

**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Guide de caractérisation des résidus miniers et du minerai

Juin 2020

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction des eaux usées du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en collaboration avec les unités suivantes du MELCC :

Pôle d'expertise régionale nordique et minier
Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
Direction des matières dangereuses et des pesticides
Direction des matières résiduelles
Direction de la qualité des milieux aquatiques
Direction du Programme de réduction des rejets industriels et des lieux contaminés

Réalisation

Anna Peregoedova, Ph. D. Géochimie
Spécialiste en sciences physiques
Direction des eaux usées

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974
Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Référence à citer

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2020). *Guide de caractérisation des résidus miniers et du minéral*, Québec, 52 p. [En ligne].
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/Industriel/secteur-minier/guide-caracterisation-mineral.pdf> (page consultée le jour/mois/année).

Dépôt légal – 2020
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-86820-0 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec - 2020

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iii
Liste des annexes	iii
Remerciements	iv
Avant-propos	v
Liste des sigles et abréviations	vi
Introduction	1
Chapitre 1 Renseignements généraux	2
1.1 Matériaux visés	2
1.2 Caractérisation du mort-terrain	2
1.3 Classification des matériaux miniers	3
1.3.1 Matériaux à faibles risques	3
1.3.2 Matériaux acidogènes	3
1.3.3 Matériaux lixiviables	3
1.3.4 Matériaux cyanurés	3
1.3.5 Matériaux contaminés par des composés organiques	4
1.3.6 Matériaux radioactifs	4
1.3.7 Matériaux inflammables	4
1.3.8 Matériaux à risques élevés	4
Chapitre 2 Orientations générales sur le processus de caractérisation des matériaux miniers	6
2.1 Objectifs de l'étude de caractérisation des matériaux miniers	6
2.2 Étapes de caractérisation environnementale des matériaux miniers	6
Chapitre 3 Échantillonnage	8
3.1 Planification d'une campagne d'échantillonnage	8
3.1.1 Particularité de l'échantillonnage pour les mines en développement	8
3.1.2 Particularité de l'échantillonnage pour les mines en exploitation	9
3.2 Nombre d'échantillons	10
3.2.1 Nombre d'échantillons à l'étape d'identification des matériaux	10
3.2.2 Nombre d'échantillons à l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques	10
3.2.3 Nombre d'échantillons à l'étape de caractérisation ciblée	12
3.3 Représentativité des échantillons et traitement statistique des données	12
3.3.1 Variabilité des caractéristiques	12
3.3.2 Analyse statistique d'homogénéité	13
3.3.3 Interprétation des résultats à l'aide d'une analyse statistique	13
Chapitre 4 Essais et méthodes d'analyses	15
4.1 Essais réalisés à l'étape d'identification des matériaux	15
4.2 Essais réalisés à l'étape d'évaluation de la variabilité	15
4.2.1 Détermination de la composition chimique	15
4.2.2 Analyse du soufre et du carbone au four à induction	16
4.2.3 Analyse minéralogique	16
4.2.3.1 Exigences de base pour l'analyse minéralogique	16
4.2.3.2 Exigences en cas de présence de minéraux problématiques	17

4.2.3.3 Méthodes d'analyse minéralogique _____	18
4.2.4 Détermination de la granulométrie et d'autres caractéristiques géotechniques _____	19
4.3 Essais et méthodes d'analyse réalisés à l'étape de caractérisation ciblée _____	19
4.3.1 Essais de prédiction du potentiel de génération d'acide _____	19
4.3.1.1 Démarches à suivre pour les matériaux à faible teneur en soufre ($S_{total} < 0,04 \%$) _____	20
4.3.1.2 Démarches à suivre pour les matériaux dont la teneur en S_{total} est supérieure à 0,04 % _____	20
4.3.1.3 Démarches à suivre pour les matériaux à forte teneur en soufre ($S_{total} > 5 \%$) _____	20
4.3.1.4 Évaluation du potentiel de génération d'acide à l'aide des essais statiques _____	20
4.3.1.5 Démarches à suivre en fonction des résultats des essais statiques _____	21
4.3.1.6 Évaluation du potentiel de génération d'acide à l'aide des essais cinétiques _____	21
4.3.1.7 Essais d'auto-échauffement _____	24
4.3.2 Essais de prédiction du potentiel de lixiviation _____	24
4.3.2.1 Identification des éléments d'intérêt environnemental dans la fraction solide _____	24
4.3.2.2 Évaluation de la mobilité potentielle des contaminants à l'aide des essais de lixiviation _____	26
4.3.2.3 Évaluation du potentiel de lixiviation à l'aide des essais cinétiques _____	27
4.3.3 Vérification de la qualité de la fraction liquide des résidus miniers _____	28
4.3.4 Utilisation des facteurs d'échelle pour la prédiction de la qualité des eaux de drainage _____	29
4.3.5 Essais de terrain _____	29
4.3.6 Évaluation de la radioactivité des matériaux miniers _____	30
4.3.6.1 Vérification de l'équilibre _____	30
4.3.6.2 Activité massique C _____	31
4.3.6.3 Activité massique maximale A _____	31
4.3.6.4 Calcul du coefficient S _____	31
4.3.6.5 Évaluation de la radioactivité dans le lixiviat _____	32
Chapitre 5 Présentation des résultats de l'étude de caractérisation des matériaux miniers _____	33
5.1 Contenu du rapport de l'étude de caractérisation _____	33
5.1.1 Résumé du rapport de caractérisation _____	33
5.1.2 Introduction _____	33
5.1.3 Renseignements généraux sur le contexte géologique du projet et les matériaux caractérisés _____	33
5.1.4 Programme d'échantillonnage _____	34
5.1.5 Méthodes d'analyse et protocoles d'essais _____	34
5.1.6 Résultats d'analyses et d'essais _____	35
5.1.7 Interprétation des résultats _____	35
5.1.8 Conclusions _____	35
Références bibliographiques _____	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Nombre d'échantillons recommandé selon le tonnage total des matériaux d'une unité géologique ou d'un type de résidus miniers d'usinage_____	11
-------------	---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Cheminement menant au classement et paramètres à considérer lors des trois étapes de caractérisation environnementale des matériaux miniers_____	7
Figure 3.1	Relation entre le nombre d'échantillons recommandé et le tonnage total des matériaux d'une unité géologique ou d'un type de résidus miniers d'usinage (tiré de SRK, 1989)_____	11
Figure 4.1	Évaluation du potentiel de génération d'acide et classement des matériaux_____	22
Figure 4.2	Évaluation du potentiel de lixiviation et classement des matériaux_____	25
Figure 4.3	Évaluation de la radioactivité et classement des matériaux_____	32

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Critères de classement pour les matériaux miniers à risques élevés_____	38
Annexe B	Méthodes d'essais de référence_____	39
Annexe C	Évaluation du potentiel radioactif_____	40
Annexe D	Contenu du rapport de caractérisation – Aide-mémoire_____	42

REMERCIEMENTS

Le Ministère tient à remercier le comité de rédaction du Guide ainsi que la Direction de la restauration des sites miniers du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles et l'Association minière du Québec, qui ont contribué à la rédaction du Guide en fournissant des commentaires et des suggestions précieuses. Le Ministère tient également à souligner l'importante contribution de Mme Valérie Bertrand (Golder Ltée, géochimiste sénior) et de M. Benoît Plante (professeur à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue), qui ont activement participé tout au long des travaux de rédaction en tant qu'experts indépendants et dont l'expérience accrue dans le domaine de la caractérisation des résidus miniers et les avis professionnels ont permis d'améliorer considérablement le contenu du Guide.

AVANT-PROPOS

Le présent *Guide de caractérisation des résidus miniers et du minerai* (ci-après appelé Guide) a pour but de fournir l'information nécessaire et les recommandations du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (ci-après appelé Ministère) sur les modalités de la caractérisation géochimique et environnementale des résidus miniers et du minerai. Cette caractérisation vise à prédire le potentiel de contamination et à procéder au classement des différents matériaux miniers, en fonction des risques environnementaux anticipés. Le Guide est destiné aux entreprises qui doivent gérer des résidus miniers et du minerai, aux professionnels chargés de caractériser les résidus miniers et le minerai et aux analystes engagés dans l'évaluation des projets miniers.

Si les orientations du présent Guide sont différentes de celles qui sont indiquées dans d'autres documents du Ministère, les orientations du document le plus récent prévalent.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ANOVA	Analyse de la variance (Analysis of variance)
ASTM	Société américaine pour les essais et les matériaux (American Society for Testing and Materials)
CEAEQ	Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
CTEU-9	Essais de lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques (Centre technique des eaux usées – Méthode 9)
DMA	Drainage minier acide
DRX	Diffraction des rayons X
DNC	Drainage neutre contaminé
EDS	Spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
EPA	Agence américaine de protection de l'environnement (United States Environmental Protection Agency)
EPMA	Microanalyse par sonde électronique
ICP-MS	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (Inductively coupled plasma mass spectrometry)
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MEB	Microscopie électronique à balayage
PA	Potentiel de génération d'acide
PN	Potentiel de neutralisation d'acide
PNN	Potentiel net de neutralisation
QEMSCAN	Système automatisé d'acquisition de données minéralogiques à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy)
RMD	Règlement sur les matières dangereuses
SIMS	Microsonde ionique
SPLP	Essais de lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques ; tiré de la méthode EPA 1312 (Synthetic Precipitation Leaching Procedure)
TCLP	Essais de lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques ; tiré de la méthode EPA 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)
TIMA	Système automatisé d'acquisition de données minéralogiques à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Tescan Integrated Mineral Analyzer)
WDS	Spectrométrie à rayons X à dispersion de longueurs d'onde (Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry)

INTRODUCTION

L'exigence de caractériser les résidus miniers et le minerai permet au Ministère d'évaluer les impacts sur l'environnement d'un projet lors de l'analyse des demandes d'autorisations requises en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement*. L'objectif de la caractérisation est d'obtenir, pour les différents matériaux à gérer, une connaissance adéquate des propriétés géochimiques et environnementales et de prédire comment ces propriétés évolueront sous différentes conditions d'entreposage et d'exposition à l'air et à l'eau, en tenant compte des conditions climatiques locales. La caractérisation des résidus miniers et du minerai est donc un outil prévisionnel permettant d'élaborer un plan de gestion sécuritaire pour l'environnement et de choisir un mode d'entreposage conforme aux exigences prescrites par le Ministère. De plus, cette caractérisation est nécessaire pour l'approbation du plan de réaménagement et de restauration lorsqu'il est requis en vertu de la *Loi sur les mines*, selon le *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*. Il est recommandé de commencer la planification des démarches de caractérisation environnementale des résidus miniers et du minerai dès l'étape de l'exploration minière. Une telle stratégie permettra non seulement de minimiser les coûts et les délais d'une étude de caractérisation, mais aussi d'optimiser les modes de gestion des résidus miniers et de réduire les coûts lors de l'exploitation et de la restauration des aires d'accumulation.

