of the United States—*Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply* [Professional Paper].
- Smith, D., D'Souza, R. and Knox, A. W. (2008). Exploration of the Eldor Property, Northern Quebec. *Assessment Report, 21 pages plus figures and appendices.*
- Taylor, F. C. (1982). Reconnaissance geology of a part of the Canadian Shield, northern Québec and Northwest Territories. *Geological Survey of Canada; Memoir 399, 32 pages + maps.*
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution: *an examination of the geochem. record preserved in sedimentary rocks.* Blackwell.
- U.S. Geological Survey. (2024). Mineral commodity summaries 2024. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- USGS. (2025). Mineral Commodity Summaries 2024.
- Van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Seal II, R. R., Long, K. R. and Gambogi, J. (2017). Rare-Earth Elements [Professional Paper].
- Verplanck, P. L., Gosen, B. S., Seal, R. R. and McCafferty, A. E. (2010). A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion-Related Rare Earth Element Deposits [*Scientific Investigations Report*].
- Verplanck, P. L., Van Gosen, B. S., Seal, R. R. and McCafferty, A. E. (2014). A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion-Related Rare Earth Element Deposits (2010-5070) [*Scientific Investigations Report*]. [10.3133/sir20105070J](https://doi.org/10.3133/sir20105070J)
- Viladkar, S. G. and Pawaskar, P. B. (1989). Rare earth element abundances in carbonatites and fenites of the Newania complex, Rajasthan, India. *Bulletin of the Geological Society of Finland, 61(1), 113-122.* <https://doi.org/10.17741/bgsf/61.1.003>

- Villeneuve, M. Évaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétique. POLYPUBLIE. : <https://publications.polymtl.ca/9481/> novembre 2004 (Polytechnique Montréal).
- Voncken, J. H. L. (2016). The Rare Earth Elements. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5>
- Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N. and Jamieson, H. (2020). Mine Waste Rock: Insights for Sustainable Hydrogeochemical Management. *Minerals*, 10(9), 728. <https://doi.org/10.3390/min10090728>
- Wang, B., Pang, Y., Zhang, Y., Zhang, L., Ye, R., Yan, L., Li, Z. and Ren, A. (2021). Thorium and fetal neural tube defects: an epidemiological evidence from large case-control study. *Genes and Environment*, 43(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s41021-021-00227-w>
- Woolley, A. R. and Kjarsgaard, B. A. (2008). Carbonatite occurrences of the world: map and database (5796). <https://doi.org/10.4095/225115>
- Zarrouk, W. (2025). Le comportement géochimique et la valorisation potentielle des stériles du gisement Ashram (*UQAT*).
- Zhou, B., Li, Z. and Chen, C. (2017). Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 7(11), 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>
- Zosel, J., Oelßner, W., Decker, M., Gerlach, G. et Guth, U. (2011). The measurement of dissolved and gaseous carbon dioxide concentration. *Measurement Science and Technology*, 22(7), 072001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/7/072001>

ANNEXE A

Tableau A 1 : Les principaux types de gisements d'ETR (British Geological Survey, 2011).