Le présent Guide vise à uniformiser la procédure de caractérisation des résidus miniers et du minerai. Toutefois, les orientations véhiculées dans ce document ne sont pas limitatives, puisque chaque projet possède ses propres particularités. Les principaux éléments considérés sont la représentativité de l'échantillonnage et les essais exigés, selon les objectifs particuliers lors des différentes étapes de l'étude de caractérisation. Des analyses et des tests supplémentaires choisis selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation en fonction des caractéristiques propres à chaque projet peuvent être réalisés en complément des essais minimalement requis dans le présent Guide. Les résultats des tests supplémentaires seront pris en considération lors de l'analyse de l'étude de caractérisation au Ministère.

Le Guide est constitué de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, les définitions des substances visées par le présent Guide ainsi qu'un système de classification selon les risques environnementaux anticipés sont présentés. Les deuxième et troisième chapitres exposent les grandes lignes à adopter pour l'échantillonnage et la caractérisation environnementale des résidus miniers et du minerai en fonction des objectifs. Dans le quatrième chapitre, les procédures de classement et les choix des essais à réaliser lors des différentes étapes de caractérisation environnementale sont présentés et sont accompagnés de précisions sur l'ensemble des essais et des méthodes d'analyse disponibles. Dans le cinquième chapitre, des exigences relatives au contenu des rapports de caractérisation sont énoncées.

Si la réutilisation ou la valorisation des résidus miniers est envisagée pour des usages non miniers ou à l'extérieur des sites générant les résidus miniers, il faudra plutôt se référer à la dernière version du *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction*, afin de connaître la procédure de caractérisation à appliquer.

CHAPITRE 1 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

1.1 Matériaux visés

Les matériaux visés par le présent Guide incluent les résidus miniers et le minerai.

Sont considérés comme résidus miniers :

- toute substance solide ou liquide, à l'exception de l'effluent final, rejetée par l'extraction, la préparation, l'enrichissement et la séparation d'un minerai, y compris les boues et les poussières résultant du traitement ou de l'épuration des eaux usées minières ou des émissions atmosphériques;
- les scories et les boues, y compris les boues d'épuration, rejetées lors du traitement utilisant majoritairement un minerai ou un minerai enrichi ou concentré par pyrométallurgie ou hydrométallurgie ou par extraction électrolytique;
- les substances rejetées lors de l'extraction d'une substance commercialisable à partir d'un résidu minier et qui correspondent à celles qui sont déjà définies dans les deux premiers alinéas.

Sont exclus les résidus rejetés par l'exploitation d'une carrière ou d'une sablière, au sens du Règlement sur les carrières et sablières.

Dans le présent Guide, le terme « minerai » comprend aussi le minerai enrichi et le concentré dont le mode de gestion pourrait présenter un risque potentiel pour l'environnement. Dans le but d'alléger le texte, le terme générique « matériaux » est utilisé pour désigner tous les matériaux miniers visés.

1.2 Caractérisation du mort-terrain

Le mort-terrain¹ n'est pas considéré comme un résidu minier et sa caractérisation n'est pas systématiquement visée par le présent Guide. Dans certains cas, cependant, la caractérisation du mort-terrain pourrait être pertinente afin d'évaluer la nécessité des mesures particulières pour la gestion de ces matériaux.

Si une contamination anthropique du mort-terrain a eu lieu ou est suspectée, la caractérisation et l'établissement d'un mode de gestion pour ce matériau doivent être réalisés selon les modalités de la version la plus récente du *Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés* du Ministère (ci-après appelé Guide d'intervention).

Si les roches extraites lors de l'exploitation d'une mine présentent un risque de contamination (exemple : potentiel de génération d'acide ou potentiel de lixiviation), les mêmes essais que ceux qui sont requis pour la caractérisation des résidus miniers pourraient être réalisés pour vérifier les caractéristiques géochimiques du mort-terrain adjacent. Le nombre d'échantillons et l'emplacement des points d'échantillonnage doivent être établis au cas par cas, selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation. Des arguments valables doivent être fournis pour justifier la non-nécessité de caractériser le mort-terrain (par exemple, lorsque les roches sous-jacentes sont à faible risque ou pour d'autres raisons).

1. Mort-terrain : matériau non consolidé recouvrant un gisement ou le socle rocheux.

1.3 Classification des matériaux miniers

L'objectif principal de la caractérisation des résidus miniers et du minerai est généralement de classer ces matériaux selon le système de classification élaboré par le Ministère en fonction de leurs caractéristiques et des risques environnementaux anticipés, soit :

- Matériaux à faibles risques
- Matériaux acidogènes
- Matériaux lixiviables
- Matériaux cyanurés
- Matériaux contaminés par des composés organiques
- Matériaux radioactifs
- Matériaux inflammables
- Matériaux à risques élevés

Plusieurs caractéristiques parmi celles qui sont citées ci-dessus peuvent être associées à un même matériau (exemple : « acidogène et cyanuré » ou « lixiviable et radioactif », etc.). Les définitions de ces huit catégories de classement des matériaux miniers sont présentées ci-dessous.

1.3.1 Matériaux à faibles risques

Les matériaux sont classés comme « à faibles risques » s'ils ne sont pas considérés comme étant acidogènes, lixiviables, cyanurés, contaminés par des composés organiques, radioactifs, inflammables ou à risques élevés.

1.3.2 Matériaux acidogènes

Les matériaux sont classés comme « acidogènes » si le potentiel de génération d'acide a été confirmé par les essais et les analyses selon les modalités prévues à la section 4.3.1. Les exigences relatives au classement des matériaux selon le potentiel de génération d'acide et les types d'essais à réaliser sont résumés dans le diagramme décisionnel présenté à la figure 4.1.

1.3.3 Matériaux lixiviables²

Les matériaux sont classés comme « lixiviables » si le potentiel de lixiviation a été confirmé par les essais et les analyses selon les modalités prévues à la section 4.3.2. Les exigences relatives au classement des matériaux selon le potentiel de lixiviation et les types d'essais à réaliser sont résumés dans le diagramme décisionnel présenté à la figure 4.2.

1.3.4 Matériaux cyanurés

Les résidus miniers sont classés comme « cyanurés » lorsqu'un procédé de cyanuration est employé pour le traitement du minerai ou lorsqu'un réactif cyanuré est utilisé dans le procédé.

2. Les « matériaux lixiviables » au sens du présent Guide ne sont pas équivalents aux « matières lixiviables » considérées comme étant des matières dangereuses au sens du Règlement sur les matières dangereuses.

1.3.5 Matériaux contaminés par des composés organiques

Les résidus miniers issus d'un procédé de traitement du minerai impliquant des composés organiques sont classés comme « contaminés par des composés organiques » si les concentrations en composés organiques sont supérieures aux critères B du Guide d'intervention.

1.3.6 Matériaux radioactifs

Sont classés comme « radioactifs » les matériaux qui émettent des rayonnements ionisants (S) et pour lesquels le résultat de l'équation suivante, calculé pour un kilogramme de matériaux solides ou pour un litre de matériaux liquides et semi-liquides, est supérieur à 1:

$$S = C_1/A_1 + C_2/A_2 + C_3/A_3 + \dots C_n/A_n \quad [1]$$

Où

« $C_1, C_2, C_3, \dots C_n$ » représentent l'activité massique de ce résidu pour chaque radionucléide qu'il contient, exprimée en kilobecquerels par kilogramme (kBq/kg) ou par litre (kBq/L);

« $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ » représentent, pour chaque radionucléide qu'il contient, l'activité massique maximale mentionnée à l'annexe 1 du *Règlement sur les matières dangereuses* (RMD). Celle-ci est exprimée en kilobecquerels par kilogramme (kBq/kg) ou par litre (kBq/L).

1.3.7 Matériaux inflammables

Sont classés comme « inflammables » :

- les résidus miniers liquides ou semi-liquides dont le point d'éclair, conformément à la méthode prévue dans la liste des méthodes d'analyses publiée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) du Ministère, est égal ou inférieur à 61 °C;
- les matériaux qui sont susceptibles de s'enflammer facilement et de brûler violemment ou longtemps, de causer ou de favoriser un incendie sous l'effet du frottement ou de la chaleur, de subir une décomposition fortement exothermique à la température ambiante ou, en cas d'inflammation, de brûler violemment en présence ou en l'absence d'air;
- les matériaux qui sont sujets à la combustion spontanée dans des conditions normales de manutention ou d'utilisation, ou qui sont susceptibles de s'échauffer au contact de l'air au point de s'enflammer;
- les matériaux qui, au contact de l'eau, dégagent une quantité dangereuse de gaz inflammable ou qui, au contact de l'eau ou de la vapeur d'eau, sont susceptibles de s'enflammer spontanément ou de réagir violemment.

1.3.8 Matériaux à risques élevés

Les matériaux sont classés comme « à risques élevés », si :

- lorsqu'ils sont soumis aux essais conformément à la méthode d'analyse de lixiviation MA.100-Lix.com.1.1 (TCLP), ils produisent un lixiviat contenant un contaminant dont la concentration est supérieure aux critères énoncés dans l'annexe A;
- lorsqu'ils sont soumis aux essais conformément à la méthode d'analyse de lixiviation MA.100-Lix.com.1.1 (TCLP), ils produisent un lixiviat émettant des rayonnements ionisants (S) pour lequel le résultat de l'équation [2] est supérieur à 0,05;

$$S = C_1/A_1 + C_2/A_2 + C_3/A_3 + \dots C_n/A_n \quad [2]$$

Où

« $C_1, C_2, C_3, \dots C_n$ » représentent l'activité volumique du lixiviat pour chaque radionucléide qu'il contient, exprimée en kilobecquerels par litre (kBq/L);

« $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ » représentent, pour chaque radionucléide qu'il contient, l'activité volumique maximale mentionnée à l'annexe 1 du *Règlement sur les matières dangereuses* (RMD). Celle-ci est exprimée en kilobecquerels par litre (kBq/L).

- lorsqu'ils sont soumis aux essais conformément à la méthode prévue par le CEAEQ du Ministère pour les dioxines et les furanes, ils contiennent plus de 5 µg/kg de polychlorodibenzofuranes ou de polychlorodibenzo [b,e] [1,4] dioxines. Cette concentration est calculée selon la méthode des facteurs d'équivalence de la toxicité établis à l'annexe 2 du RMD.

CHAPITRE 2 ORIENTATIONS GÉNÉRALES SUR LE PROCESSUS DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX MINIERS

Le présent chapitre énonce les exigences et les recommandations générales du Ministère concernant le processus de caractérisation environnementale des matériaux miniers et les principes de base pour l'élaboration d'un programme de caractérisation. Les principaux objectifs de l'étude de caractérisation, les étapes à suivre ainsi que les paramètres devant être évalués sont énoncés. Le protocole de caractérisation, incluant la sélection d'échantillons, le choix des essais et l'interprétation des résultats, doit être effectué par des professionnels ayant la formation et l'expertise pertinentes dans le domaine de la géochimie.

2.1 Objectifs de l'étude de caractérisation des matériaux miniers

L'étude de caractérisation vise avant tout à évaluer les principales propriétés géochimiques, les paramètres physicochimiques et le potentiel de contamination des matériaux miniers afin de prédire leur comportement environnemental lors d'une exposition aux conditions atmosphériques. La caractérisation des matériaux miniers est donc un outil prévisionnel permettant de choisir un mode de gestion sécuritaire pour l'environnement, en se basant sur des essais de laboratoire et de terrain. Les résultats obtenus doivent permettre de classer les matériaux caractérisés en fonction des risques environnementaux anticipés et guider les promoteurs dans le choix d'un mode d'entreposage conforme aux exigences prescrites par le Ministère.

2.2 Étapes de caractérisation environnementale des matériaux miniers

La caractérisation environnementale des matériaux miniers peut être séparée en trois étapes ayant des objectifs spécifiques (figure 2.1) :

Étape I : Identification des matériaux

À l'étape I, les données géochimiques existantes sont revues (teneurs en métaux, en soufre et autres données disponibles) et, dans certains cas, un nombre restreint d'échantillons sont analysés afin d'identifier et de caractériser, de façon préliminaire, les unités géologiques³ et les matériaux visés par l'étude de caractérisation et d'identifier les matériaux et les unités qui s'avèrent potentiellement problématiques d'un point de vue environnemental.

Étape II : Évaluation de la variabilité des caractéristiques

À l'étape II, la caractérisation des propriétés géochimiques de base est réalisée sur un plus grand nombre d'échantillons, sur chaque unité géologique et chaque type de matériaux miniers identifiés à l'étape I, afin de vérifier la variabilité des caractéristiques et de faire une évaluation préliminaire du comportement environnemental des matériaux caractérisés.

Étape III : Caractérisation ciblée en vue du classement

À l'étape III, des caractérisations plus ciblées sont réalisées afin de prédire le comportement environnemental des matériaux à court et à long terme et de les classer selon les risques environnementaux anticipés.

3. Unité géologique : une zone de découpage du socle rocheux définie sur la base des caractéristiques lithologiques observables et distinctives ou par la combinaison des propriétés lithologiques et des relations stratigraphiques.

Étape I Identification des matériaux

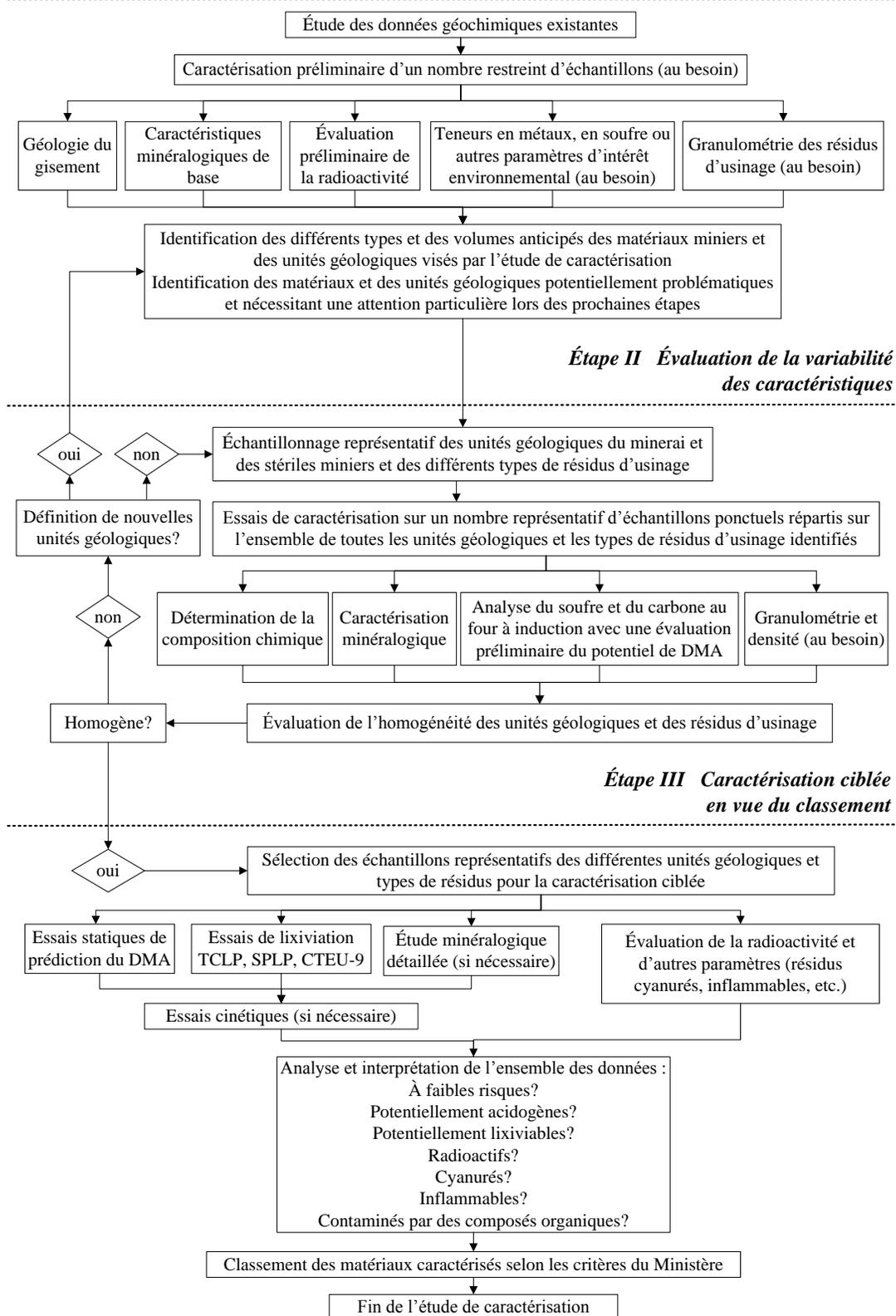


Figure 2.1 Cheminement menant au classement et paramètres à considérer lors des trois étapes de caractérisation environnementale des matériaux miniers.

CHAPITRE 3 ÉCHANTILLONNAGE

La qualité de l'étude de caractérisation des matériaux miniers dépend d'abord de la qualité de l'échantillonnage, plus précisément du nombre et de la représentativité des échantillons analysés. Le nombre et l'emplacement des points d'échantillonnage devraient être établis en fonction de la nature et de l'hétérogénéité des matériaux à caractériser, du tonnage, du plan d'exploitation de la mine et des procédés de traitement du minerai utilisés.

Des recommandations d'ordre général en matière d'échantillonnage sont présentées dans le *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* du Ministère, qui regroupe une série de cahiers traitant de l'échantillonnage de différentes matrices environnementales. Le cahier 1 : *Généralités* (MDDEP, 2008a) et le cahier 8 : *Échantillonnage des matières dangereuses* (MDDEP, 2008b) traitent du cadre général de la planification d'une campagne d'échantillonnage et fournissent à l'utilisateur des recommandations quant aux techniques d'échantillonnage des résidus industriels ayant des propriétés semblables à celles de certains types de résidus miniers (résidus miniers à risques élevés, radioactifs, inflammables, etc.). Malgré la particularité du secteur minier, il est possible d'adapter plusieurs informations contenues dans ces documents aux diverses situations rencontrées lors de la caractérisation des matériaux miniers.

Les recommandations formulées dans le présent chapitre reflètent les attentes spécifiques du Ministère à l'égard de l'échantillonnage des matériaux miniers à des fins de caractérisation environnementale. Dans certains cas, il peut s'avérer pertinent de consulter le Ministère lors de l'élaboration d'un programme d'échantillonnage afin de s'assurer qu'il répond bien aux attentes du Ministère et d'apporter les modifications nécessaires, le cas échéant.