Type de dépôts	Brève description	Teneurs et tonnages	Exemple de gisements
Primaires	Associé aux carbonatite	Dépôts associés à des roches ignées riches en carbonates associées à des provinces ignées alcalines et à des zones de failles majeures	Quelques dizaines de milliers de tonnes à plusieurs centaines de millions de tonnes, 0,1 à 10 % de REO. Par exemple déclaration Obo : 750 millions de tonnes à 4,1 % de REO
	Associé aux roches ignées alcalines	Gisements associés à des roches ignées caractérisés par des minéraux alcalins abondants et un enrichissement en HFSE	Généralement <100 millions de tonnes (Lovozero > 1 000 millions de tonnes), teneur variable, généralement <5 % de REO, par exemple Thor Lake : 64,2 millions de tonnes à 1,96 % de REO
	Gisements primaires d'oxydes de fer-Cu-Au-ÉTR	Gisements de cuivre-or riches en oxyde de fer et dans divers caractère et forme	Par exemple, olympic Dam : 2000 millions de tonnes à 0,3295 % de REO (Orris et Grauch, 2002)
	Gisements hydrothermaux (sans rapport avec les roches ignées alcalines)	Généralement du quartz, de la fluorine, veines polymétalliques et pegmatites d'origines diverses	Généralement <1 million de tonnes, rarement jusqu'à 50 millions de tonnes, variable de note, généralement
	Placers marins (y compris les dunes côtières dépôts formés par processus éoliens)	Accumulations de résistants minéraux lourds, concentrés par les processus côtiers et trouvé le long ou à proximité de littoral existant	Tonnage très variable, généralement de l'ordre de 10 à 1 à 3 centaines de millions de tonnes, généralement <0,1% de monazite. Par exemple Jangardup 30 millions de tonnes à 0,046 % de
	Placers alluviaux	Concentrations de minéraux lourds et résistants dans les canaux fluviaux	Perak en Malaisie Chavara en Inde Ceinture de monazite de Caroline et Horse Creek au États-Unis Guangdong en Chine
	Paléoplacers	Gisements de placers anciens formant généralement des roches consolidées et cimentées	10 millions de tonnes jusqu'à 100 millions de tonnes, généralement (<0,1 % REO)
	Dépôts latéritiques	Dépôts résiduels de surface formés par l'altération chimique des roches ignées enrichies en ETR	Quelques dizaines de milliers de tonnes à plusieurs centaines de millions tonnes avec 0,1 à 10 % de REO. Par exemple Mt Weld : 12,24 millions de tonnes à 9,7 % de REO (jusqu'à 40 % de REO)
	Argiles à adsorption d'ions	Dépôts d'argile résiduels formés par l'altération de roches granitiques enrichis en ETR	La plupart <10 000 tonnes, à faible teneur (0,03 à 0,35 % REO)
			Longnan, Xunwu en Chine

Tableau A 2 : L'ensemble des travaux antérieurs effectués dans le secteur du gisement d'Ashram

Année	Activités	Références
1950-1970	De nombreux levés géologiques régionaux à différentes échelles ont été réalisés par la commission géologique du Canada (CGC) et le Ministère Provincial des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF)	(Taylor, 1982)
	D'autres levés géologiques fournissant plus d'information ont été effectués par le MRNF dans certaines zones du secteur d'Ashram	(Dressler et Ciesielski, 1979)
1974	Un levé géochimique des sédiments fluviaux a été réalisée	(Dressler, 1974)
1981-1987	Campagne d'échantillonnage d'eau de lac et de sédiments pour l'exploration d'uranium au nord de la fosse du Labrador, entraînant la découverte de la carbonatite d'Eldor par Eldor Resources Ltd,	(Beaumier, 1987)
	Réalisation d'un levé radiométrique aéroporté sur 982 km par Eldor Resources occasionnant la découverte de nombreuses anomalies radiométriques dans la zone	
	Levé de reconnaissance géologique	
	Analyses montrant les teneurs indicielles de quelques éléments tels que Nb (7%), Ta (0,18%) et de ETR totaux (4%)	(Lafontaine, 1984; Meusy et al., 1984)
	Campagne de levés géophysiques magnétoradiométriques et d'orientation géochimique du sol par Unocal Canada Ltd	
	Étude pétrographique et géochimique confirmant les résultats antérieurs,	
	Un levé géochimique régional des sédiments lacustres été réalisé	(Beaumier, 1987)

Tableau A 3 : L'ensemble des travaux antérieurs effectués dans la zone d'Ashram (suite)

Année	Activités	Références
2007	Commerce Resources Corp conclu une entente d'achat avec Virginia Mines Inc (virginia) sur 8 claims	
2007-2010	Campagnes d'exploration, de prospection, d'échantillonnage de roches et de sol, de levés magnétiques et radiométriques au sol, de levé magnétoélectromagnétique et radiométrique aéroporté sur 862 km, effectués par Dahrouge Geological Consulting Ltd. (Dahrouge)	(Smith <i>et al.</i> , 2008)
	Programmes de tranchées et de forages au diamant faits par Dahrouge	
	Découverte <i>in situ</i> de la minéralisation d'ETR sur la péninsule d'Ashram	
	Confirmation en profondeur de la minéralisation en ETR observée à la péninsule d'Ashram	
2011	Publication d'un estimé de ressources selon norme du Règlement 43-101 par SGS-Geostat de Montréal	(Laferrière, 2011)
	Laferrière effectua le calcul d'estimation des ressources et trouve 177,4 Mt à 1,74% TREO avec 1,25% de teneur de coupure,	
2016	Forage de plus de 170 trous soit environ 25 km de carottes	
2017	Saville Resources Corp signe une entente avec Commerce pour l'exploration du Nb, localisé dans la partie externe de la Carbonatite	

Tableau A 4 : Sélection des échantillons de carbonatites RS avec analyses chimiques par ICP-MS et ICP-OES provenant de la base de données de Mont Royal Resources.