3.1 Planification d'une campagne d'échantillonnage

Une bonne planification d'une campagne d'échantillonnage doit d'abord tenir compte des objectifs de la caractérisation, de l'information déjà disponible, de l'hétérogénéité des matériaux testés et des essais envisagés. Il est recommandé de commencer par la consultation de toutes les parties concernées, incluant les géologues de la mine, afin de rassembler les renseignements disponibles. Les étapes suivantes consistent à élaborer une stratégie et à choisir une approche d'échantillonnage afin de définir le nombre, le type et le lieu de prélèvement d'échantillons pour chaque unité géologique ou zone d'étude (exemple : échantillonnage ciblé, aléatoire, systémique, etc.). Le rapport de l'UQAT sur la caractérisation géochimique des résidus miniers et du minerai (UQAT, 2015) présente différentes stratégies d'échantillonnage pouvant être utilisées dans le secteur minier.

Lorsque les résidus miniers sont traités afin de modifier les propriétés intrinsèques et d'en réduire le potentiel de contamination, les résidus transformés doivent être échantillonnés et soumis à l'étude de caractérisation (exemple : les résidus miniers traités par stabilisation et solidification; le concentré de sulfure et les résidus désulfurés issus du processus de désulfuration environnementale).

Lorsque les amendements alcalins, les bactéricides ou autres produits chimiques sont ajoutés aux résidus miniers afin de ralentir la génération des lixiviats contaminés ou de les neutraliser de façon temporaire sans toutefois modifier les caractéristiques intrinsèques des matériaux, les résidus sans amendement doivent être échantillonnés et soumis à l'étude de caractérisation.

3.1.1 Particularité de l'échantillonnage pour les mines en développement

Pour un nouveau projet minier, c'est-à-dire à l'étape d'avant-projet ou avant l'exploitation ou le traitement d'un nouveau gîte minéral, la caractérisation des matériaux miniers implique l'échantillonnage ponctuel de chaque unité géologique qui sera rencontrée lors de l'exploitation de la mine. Des unités géologiques supplémentaires peuvent être distinguées à l'intérieur d'une unité géologique présentant une grande

variabilité des paramètres d'intérêt environnemental. L'échantillonnage et la caractérisation de chacune des différentes unités géologiques sont nécessaires afin :

- d'identifier les unités géologiques ayant des propriétés géochimiques semblables dans le but de les grouper et de former des échantillons composites, permettant ainsi d'adapter le nombre d'échantillons à analyser lors des étapes plus avancées de la caractérisation;
- d'identifier les unités géologiques problématiques au point de vue environnemental pour évaluer la possibilité d'optimiser le mode de gestion des matériaux provenant de ces unités géologiques;
- d'identifier les unités géologiques composées de matériaux pouvant être valorisés.

Les échantillons composites peuvent être formés à partir des échantillons ponctuels ayant des caractéristiques environnementales semblables (contenu en sulfures ou en éléments lixiviables, composition chimique, degré d'altération, etc.). Il n'est cependant pas recommandé de former des échantillons composites à partir des échantillons couvrant un trop large secteur. Aussi, il est important de veiller à ce que les échantillons présentant des anomalies locales ne soient pas utilisés pour former les échantillons composites.

Les échantillons de minerai et de stériles peuvent être prélevés, par exemple, lors de l'échantillonnage en vrac ou en tranchées, à partir de carottes de forage d'exploration ou en échantillonnant les matériaux excavés lors du fonçage d'une rampe d'exploration. Si possible, il est fortement recommandé de prélever des échantillons supplémentaires à partir de carottes de forage situées aux endroits correspondant aux emplacements approximatifs des parois d'une future fosse d'extraction à ciel ouvert ou d'un chantier souterrain. La localisation des points d'échantillonnage doit être présentée dans le rapport de l'étude de caractérisation, par exemple, en utilisant des cartes et des coupes stratigraphiques longitudinales.

Pour évaluer le comportement géochimique des résidus miniers d'usinage, il est nécessaire d'échantillonner les matériaux produits lors d'essais minéralurgique ou métallurgiques en laboratoire ou d'essais en usine pilote, si de tels essais ont été réalisés.

3.1.2 Particularité de l'échantillonnage pour les mines en exploitation

Cette section présente les recommandations générales concernant l'échantillonnage des matériaux miniers pour les mines en exploitation. Les modalités d'échantillonnage des matériaux miniers pour les mines en exploitation dépendent des objectifs de caractérisation de chaque projet. Ainsi, des plans d'échantillonnage précis pourraient être établis au cas par cas selon les problèmes à résoudre et le jugement des professionnels responsables de l'étude de caractérisation.

Lorsque les matériaux miniers générés par une mine en exploitation doivent être caractérisés, l'hétérogénéité anticipée des caractéristiques géochimiques des roches excavées devrait être considérée. Pour les stériles miniers, les infrastructures suivantes peuvent être échantillonnées selon les objectifs de l'étude de caractérisation : fosse d'extraction à ciel ouvert (incluant parois et plancher), chantiers souterrains, aires d'accumulation de stériles, inclusions de stériles, remblais, fondations, digues, chemins et autres ouvrages construits au moyen de stériles miniers. Pour les résidus miniers d'usinage, il est recommandé de prélever les échantillons à l'usine plutôt que dans les aires d'accumulation afin d'éviter toute ségrégation granulométrique ou toute modification des propriétés à la suite de l'exposition aux conditions météorologiques. La fréquence d'échantillonnage des résidus miniers d'usinage devrait être établie selon la variabilité du minerai traité et d'éventuelles modifications apportées au procédé de traitement.

Lorsque les matériaux miniers déjà entreposés dans une aire d'accumulation doivent être caractérisés, le programme d'échantillonnage devrait être élaboré de façon à fournir de l'information exhaustive sur la variation spatiale des caractéristiques physicochimiques des matériaux à l'intérieur d'une aire d'accumulation, incluant l'éventuelle variation de la composition chimique et minéralogique, le degré

d'oxydation des matériaux dans les différents secteurs de l'aire d'accumulation et leur ségrégation granulométrique (échantillonnage par secteurs, échantillonnage en surface et à différentes profondeurs, etc.).

Pour les stériles miniers, il est recommandé d'échantillonner la fraction fine comme pouvant contribuer le plus à l'éventuelle contamination des eaux de drainage. Il est préférable de choisir une fraction permettant d'éviter le concassage, afin que l'état des surfaces soit le plus représentatif possible des conditions de terrain (surtout dans le cas de stériles miniers sulfurés). La granulométrie des échantillons prélevés devrait donc permettre un tamisage ultérieur en fonction des protocoles d'essais planifiés (voir les protocoles d'essais statiques, cinétiques et de lixiviation).

3.2 Nombre d'échantillons

De façon générale, le nombre d'échantillons doit être établi selon un principe d'entonnoir qui se traduit par un plus grand nombre d'échantillons ponctuels analysés au début d'une étude de caractérisation de façon à capter l'hétérogénéité inhérente aux matériaux échantillonnés et moins d'échantillons soumis à des essais plus complexes permettant une évaluation des paramètres spécifiques à des étapes avancées de caractérisation. Les exigences et les recommandations concernant le nombre d'échantillons nécessaires pour chaque étape de l'étude de caractérisation sont présentées ci-dessous.

3.2.1 Nombre d'échantillons à l'étape d'identification des matériaux

À l'étape d'identification des matériaux (étape I à la figure 2.1), les données existantes sont analysées afin d'avoir un premier aperçu de la nature géochimique et des volumes anticipés des matériaux caractérisés. Au besoin, un nombre restreint d'échantillons peuvent être analysés afin d'obtenir les informations manquantes permettant d'identifier les matériaux visés par l'étude de caractérisation et de planifier le futur programme d'échantillonnage de façon optimale.

3.2.2 Nombre d'échantillons à l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques

L'échantillonnage visant l'évaluation de la variabilité des caractéristiques des matériaux (étape II à la figure 2.1) devrait être réalisé selon une approche statistique présentée à la figure 3.1. Cette approche est semblable à celle qui est proposée dans le guide de prédiction du drainage minier acide publié par le Province of British Columbia Acid Mine Drainage Task Force (SRK, 1989). Notamment, le nombre d'échantillons devrait être modulé en tenant compte du tonnage total de l'unité géologique composant le minerai ou les stériles miniers ou le type spécifique des résidus miniers d'usinage.

La relation de la figure 3.1 présente le nombre d'échantillons recommandé selon le tonnage des matériaux d'une unité géologique ou d'un type de résidus miniers d'usinage. Le nombre d'échantillons recommandé pour différents ordres de grandeur de tonnage est présenté au tableau 3.1. Ces nombres sont présentés à titre indicatif uniquement dans le but de définir une quantité approximative des échantillons à prélever. Lorsque les tonnages sont importants et tendent vers un plus grand nombre d'échantillons, il peut être pertinent d'évaluer la possibilité de réduire ce nombre en fonction de l'hétérogénéité anticipée des matériaux caractérisés. En prenant en considération les quantités souvent limitées des résidus produits lors d'essais en usine pilote, le nombre d'échantillons des résidus miniers d'usinage pour les mines en développement peut également être réduit selon la quantité et le type des matériaux disponibles.

La principale règle à suivre pour déterminer le nombre adéquat d'échantillons consiste à obtenir un nombre d'échantillons suffisant pour démontrer que les unités géologiques distinctes, les différents types de résidus d'usinage ou les zones d'étude sont homogènes et présentent peu de variabilité pour les paramètres environnementaux d'intérêt.

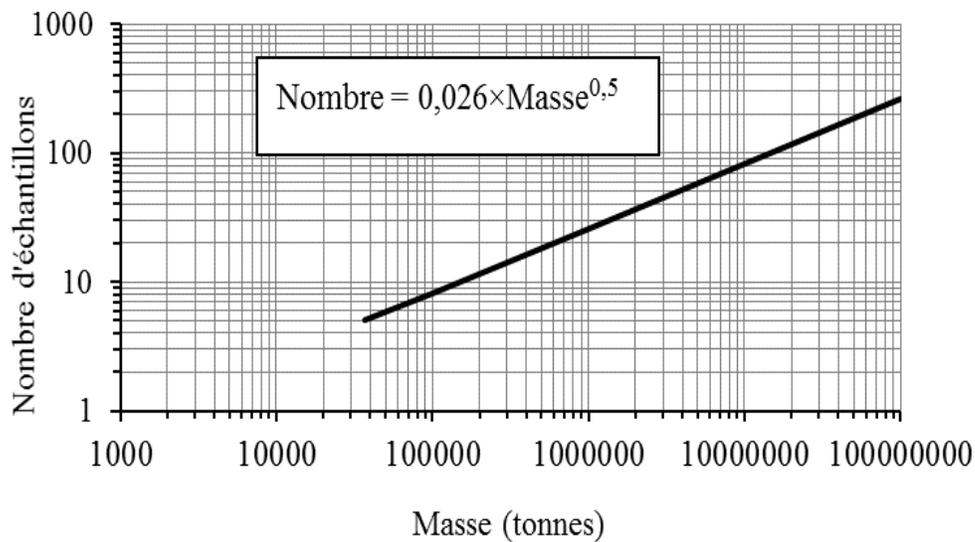


Figure 3.1 Relation entre le nombre d'échantillons recommandé et le tonnage total des matériaux d'une unité géologique ou d'un type de résidus miniers d'usage (tiré de SRK, 1989).

Tableau 3.1 Nombre d'échantillons recommandé selon le tonnage total des matériaux d'une unité géologique ou d'un type de résidus miniers d'usage

Masse des résidus miniers d'usage ou des unités géologiques distinctes composant le minerai ou les stériles miniers (en tonnes)	Nombre d'échantillons recommandé
< 10 000	5*
10 000	5*
100 000	8
500 000	18
1 000 000	26
1 500 000	32
10 000 000	82

* Un minimum de 5 échantillons doit être analysé pour évaluer l'incertitude (CEAEQ, 2016).

Pour les matériaux et les unités géologiques déjà identifiées comme étant problématiques, par exemple fortement acidogènes, le nombre d'échantillons peut être réduit. Aussi, le nombre d'échantillons peut être réduit pour les essais visant à vérifier une caractéristique qui pourrait être considérée d'emblée comme non problématique selon la nature des matériaux (exemple : l'analyse du soufre et du carbone au four à induction et les essais statiques de prédiction du drainage minier acide (DMA) pour les résidus de bauxite qui sont réputés non potentiellement générateurs d'acide en raison de leur nature alcaline). Un minimum de cinq échantillons est cependant requis pour établir une incertitude dont le calcul est nécessaire pour évaluer la variabilité des paramètres analysés (CEAEQ, 2016).

Lorsque la variabilité entre les résultats obtenus est jugée trop importante selon les résultats d'une analyse statistique (voir section 3.3), des échantillons supplémentaires devraient être prélevés et analysés. De ce fait, le nombre d'échantillons serait plus élevé pour un projet minier caractérisé par une plus grande hétérogénéité des propriétés physicochimiques des roches composant le gîte minéral exploité. Des résultats trop variables peuvent indiquer qu'il est nécessaire de distinguer une nouvelle zone d'étude ou une nouvelle unité géologique à l'intérieur d'une zone ou d'une unité hétérogène.

Le processus d'échantillonnage devrait donc être réalisé selon une approche itérative et évolutive permettant d'adapter le programme d'échantillonnage en fonction des résultats obtenus lors des étapes initiales de l'étude de caractérisation.

3.2.3 Nombre d'échantillons à l'étape de caractérisation ciblée

À l'étape de caractérisation ciblée (étape III à la figure 2.1), les échantillons représentatifs (voir section 3.3) sont sélectionnés à partir des échantillons analysés à l'étape II. Le nombre d'échantillons peut être réduit lorsque l'homogénéité des matériaux est démontrée pour les paramètres environnementaux d'intérêt, sans toutefois être inférieur au minimum de cinq échantillons requis par unité géologique ou type de résidu d'usage. Toutefois, tous les échantillons de l'étape II sont généralement soumis aux essais statiques de prédiction du DMA et aux essais de lixiviation (voir sections 4.3.1 et 4.3.2). Au besoin, un nombre restreint d'échantillons représentatifs peuvent faire l'objet d'une étude minéralogique détaillée, d'une évaluation de la radioactivité ou être soumis aux essais cinétiques.

3.3 Représentativité des échantillons et traitement statistique des données

D'un point de vue statistique, les échantillons représentatifs doivent permettre d'obtenir des résultats extrapolables à la population cible. En matière de caractérisation des matériaux miniers, les échantillons représentatifs sont ceux ayant des propriétés physicochimiques semblables aux propriétés typiques d'une unité correspondante et qui sont susceptibles de refléter le comportement environnemental de l'ensemble des matériaux qui la composent. Autrement dit, les résultats obtenus pour les échantillons représentatifs devraient se situer dans la plage des variations inhérentes aux matériaux caractérisés. Les limites des variations acceptables doivent être établies à l'aide d'une analyse statistique effectuée sur un nombre adéquat d'échantillons.

À l'étape de caractérisation ciblée, en plus de tester les échantillons représentatifs, il est recommandé de tester les échantillons dont les caractéristiques géochimiques se rapprochent des pôles extrêmes représentant les pires cas possibles. Une telle stratégie permet de couvrir des cas représentatifs de la moyenne de la population, mais également des cas potentiellement extrêmes pouvant exister localement (UQAT, 2015).

3.3.1 Variabilité des caractéristiques

En raison des processus géologiques complexes menant à la formation des gîtes minéraux, les caractéristiques géochimiques des matériaux miniers peuvent varier considérablement à petite échelle. Dans le cas des aires d'accumulation existantes, une variabilité des caractéristiques physicochimiques des

résidus miniers peut être observée, notamment en raison de la nature des résidus, de leur état d'altération variable selon l'historique de déposition, de la ségrégation granulométrique des résidus liée à la méthode de déposition utilisée, de la variabilité des caractéristiques du minerai traité ou des changements apportés au procédé de traitement. À cet effet, le plan d'échantillonnage doit prévoir une couverture spatiale, horizontale et verticale de la zone à exploiter ou d'une aire d'accumulation existante à caractériser, permettant ainsi de capter toute la plage de variabilité des caractéristiques physicochimiques pouvant avoir un impact négatif sur l'environnement.

3.3.2 Analyse statistique d'homogénéité

À l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques, les résultats obtenus pour chaque unité géologique, chaque type de résidus d'usage ou chaque zone distincte dans une aire d'accumulation doivent faire l'objet d'une analyse statistique pour en évaluer l'homogénéité. Au minimum, les paramètres statistiques suivants devraient être analysés afin de vérifier la distribution des valeurs obtenues :

- la moyenne;
- l'écart-type;
- l'incertitude étendue à un degré de confiance de 95 %;
- la valeur minimale et la valeur maximale;
- le centile 25 % et le centile 75 %;
- l'écart par rapport aux critères de classement.

Les méthodes de calcul de certains de ces paramètres statistiques sont présentées dans le *Guide d'estimation de l'incertitude des mesures pour les analyses chimiques* (CEAEQ, 2016). Il est important de préciser que, selon les exigences du CEAEQ (2016), un minimum de cinq données par composé est nécessaire pour évaluer une incertitude. Cette exigence doit être prise en considération lors de l'élaboration d'un programme d'échantillonnage.

Il est aussi recommandé de vérifier l'homogénéité d'un groupe d'échantillons par analyse de variance ANOVA (*analysis of variance*) ou par un autre test statistique, portant sur la variabilité des paramètres d'intérêt environnemental choisis au cas par cas (exemple : teneur en soufre, teneur en métaux toxiques, potentiel de neutralisation, etc.). Le but de ces analyses est de détecter des signes d'hétérogénéité statistiquement significative à l'intérieur d'un groupe d'échantillons et d'évaluer si le nombre d'échantillons prélevés est suffisant pour décrire la variabilité des données.

3.3.3 Interprétation des résultats à l'aide d'une analyse statistique

Les résultats d'analyses et d'essais utilisés pour le classement des matériaux sont comparés avec les critères de classement (critères environnementaux existants ou valeurs seuils établies par le présent Guide, par exemple : teneur en soufre, teneur de fond du milieu, critères de qualité des eaux souterraines ou critères génériques pour les sols du *Guide d'intervention GI-PSRTC*, etc.). La comparaison des résultats avec les critères de classement doit être faite à l'aide d'une analyse statistique des données. L'interprétation des résultats est réalisée au cas par cas, selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation. Les aspects suivants devraient être pris en considération :

1. La distribution des résultats obtenus lors des essais et des analyses doit être vérifiée afin d'évaluer si l'utilisation des moyennes et de l'écart-type est appropriée. Les tests de normalité permettent de vérifier si la distribution des données suit une loi normale. Dans ce contexte, la présentation des résultats sous forme de graphiques (histogrammes) est recommandée afin d'évaluer facilement la distribution des données. L'utilisation de la moyenne et de l'écart-type pourrait être inappropriée pour certains types de distributions de données. Quant au choix d'un centile, il ne nécessite pas un type de distribution de données en particulier.