Sample Number	longeuer en m	Masse Réel en kg	Totale OTR en ppm	F Final %	CaO Final %	Na ₂ O Final %	K ₂ O Final %	P ₂ O ₅ Final %	V Final ppm	Cu Final ppm	Zn Final ppm	Sr Final ppm	Zr Final ppm	Nb Final ppm	Ba Final ppm	Pb Final ppm	Th Final ppm	U Final ppm
136108	1,12	2,64	7309,43	2,3	30,75	0,03	0,14	1,86	43	5	140	3262	36	482	262	10	164	0,9
136109	1,53	3,76	7632,89	0,36	29,89	0,04	0,06	2,49	50	5	220	3636	39	118	198	20	180	0,3
136110	1,64	3,17	8530,35	0,31	29,12	0,03	0,05	1,89	65	5	180	3363	28	97	192	10	183	0,2
105539	1,02	1,82	7542,40	0,59	31,37	0,03	0,02	3,09	42	5	150	3594	43		218	39	137	0,05
105542	1,02	1,62	6354,98	0,49	31,33	0,03	0,04	3,84	27	5	120	3594	29		127	10	103	0,2
135153	1,47	2,81	6083,39	0,49	28,56	0,04	0,26	2,87	39	5	120	3056	36	334	271	10	157	1,5
135177	1,68	3,63	7094,93	0,43	28,32	0,04	0,19	1,84	38	5	410	3566	55	322	257	54	216	0,8
135181	1,81	4,17	7193,80	1,08	30,38	0,04	0,07	3,49	33	5	320	3487	42	299	161	10	210	0,4
135182	0,78	1,95	6616,26	0,91	29,24	0,04	0,11	3,83	35	5	230	3360	41	318	162	12	185	0,8
135194	1,65	4,08	7443,86	0,52	28,62	0,04	0,19	3,53	21	5	220	3102	69	178	212	48	138	0,6
135232	1,68	3,69	7324,37	0,23	29,21	0,03	0,04	1,82	29	5	220	3347	47	134	85	33	115	0,1
135243	1,8	4,35	7474,72	0,57	31,28	0,05	0,05	6,45	31	5	180	3210	87	325	125	45	157	0,3
135252	1,22	3	7438,87	0,4	29,76	0,04	0,04	3,72	52	5	260	4019	62	230	118	68	135	0,1
135290	2,07	4,76	7044,42	0,43	30,19	0,03	0,11	2,1	17	5	240	3378	36	280	168	89	140	0,5
135292	1,55	3,6	7517,12	0,93	30,01	0,04	0,19	1,36	26	5	340	3119	37	295	166	93	166	0,5
135294	1	2,19	7284,28	0,33	29,72	0,04	0,07	1,19	35	5	120	3286	54	294	116	36	109	0,4
135323	1,65	3,65	7133,17	0,98	27,77	0,38	0,63	2,13	48	5	180	2525	58	117	550	41	127	1
135341	1,65	3,58	7339,12	0,76	30,84	0,04	0,01	2,24	32	5	270	3687	39	109	143	22	146	0,05
136894	1,01	1,97	6363,58	0,29	30,25	0,02	0,03	1,67	37	5	100	3319	27	191	141	14	118	0,2
Total		60,44	136721,94	12,40	566,61	1,03	2,30	51,41	700,00	95,00	4020,00	63910,00	865,00	4123,00	3672,00	664,00	2886,00	8,90
1er Quartile			7082,31	0,39	29,19	0,03	0,04	1,86	30,50	5,00	147,50	3249,00	36,00	145,00	137,50	11,50	133,00	0,20
2e Quartile			7316,90	0,51	29,95	0,04	0,07	2,37	36,00	5,00	220,00	3361,50	41,50	287,00	167,00	34,50	151,50	0,40
3e Quartile			7485,32	0,92	30,77	0,04	0,19	3,58	44,25	5,00	262,50	3594,00	55,75	321,00	227,75	49,50	180,75	0,80
Moyenne pond			7253,98	0,65	29,76	0,06	0,13	2,74	36,04	5,00	224,44	3349,06	47,29	224,27	196,13	38,39	154,94	0,47

Tableau A 5 : Sélection des échantillons de lamprophyres RS* avec analyses chimiques par ICP-MS et ICP-OES provenant de la base de données de Mont Royal Resources.

Sample Number	longueur en m	Masse réel en Kg	Totale OTR ppm	F Final ppm	CaO Final %	Na2O Final %	K2O Final %	P2O5 Final %	V Final ppm	Cu Final ppm	Zn Final ppm	Sr Final ppm	Zr Final ppm	Nb Final ppm	Ba Final ppm	Ta Final ppm	Pb Final ppm	Th Final ppm	U Final ppm
105462	1,33	2,20	327,84	19600	4,96	1,26	7,13	0,29	273	5	380	195	97		12150	2,8	22	7,7	0,5
105463	1	0,67	7830,15	44600	24,03	1,33	1,57	3,04	150	40	870	1935	85		1921	4,2	284	307	2,7
133805	1,65	3,32	3102,91	18500	9,82	1,54	4,32	0,36	258	60	960	871	107	251	8902	1,9	44	137	0,9
135411	1,37	3,07	1838,47	9600	6,2	1,56	5,56	0,45	220	170	2260	622	87	212	2875	2,6	2630	56,4	0,9
135412	1,49	3,43	2188,17	11800	6,35	2,51	5,68	0,37	253	60	1180	610	99	132	3056	2,1	1030	45,6	0,7
Total	6,84	12,69	15287,53	104100	51,36	8,2	24,26	4,51	1154	335	5650	4233	475	595	28904	13,6	4010	553,7	5,7
moyenne pond			2318,25	16104,65	7,91	1,75	5,33	0,51	244,35	76,02	1228,66	679,20	97,10	152,63	6058,32	2,40	944,98	79,36	0,87
1er Quartile			1838,47	8100	6,3125	0,0375	0,12	0,3675	61,25	5	210	619	38,25	121,5	246	0,05	17,5	53,7	0,45
2e Quartile			2188,17	18500,00	6,35	1,54	5,56	0,37	253,00	60,00	960,00	622,00	97,00	212,00	3056,00	2,60	284,00	56,40	0,90
3e Quartile			3102,91	19600,00	9,82	1,56	5,68	0,45	258,00	60,00	1180,00	871,00	99,00	231,50	8902,00	2,80	1030,00	137,00	0,90

Tableau A 6 : Sélection des échantillons de brèches RS avec analyses chimiques par ICP-MS et ICP-OES provenant de la base de données de Mont Royal Resources.