2. Une analyse plus poussée des données statistiques est nécessaire lorsque la moyenne se situe sous le critère de classement, malgré un nombre élevé d'échantillons qui présentent des valeurs au-delà de ce critère. Une analyse statistique est également nécessaire lorsque le nombre d'échantillons représentant une unité géologique ou un type de résidus d'usinage ne permet pas de statuer sur la forme de distribution de données, alors que certains échantillons ne respectent pas le critère de classement. Dans des cas semblables, les aspects suivants devraient être pris en considération :
 - l'ampleur des dépassements des critères de classement (exemple : dépassements mineurs ou dépassements importants selon le jugement des professionnels);
 - la proportion et le tonnage approximatif des matériaux qui ne respectent pas le critère;
 - le niveau de risque associé au critère (exemple : critères relatifs aux matériaux à faibles risques ou aux matériaux à risques élevés);
 - la pertinence de distinguer une unité géologique ou un type de résidus supplémentaires pour les matériaux qui ne respectent pas le critère, considérant les risques anticipés pour l'environnement et la nécessité accrue de gérer ces matériaux séparément en appliquant des mesures d'atténuation particulières;
 - la pertinence de caractériser des échantillons supplémentaires afin de pouvoir statuer clairement sur le classement des matériaux.
3. Lorsque les données sont statistiquement variables sans toutefois dépasser un critère de classement, une analyse des échantillons supplémentaires n'est pas nécessaire pour pallier la variabilité du paramètre analysé lors du classement des matériaux.
4. Pour le classement des matériaux à risques élevés, toutes les données doivent être considérées, incluant notamment les valeurs qui dépassent les critères de classement à risques élevés, même si la valeur moyenne se trouve en dessous du critère. Par mesure de précaution, le classement de ces matériaux devrait être fait de façon conservatrice. Dans les cas incertains, par exemple pour les matériaux se rapprochant des critères à risques élevés avec des dépassements ponctuels des critères, mais pour lesquels le classement final ne considère pas que ces matériaux sont à risques élevés, l'interprétation des données doit être argumentée et justifiée par les responsables de l'étude de caractérisation.

CHAPITRE 4 ESSAIS ET MÉTHODES D'ANALYSES

Ce chapitre présente les analyses et les essais pertinents pour la caractérisation des matériaux miniers pour leur classement selon les risques environnementaux anticipés. Une liste des méthodes d'analyse et d'essais de référence est fournie à l'annexe B. Les analyses visées par un domaine d'accréditation doivent être faites par un laboratoire accrédité par le Ministre. Les analyses qui ne sont pas visées par un domaine d'accréditation du Ministère doivent être réalisées par un laboratoire accrédité ISO-17025. La description détaillée des essais non standardisés, notamment les essais statiques minéralogiques, les essais cinétiques en colonne, les essais de sorption et certains autres essais recommandés, ainsi que les références bibliographiques correspondantes peuvent être consultées dans le rapport de l'UQAT sur la caractérisation géochimique des résidus miniers et du minerai (UQAT, 2015). D'autres documents de référence peuvent être consultés pour obtenir de plus amples renseignements sur les essais et les méthodes d'analyse disponibles pour la prédiction du comportement environnemental des matériaux miniers (MEND, 2009 ; INAP, 2014).

4.1 Essais réalisés à l'étape d'identification des matériaux

À la première étape de l'étude de caractérisation, les informations existantes sont rassemblées pour permettre de définir le contexte géologique du gisement, les unités géologiques présentes, les types de résidus miniers générés, la nature géochimique et les volumes anticipés des matériaux visés par l'étude de caractérisation.

Les caractéristiques minéralogiques de base et les données géochimiques disponibles (teneurs en métaux, en soufre ou autres paramètres d'intérêt environnemental) sont consultées afin d'avoir un premier aperçu des contaminants pouvant présenter un risque pour l'environnement. Ces données sont aussi utilisées pour faire une évaluation préliminaire de la radioactivité dans le but de statuer sur la nécessité d'une analyse détaillée des caractéristiques radioactives des matériaux selon les modalités présentées à la section 4.3.6 du présent Guide.

En l'absence de données nécessaires à l'identification des matériaux visés par l'étude de caractérisation et dans le cas où il est jugé opportun d'analyser des échantillons supplémentaires, les mêmes méthodes qu'à l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques peuvent être utilisées, selon les besoins. Notamment, la composition chimique et minéralogique des échantillons ainsi que leur distribution granulométrique peuvent être analysées à l'aide des méthodes présentées en détail dans la section suivante.

4.2 Essais réalisés à l'étape d'évaluation de la variabilité

Les analyses minimalement exigées à l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques géochimiques des matériaux miniers incluent :

- la détermination de la composition chimique (section 4.2.1);
- l'analyse du soufre et du carbone au four à induction (section 4.2.2);
- l'analyse minéralogique (section 4.2.3).

L'analyse granulométrique et la détermination d'autres propriétés géotechniques peuvent s'avérer nécessaires, selon les particularités du projet et les besoins particuliers de l'étude de caractérisation (voir section 4.2.4).

4.2.1 Détermination de la composition chimique

Dans tous les cas, la composition chimique des matériaux caractérisés doit être déterminée. L'analyse de la composition chimique permet la quantification des éléments majeurs, mineurs et des éléments traces et

sert à cibler des problématiques environnementales potentielles. Les résultats obtenus doivent être utilisés pour :

- vérifier si les éléments présents, notamment les métaux, les métalloïdes et autres composés inorganiques et organiques, ont des concentrations supérieures aux teneurs de fond naturelles ou, en l'absence des données sur les teneurs de fond naturelles, dépassent les critères génériques A pour les sols du Guide d'intervention;
- vérifier l'homogénéité/hétérogénéité géochimique du minerai, de différents types de résidus d'usinage et de roches stériles;
- au besoin, en déduire la minéralogie générale des échantillons testés.

Pour un paramètre donné, lorsque la limite de quantification de la méthode analytique (LQM) est supérieure au critère générique pour les sols (ou à la teneur de fond locale), la LQM est alors considérée comme valeur de référence (à ne pas confondre avec la limite de détection d'une méthode [CEAEQ, 2015]).

4.2.2 Analyse du soufre et du carbone au four à induction

L'analyse du soufre et du carbone au four à induction permet de faire une première estimation du potentiel de génération d'acide par un calcul approximatif du bilan chimique entre le potentiel d'acidité (PA) relié à la présence des minéraux générateurs d'acide (sulfures) et le potentiel de neutralisation d'acide (PN) des carbonates. Ce calcul est basé sur l'hypothèse que le carbone présent dans l'échantillon est essentiellement sous forme de carbonate et non sous d'autres formes, telles que le graphite, et que le soufre total mesuré est majoritairement sous forme de sulfure (ou l'était avant de s'oxyder et de se transformer en sulfates lors de l'échantillonnage). Les données sur la teneur en soufre sont aussi utilisées pour statuer sur la nécessité des essais statiques et cinétiques (voir section 4.3).

Bien que l'analyse de roche totale permette l'analyse du soufre et du carbone, l'utilisation de la méthode au four à induction est exigée pour sa précision. Cette analyse est également exigée par le protocole des essais statiques (voir section 4.3.1.4).

4.2.3 Analyse minéralogique

Généralement, des renseignements préliminaires sur les caractéristiques minéralogiques de base sont obtenus aux étapes initiales de l'étude de caractérisation, notamment à l'étape d'identification des matériaux et à l'étape d'évaluation de la variabilité des caractéristiques géochimiques. Au besoin, des informations plus précises et détaillées sont acquises à l'étape de caractérisation ciblée.

Les principaux objectifs de la caractérisation minéralogique sont :

- l'identification et la quantification des minéraux potentiellement problématiques pour l'environnement et l'évaluation préliminaire de leur stabilité chimique dans le but d'identifier les minéraux pouvant mener à la contamination des eaux de drainage;
- l'obtention des données minéralogiques nécessaires pour l'élaboration d'un programme de caractérisation géochimique adapté aux besoins spécifiques du projet;
- l'obtention des données minéralogiques nécessaires à l'interprétation des résultats des essais auxquels seront soumis les échantillons.

4.2.3.1 Exigences de base pour l'analyse minéralogique

L'analyse minéralogique doit minimalement inclure la détermination de la composition minéralogique des matériaux caractérisés, car ces données sont fondamentales pour une prédiction fiable de la qualité des eaux de drainage minier.

4.2.3.2 Exigences en cas de présence de minéraux problématiques

Dans le cas où l'analyse de la composition chimique et les données minéralogiques préliminaires suggèrent la présence de minéraux potentiellement problématiques pour l'environnement, une confirmation est requise par analyse minéralogique plus détaillée et, le cas échéant, la quantification et la caractérisation des minéraux suivants doivent être réalisées :

- minéraux sulfureux;
- minéraux porteurs de métaux et de métalloïdes toxiques, comme le mercure, le plomb, l'arsenic, l'antimoine, etc.;
- minéraux radioactifs;
- autres minéraux potentiellement problématiques (exemple : amiante, sulfates et autres sels facilement solubles à l'eau).

Une caractérisation détaillée d'autres espèces minérales peut être nécessaire selon la nature du minerai exploité et les résidus miniers générés, notamment :

- l'identification et la quantification des minéraux neutralisants;
- l'identification et la quantification des minéraux ayant un potentiel de sorption.

Selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation, l'analyse de la composition chimique des minéraux problématiques peut s'avérer nécessaire pour une évaluation plus précise de l'effet éventuel de l'altération chimique sur la qualité des eaux de drainage à court et à long terme. Aussi, dans le cas des matériaux potentiellement problématiques, il peut être pertinent d'examiner la microstructure des échantillons. Les caractéristiques microstructurales suivantes devraient alors être documentées, car elles peuvent influencer directement la surface minérale exposée aux réactions chimiques et la qualité des eaux de drainage :

- la taille de grains des minéraux potentiellement problématiques en comparaison avec la granulométrie des matériaux caractérisés;
- l'association spatiale avec d'autres minéraux;
- l'enrobage des grains des minéraux réactifs avec des minéraux secondaires pouvant empêcher la poursuite des réactions chimiques;
- la présence des minéraux potentiellement problématiques sous forme d'inclusions minérales renfermées dans les grains d'autres minéraux stables chimiquement les rendant non disponibles aux réactions chimiques;
- la présence de microfractures;
- la présence de fibres minérales;
- toute autre caractéristique pertinente, à déterminer au cas par cas.

Identification et quantification des sulfures et des minéraux neutralisants

Les sulfures présents dans les matériaux caractérisés doivent être identifiés et quantifiés. Dans le cas des matériaux considérés comme étant potentiellement acidogènes selon les évaluations préliminaires, il peut être pertinent de documenter certaines caractéristiques des sulfures, comme la morphologie des grains, la

surface minérale exposée, l'association spatiale avec d'autres minéraux, la présence d'inclusions minérales et des signes d'altération ou de déformations structurales.