Sample Number	Longueur en m	masse réel en kg	Totale OTR en ppm	F Final %	Fe ₂ O ₃ %	CaO Final %	Na ₂ O Final %	K ₂ O Final %	TiO ₂ Final %	P ₂ O ₅ Final %	V Final ppm	Cu Final ppm	Zn Final ppm	Sr Final ppm	Zr Final ppm	Nb Final ppm	Ba Final ppm	Ta Final ppm	Pb Final ppm	Th Final ppm	U Final ppm
116482	1,15	2,73	9339,86	0,55	7,21	27,49	0,07	0,27	0,56	5,28	83	10	290	2574	53	276	253	1,8	82	580	13,8
116486	1,6	3,29	9982,99	0,4	9,48	26,57	0,2	0,13	0,362	1,15	125	20	350	2747	34	120	227	0,6	335	276	8,4
116487	1,5	3,31	10708,91	0,82	8,23	27,93	0,12	0,42	0,528	5,12	90	5	260	3642	68	237	321	2	59	584	12,9
116490	1,45	3,25	10655,73	2,08	12,97	26,49	0,09	0,53	0,592	2,04	133	20	1010	2632	46	725	573	8,1	980	541	8,6
136093	1,58	3,95	8874,10	0,62	4,98	28,14	0,05	0,71	0,085	2,49	42	5	310	2765	71	111	179	0,05	38	161	1,5
116480	1,5	3,53	8716,59	0,79	14,33	24,56	0,18	0,32	0,657	2,6	116	10	820	2946	79	366	405	4,9	509	595	29,5
136096	1,32	3,26	9054,93	0,61	5,68	26,08	0,06	2,08	0,455	2,08	100	5	310	2410	156	320	277	2,5	18	207	5,7
136091	1,57	3,78	10146,99	0,67	6,24	30,19	0,16	0,68	0,108	3,37	55	5	320	2828	114	134	463	0,05	25	182	2,2
116483	0,85	1,72	10189,79	0,6	6,43	29,63	0,13	0,16	0,66	5,88	85	5	140	3231	74	710	211	8,9	39	602	11,8
116469	1,4	3,36	10584,99	0,74	12,75	25,25	0,05	0,2	0,508	1,31	88	20	440	2951	49	203	368	0,9	109	319	8
136095	1,2	2,78	8126,59	0,71	5,8	28,2	0,04	1,09	0,14	1,75	50	5	290	2141	201	283	223	0,2	16	196	1,4
116484	1,4	1,32	9032,98	0,95	6,01	29,82	0,16	0,15	0,631	5,51	86	20	160	3451	80	177	209	1,4	33	558	12
Moyenne pond			9578,30	0,79	8,24	27,51	0,11	0,61	0,41	3,03	86,17	10,60	396,50	2835,03	88,45	281,82	312,29	2,26	183,65	373,34	9,02
1er quartile			8993,26	0,61	5,96	26,39	0,06	0,19	0,31	1,97	76,00	5,00	282,50	2617,50	52,00	166,25	220,00	0,50	31,00	204,25	4,83
1er quartile			9661,42	0,69	6,82	27,71	0,11	0,37	0,52	2,55	87,00	7,50	310,00	2796,50	72,50	256,50	265,00	1,60	49,00	430,00	8,50
3e quartile			10288,59	0,80	10,30	28,56	0,16	0,69	0,60	5,16	104,00	20,00	372,50	3021,00	88,50	331,50	377,25	3,10	165,50	581,00	12,23

Tableau A 7 : Sélection des échantillons de fénites RS avec analyses chimiques par ICP-MS et ICP-OES provenant de la base de données de Mont Royal Resources.

Sample Number	Longueur en m	Masse Réel en kg	Total OTR en ppm	Fluor Final en %	Nb en ppm	Ta Final en ppm	Fe ₂ O ₃ Final en %	CaO Final %	Na ₂ O Final %	K ₂ O Final %	TiO ₂ Final %	P ₂ O ₅ Final %	V Final ppm	Cu Final ppm	Zn Final ppm	Sr Final ppm	Ba Final ppm	Pb Final ppm	Th Final ppm	U Final ppm
136903	1,7	3,49	3569,97012	1,89	832	3,3	8,42	20,6	0,07	3,04	1,369	2,46	120	150	430	2830	2608	21	131	2
136931	0,7	1,36	3738,89275	1,43	1050	2,1	10,76	20,18	0,04	2,76	2,026	1,54	355	160	230	1795	1999	10	97,6	0,8
136933	1,47	3,31	2829,37453	0,63	1480	0,8	4,99	32,3	0,04	0,18	0,095	5,6	45	70	360	4028	192	9	127	1,1
136937	1,47	2,79	2881,87264	0,36	609	0,6	4,62	30,23	0,12	0,13	0,121	3,11	41	10	100	4406	132	7	80,2	0,9
136935	1,18	2,53	2494,21936	0,36	652	2,2	5,62	29,61	0,03	0,2	0,094	2,75	49	5	350	3528	251	5	107	5,2
136897	1,38	2,85	3903,91814	1,14	358	1,1	7,25	24,56	0,28	2,45	0,845	3,48	115	50	260	2900	1584	11	106	2
136922	1,08	2,35	1248,64159	0,94	243	0,6	7,98	25,63	0,14	1,94	0,166	1,73	84	30	180	2379	1278	18	43,2	1,5
136923	1,53	3,35	1905,3981	0,55	233	0,6	4,7	32,42	0,31	1,03	0,119	1,66	50	10	120	3040	742	14	49,3	1,8
136936	1,13	2,17	1964,12275	0,94	693	1,5	5,3	24,12	0,5	1,76	0,41	2,29	75	20	200	3560	1022	9	81,2	1,5
136917	1,2	2,34	4724,51732	1,68	455	0,6	7,67	20,67	0,04	3,74	0,425	3,31	110	5	280	2369	2081	9	120	1,7
136919	1,53	3,4	3214,71266	2,15	391	1,2	7,84	21,76	0,03	2,68	0,288	3,17	105	20	310	2332	1506	8	86,5	3,8
136901	1,16	1,58	4653,52151	1,04	333	0,4	6,1	26,17	0,27	1,6	0,333	3,73	101	5	320	4335	1513	16	121	1
136918	1,22	1,79	8472,82194	0,41	129	0,05	4,39	27,98	0,02	0,12	0,016	3,77	24	5	130	2771	170	5	116	0,3
136926	1,11	2,39	5187,99032	0,41	308	0,05	8,69	30,87	0,02	0,17	0,076	1,67	77	10	420	2489	226	11	162	0,2
136896	1,48	2,02	4284,01949	1,77	454	5,2	9,58	19,16	0,32	3,1	2,311	1,72	145	160	240	1921	3125	11	57,3	4,2
136904	0,98	3,12	2724,58124	0,83	304	30,1	4,18	33,9	0,03	0,09	0,112	9,01	66	5	160	3169	208	18	148	103
136929	1,44	2,9	2979,13905	0,84	392	5,2	9,71	19,13	1,12	2,32	2,639	0,85	181	100	200	2063	2403	16	61,7	2
136905	1,6	3,42	4147,13603	1,17	598	3,4	8,13	23,58	0,3	2,64	2,257	2,5	164	100	310	2490	2111	16	80,9	2,4
Total	23,36	47,16	162846,55	49,08	25389,65	171,52	325,53	1224,84	9,81	77,95	35,61	147,12	4729,88	2394,50	12245,10	138130,57	60055,23	577,22	4643,76	409,23
Moyenne pond		3453,06511	1,04	538,37	3,64	6,90	25,97	0,21	1,65	0,76	3,12	100,29	50,77	259,65	2928,98	1273,44	12,24	98,47	8,68	
1er quartile		2750,78	0,57	314,25	0,60	5,07	20,94	0,03	0,19	0,11	1,72	54,00	6,25	185,00	2371,50	232,25	9,00	80,38	1,03	
1er quartile		3392,34	0,94	423,00	1,15	7,46	25,10	0,10	1,85	0,31	2,63	92,50	20,00	250,00	2800,50	1392,00	11,00	101,80	1,75	
3e quartile		4249,80	1,37	641,25	3,03	8,35	30,08	0,30	2,67	1,24	3,44	118,75	92,50	317,50	3438,25	2060,50	16,00	120,75	2,30	

Tableau A 8 : Limites de détection (LMD) de quelques éléments donnés par l'URSTM et le SGS

Élément	LMD sur liquide (mg/L)	LMD sur solide ($\mu\text{g/g}$)	Élément	LMD sur liquide (mg/L)	LMD sur solide ($\mu\text{g/g}$)
Al	0,008	3	Ce	0,00001	0,001
As	0,008	0,5	Cs	0,0001	
Ba	0,001	0,01	Dy	0,00001	0,001
Be	0,000	0,02	Er	0,00001	0,001
Bi	0,005	0,09	Eu	0,00001	0,001
Ca	0,033	3	Ga	0,0001	
Cd	0,001	0,02	Gd	0,00001	0,001
Co	0,001	0,5	Ge	0,0001	
Cr	0,001	0,01	Hf	0,0001	
Cu	0,001	0,1	Ho	0,00001	0,001
Fe	0,033	3	In	0,00001	
K	0,038	3	La	0,00001	0,001
Li	0,049	2	Lu	0,0001	0,001
Mg	0,003	3	Nb	0,00001	
Mn	0,001	0,1	Nd	0,00001	0,06
Mo	0,001	0,1	Pr	0,00001	0,001
Na	0,208	3	Ru	0,00001	
Ni	0,001	0,1	Rh	0,0001	
Pb	0,002	0,05	Sc	0,0001	0,03
S	0,008		Sm	0,00001	0,001
Se	0,008	0,1	Ta	0,0001	
Si	0,15		Tb	0,00001	0,001