Dans le cas où les concentrations en métaux (et métalloïdes) excèdent les teneurs de fond naturelles ou les critères de niveau A du Guide d'intervention, il peut s'avérer nécessaire d'en analyser les teneurs dans les sulfures afin d'identifier les éléments pouvant contribuer à la contamination des eaux de drainage, notamment les impuretés comme As, Co, Ni et Se dans la pyrite [FeS₂] et la pyrrhotite [FeS], Cd dans la sphalérite [ZnS], Pb, As et Se dans la chalcopryrite [CuFeS₂], Co dans l'arsénopyrite [FeAsS], pour ne nommer que quelques exemples possibles. Dans certains cas, cette information peut être demandée pour permettre une prédiction plus précise du potentiel de lixiviation des matériaux miniers.

Pour les matériaux contenant des sulfures, les principaux minéraux neutralisants doivent être identifiés afin d'interpréter correctement les résultats des essais de prédiction du potentiel acidogène de ces matériaux et de mieux prédire leur comportement géochimique.

Identification et quantification d'autres minéraux potentiellement problématiques

Lorsque les données minéralogiques préliminaires indiquent l'éventuelle présence de sulfates qui peuvent représenter une source potentielle d'acidité, de métaux toxiques, de cations majeurs et d'ions sulfates (comme la jarosite [KFe₃(OH)₆(SO₄)₂]), ou la présence de minéraux facilement solubles à l'eau qui peuvent devenir une source de toxicité de l'effluent minier (comme l'halite [NaCl]) ou d'autres minéraux potentiellement problématiques comme ceux pouvant libérer des fibres d'amiante dans l'environnement, une analyse minéralogique plus détaillée est requise afin de confirmer leur présence et d'en évaluer l'impact sur le potentiel de contamination des matériaux caractérisés.

Lorsque la présence d'amiante est suspectée, une caractérisation plus détaillée doit être réalisée selon la méthode prescrite par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ).

Identification et quantification des minéraux ayant une capacité de sorption

Certains minéraux ont des capacités de sorption permettant de retenir les métaux présents dans les eaux de drainage en modifiant ainsi leurs caractéristiques chimiques (exemple : kaolinite, micas, feldspaths, argiles, oxyhydroxyde de fer, etc.). Lorsque la composition chimique et minéralogique des matériaux testés indique un potentiel de lixiviation (exemple : présence de traces de métaux ou métalloïdes toxiques dans les sulfures, sels, oxydes), la présence des minéraux ayant une capacité de sorption devrait être documentée de manière plus détaillée afin d'évaluer avec plus de précision le potentiel de lixiviation et de vérifier la possibilité de génération de drainage neutre contaminée (DNC) à long terme. La décision de réaliser une telle caractérisation s'appuie sur le jugement professionnel basé sur les paramètres cités précédemment.

4.2.3.3 Méthodes d'analyse minéralogique

Plusieurs données minéralogiques pertinentes pour la caractérisation environnementale des matériaux miniers sont déjà rassemblées à l'étape d'exploration du gisement et peuvent être facilement obtenues par l'entremise des géologues de la mine. L'identification et la quantification minéralogique peuvent être réalisées en faisant intervenir par exemple, mais sans s'y limiter, la microscopie optique, les calculs minéralogiques, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX).

Au besoin, les méthodes de microscopie optique et de microscopie électronique à balayage (MEB) peuvent être utilisées pour une analyse plus détaillée de la microstructure des échantillons. La technique de MEB couplée à la microanalyse par spectrométrie à sélection d'énergie (EDS) ou par spectrométrie à dispersion de longueurs d'onde (WDS), incluant les techniques de minéralogie quantitative automatisée (exemple : QEMSCAN, TIMA et autres), peut être utilisée pour déterminer la quantité et la composition chimique des minéraux d'intérêt. Si nécessaire, la microanalyse par sonde électronique (EPMA), la microsonde ionique (SIMS) et certaines autres techniques de microanalyse permettent de déterminer les teneurs en éléments traces métalliques dans les minéraux problématiques.

En général, il est recommandé de combiner les informations minéralogiques obtenues au moyen de différentes techniques, ce qui permet une meilleure appréciation des résultats et une caractérisation plus précise de la composition minéralogique.

4.2.4 Détermination de la granulométrie et d'autres caractéristiques géotechniques

Les propriétés géotechniques, notamment la granulométrie, la densité relative, le degré de saturation en eau, la porosité, la surface spécifique et autres caractéristiques, peuvent affecter la réactivité des matériaux miniers et devraient être documentées.

Au minimum, les données sur la distribution granulométrique des résidus miniers d'usinage sont requises. Ces données sont nécessaires pour distinguer les résidus miniers générés de façon distincte l'un de l'autre et qui présentent une distribution granulométrique différente (exemple : résidus grossiers et fins). Lorsque des résidus miniers de distributions granulométriques différentes sont générés, les essais recommandés dans le présent Guide doivent être réalisés sur chaque type de résidu (à ne pas confondre avec les différentes fractions granulométriques présentes dans le même type de résidu et dont la caractérisation séparée n'est pas requise). L'analyse granulométrique des matériaux permet également d'estimer certaines propriétés hydrogéologiques dont la connaissance est souvent nécessaire à des étapes avancées de caractérisation (exemple : conductivité hydraulique, courbe de rétention d'eau, surface spécifique, etc.).

Au besoin, l'analyse de densité relative au pycnomètre à hélium peut être effectuée lorsque la présence de certains minéraux a une incidence significative sur la densité relative des échantillons. Cette analyse permet d'estimer la minéralogie générale des échantillons à partir d'un calibrage spécifique au cas d'étude (exemple : teneur en soufre par rapport à densité relative). De plus, la densité relative est une donnée essentielle aux calculs relatifs aux relations masse-volume, tels que la porosité et le degré de saturation en eau.

4.3 Essais et méthodes d'analyse réalisés à l'étape de caractérisation ciblée

Les essais minimalement exigés à l'étape de caractérisation ciblée en vue de classement des matériaux miniers incluent :

- Essais de prédiction du potentiel de génération d'acide (section 4.3.1);
- Essais de prédiction du potentiel de lixiviation (section 4.3.2).

Dans certains cas, une étude minéralogique détaillée est nécessaire pour statuer sur le potentiel de génération d'acide et le potentiel de lixiviation des matériaux miniers (voir section 4.2.3.2.). D'autres analyses, comme une analyse des propriétés radioactives, de l'inflammabilité, de la contamination organique, peuvent être nécessaires selon la nature du minerai exploité et les résidus miniers générés.

4.3.1 Essais de prédiction du potentiel de génération d'acide

Les recommandations du Ministère concernant l'évaluation du potentiel de génération d'acide et le classement des matériaux miniers en fonction des résultats d'essais de prédiction du DMA sont résumées dans le diagramme décisionnel de la figure 4.1.

Les principales caractéristiques des matériaux pouvant influencer la génération du DMA comprennent la quantité et la réactivité des sulfures et des minéraux neutralisants ainsi que leur disponibilité aux réactions géochimiques et aux processus biologiques responsables de la génération d'acide. La démarche d'évaluation du potentiel acidogène commence donc par l'analyse des données relatives à la composition chimique et minéralogique des échantillons, obtenues aux étapes précédentes de l'étude de caractérisation.

4.3.1.1 Démarches à suivre pour les matériaux à faible teneur en soufre ($S_{total} < 0,04 \%$)

Il est considéré dans le présent Guide que les matériaux miniers caractérisés par de très faibles teneurs en soufre, inférieure au critère générique A du Guide d'intervention ($S_{total} < 0,04 \%$), ne sont pas susceptibles de générer du DMA. Les matériaux dont la teneur en S_{total} ne dépasse pas 0,04 % peuvent être classés comme étant non acidogènes sans procéder aux essais supplémentaires (figure 4.1). Lorsque l'analyse minéralogique confirme la présence de sulfates primaires ou de sulfates générés lors du procédé de traitement du minerai qui ne sont pas susceptibles de contribuer à la génération d'acide, les teneurs en soufre sulfate peuvent être déduites des valeurs de S_{total} . Lorsque cette option est utilisée, une justification détaillée doit être fournie.

4.3.1.2 Démarches à suivre pour les matériaux dont la teneur en S_{total} est supérieure à 0,04 %

Tous les matériaux dont la teneur en S_{total} est supérieure à 0,04 % doivent être soumis aux essais statiques de prédiction du DMA. Selon les résultats des essais statiques, les matériaux sont classés de façon préliminaire dans les deux groupes : potentiellement acidogènes et non acidogènes. Plus de détails sur les exigences du Ministère quant aux essais statiques, ainsi que les critères de classement préliminaire, sont présentés à la section 4.3.1.4.

4.3.1.3 Démarches à suivre pour les matériaux à forte teneur en soufre ($S_{total} > 5 \%$)

Peu importe les résultats des essais statiques, les matériaux à forte teneur en soufre ($S_{total} > 5 \%$) devraient être testés de manière plus rigoureuse afin d'évaluer le risque de DMA. Notamment, ces matériaux devraient être soumis aux essais cinétiques afin de vérifier si les taux des réactions d'oxydation/neutralisation sont propices au développement local des milieux acides et au relâchement de métaux en phase aqueuse, même pour les résidus présentant un fort potentiel de neutralisation. Toutefois, deux options sont possibles (figure 4.1).

Option I : considérer ces matériaux *de facto* comme étant acidogènes sans aucune période de latence avant le début de génération du DMA sans effectuer les essais cinétiques;

Option II : procéder aux essais cinétiques afin de vérifier le potentiel de génération d'acide et, le cas échéant, évaluer le délai avant le début de génération du DMA.