Tableau A 9 : Limites de détection (LMD) de quelques éléments donnés par URSTM et SGS (suite)

Éléments	LMD sur liquide (mg/L)	LMD sur solide ($\mu\text{g/g}$)	Éléments	LMD sur liquide (mg/L)	LMD sur solide ($\mu\text{g/g}$)
Sr	0,005	0,02	Te	0,0001	
Te	0,006		Th	0,0001	
Ti	0,001	0,1	Tl	0,00001	0,001
U	0,035	0,002	Yb	0,00001	0,001
Zn	0,028	0,7			
F ⁻	0,2				
PO ₄ ³⁻	0,9				
SO ₄ ²⁻	1				
S ₂ O ₃ ²⁻	1				

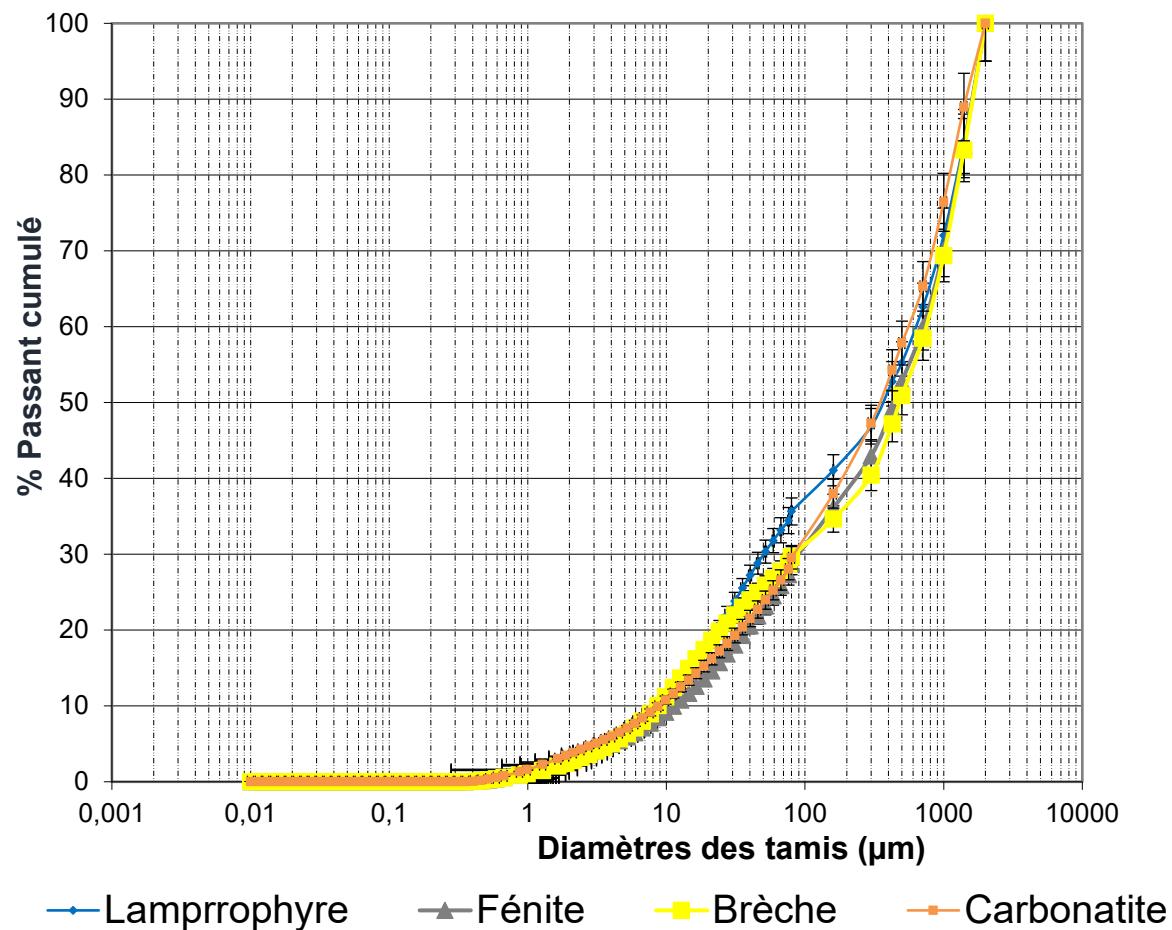


Figure A 1 : Courbes granulométriques des différentes lithologies

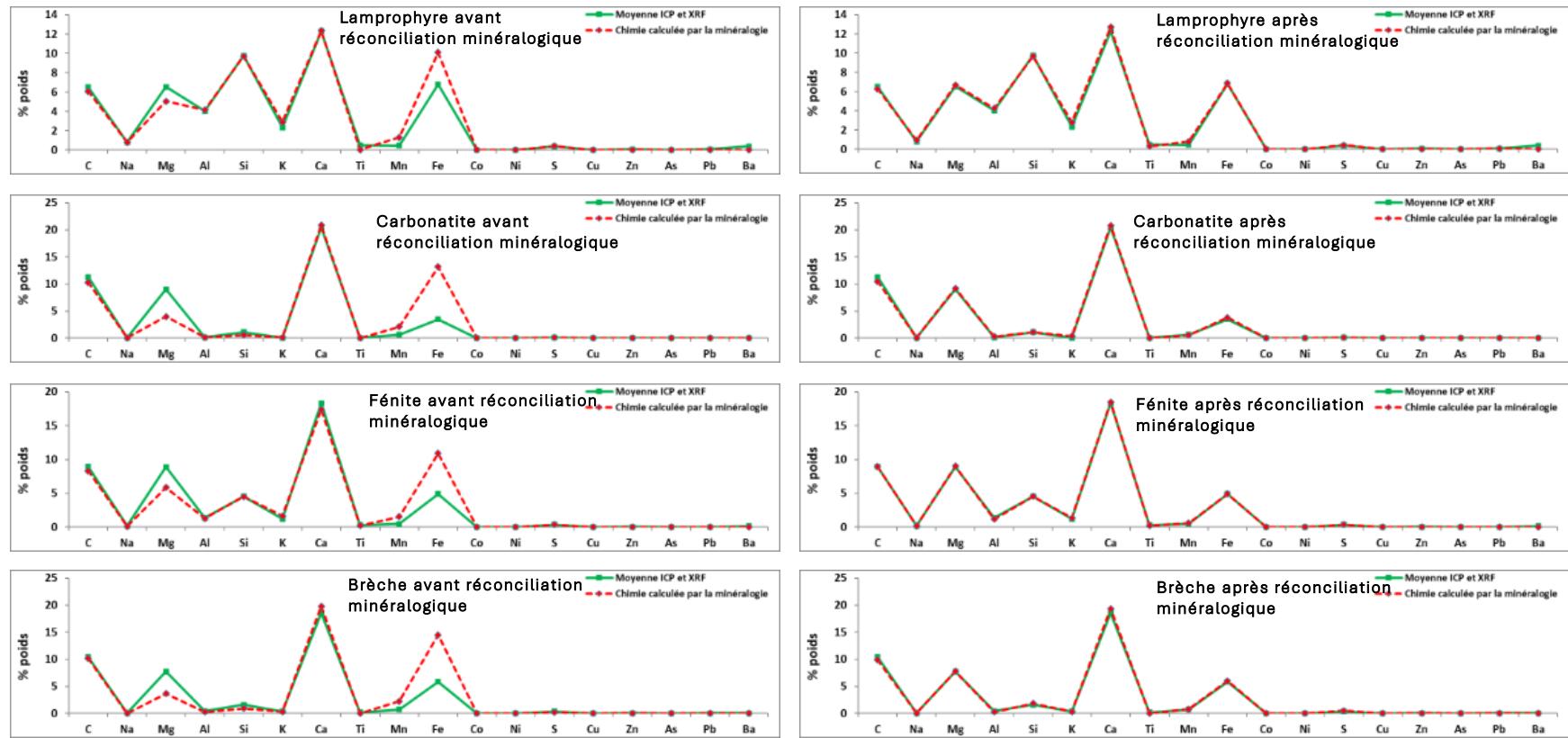


Figure A 2 : Courbes de réconciliation minéralogique des différentes lithologies par la méthode MLA