4.3.1.4 Évaluation du potentiel de génération d'acide à l'aide des essais statiques

Afin de satisfaire les exigences du Ministère, les essais statiques chimiques réalisés selon la méthode validée par le CEAEQ pour le domaine d'accréditation correspondant, ou par la méthode de Sobek et ses collaborateurs (1978) modifié par Lawrence et Wang (1997), sont minimalement exigés (voir l'annexe B pour les méthodes de référence). En complément aux essais statiques obligatoires, des essais statiques supplémentaires, comme les essais NAG (Miller et collab., 1997 ; MEND, 2009) ou les tests statiques minéralogiques (UQAT, 2015), peuvent être utilisés. Les résultats des essais supplémentaires seront également pris en considération lors de l'analyse du dossier.

Interprétation des résultats des essais statiques

À la suite des essais statiques, la classification préliminaire des matériaux se fait en comparant le potentiel d'acidité (PA) et le potentiel de neutralisation d'acide (PN) selon deux critères de classification : le pouvoir net de neutralisation ($PNN = PN - PA$) et le rapport PN/PA . En fonction des valeurs de PNN et PN/PA obtenues, les matériaux sont classés de façon préliminaire en deux catégories : potentiellement acidogènes et non acidogènes.

Les matériaux sont considérés comme « potentiellement acidogènes » si le potentiel du DMA a été confirmé en répondant à au moins une des deux conditions suivantes :

- le PNN est inférieur à 20 kg CaCO₃/tonne de matériaux;
- le rapport PN/PA est inférieur à 2.

Dans tous les autres cas, les matériaux sont considérés comme « non acidogènes » selon les résultats des essais statiques.

Dans certains cas, selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation, l'utilisation privilégiée de l'un des deux critères imposés ci-dessus (PN/PA ou PNN) peut être acceptable (exemple : matériaux caractérisés par de grandes valeurs de PA, pour lesquels l'utilisation du critère PN/PA=2 ne serait pas pertinente). Cependant, des explications doivent être présentées pour justifier le classement des matériaux basé sur l'utilisation privilégiée d'un seul critère.

4.3.1.5 Démarches à suivre en fonction des résultats des essais statiques

Pour les matériaux considérés de façon préliminaire comme étant potentiellement acidogènes, il est possible de choisir entre les deux options suggérées ci-dessous :

Option I : considérer ces matériaux comme étant acidogènes sans aucune période de latence avant le début de génération du DMA sans effectuer les essais cinétiques;

Option II : procéder aux essais cinétiques afin de vérifier le potentiel de génération d'acide et d'évaluer le délai avant le début de génération du DMA.

Pour les matériaux considérés comme étant non acidogènes sur la base des essais statiques, une analyse de l'ensemble des données disponibles doit être réalisée afin de juger de la nécessité de poursuivre la caractérisation avec les essais cinétiques. À cette étape, la représentativité des échantillons, les résultats de la caractérisation chimique et minéralogique, la disponibilité anticipée des sulfures et des minéraux neutralisants aux réactions d'oxydation/neutralisation et toute autre information pertinente doivent être considérés de façon rigoureuse (voir la case marquée d'une étoile sur le diagramme décisionnel de la figure 4.1). Lorsque les données disponibles permettent de soupçonner une possibilité de génération d'acide, il est possible de choisir entre les deux options suggérées ci-dessus, notamment les options I et II avec ou sans essais cinétiques de vérification.

Dans le cas où toutes les données disponibles indiquent clairement que les échantillons testés ne sont pas susceptibles de générer du DMA, le classement des matériaux comme étant « non acidogènes » peut être effectué sans procéder à des essais cinétiques de prédiction du DMA. Une argumentation valable doit être présentée pour justifier cette démarche de classement. Il est possible que les matériaux considérés comme étant « non acidogènes » sans recours à des essais cinétiques doivent quand même être soumis aux essais cinétiques pour évaluer le potentiel de lixiviation de contaminants tels que les métaux et métalloïdes toxiques ou autres substances nocives pour l'environnement, selon les prescriptions présentées à la section 4.3.2.

4.3.1.6 Évaluation du potentiel de génération d'acide à l'aide des essais cinétiques

Une évaluation plus précise du potentiel de génération du DMA peut être obtenue à l'aide des essais cinétiques (de tels essais permettent également d'évaluer le potentiel de lixiviation des matériaux et les risques de génération du DNC – voir section 4.3.2.3).

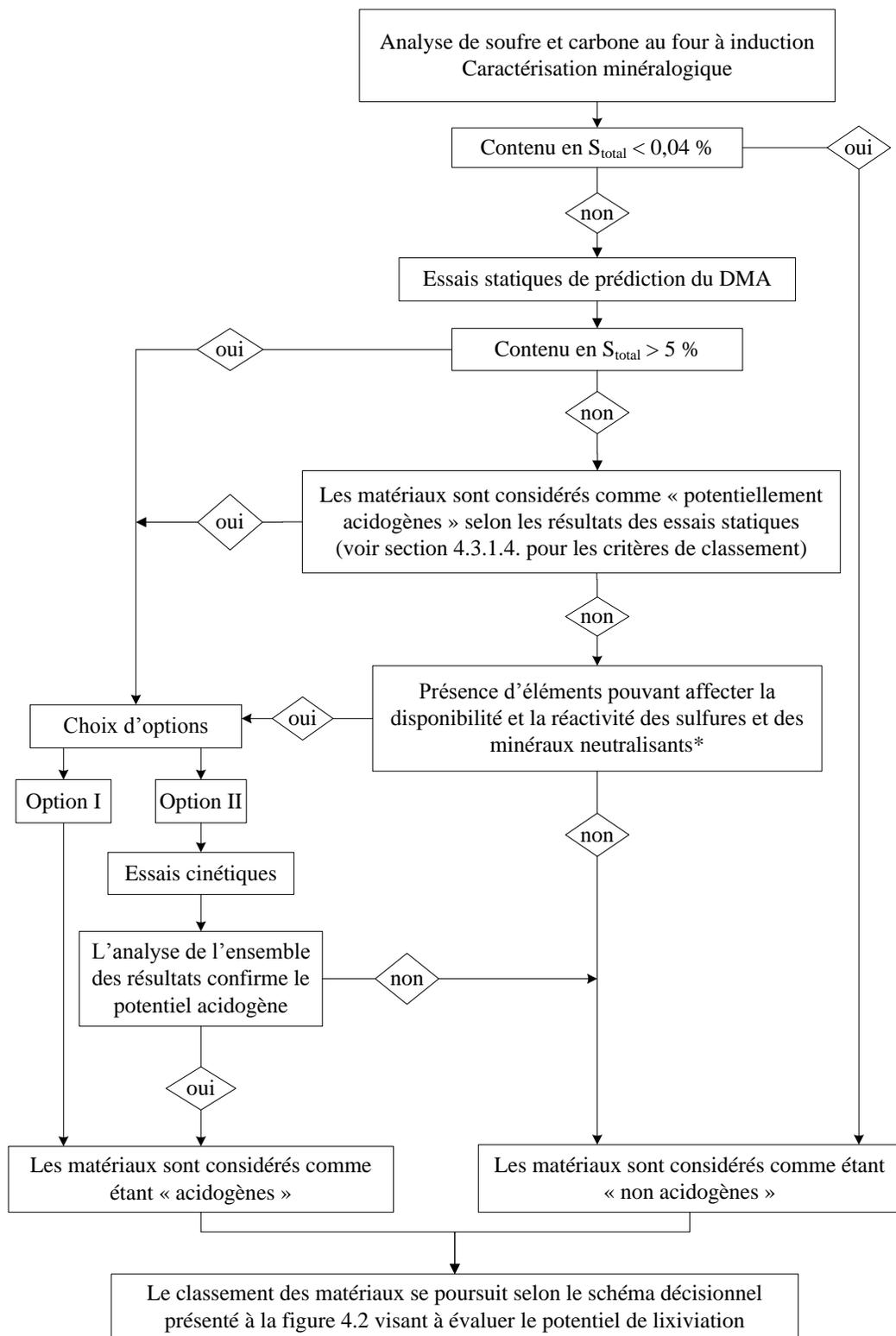


Figure 4.1 Évaluation du potentiel de génération d'acide et classement des matériaux

* Une argumentation valable doit être présentée pour justifier cette démarche de caractérisation.

Les essais cinétiques de prédiction du DMA servent à simuler une oxydation accélérée des sulfures dans les conditions d'exposition contrôlée des matériaux miniers à l'air et à l'eau. Les protocoles des essais cinétiques permettent de suivre l'évolution de la qualité des lixiviats dans le temps, d'estimer les taux des réactions d'oxydation des sulfures et de neutralisation de l'acidité générée et de prédire, à partir de données obtenues, le potentiel de génération d'acide à court et à long terme. Les résultats des essais cinétiques sont aussi utilisés pour estimer le délai avant le début du DMA pour les matériaux acidogènes.

Les recommandations relatives à la prise de décision quant à la nécessité des essais cinétiques pour la prédiction du DMA sont présentées à la figure 4.1. Il est important de se rappeler que les essais cinétiques sont de longue durée et peuvent s'étaler sur plusieurs années, au besoin. Lorsqu'ils sont jugés nécessaires, les essais cinétiques doivent être amorcés le plus tôt possible dans le processus de caractérisation des matériaux visés. La représentativité des échantillons sélectionnés pour les essais cinétiques doit être démontrée à l'aide des données statistiques (voir section 3.3.2).

Les essais cinétiques faits en laboratoire répondant aux exigences du Ministère en matière de prédiction du potentiel du DMA sont les essais en cellules humides et les essais en colonne. Le choix des essais à réaliser devrait être fait en fonction des objectifs.

Essais cinétiques en cellules humides

Étant normés par l'ASTM (ASTM D5744), ces essais sont réalisés dans les conditions contrôlées et bien définies selon un protocole strict permettant d'obtenir des résultats reproductibles. Il serait pertinent d'opter pour cette méthode lorsque le principal objectif est d'estimer les taux de réactions d'oxydation/neutralisation et de prédire si les matériaux testés seraient générateurs du DMA à court et à long terme. Cependant, cette méthode n'est pas conçue pour prédire la qualité des eaux de drainage pour les raisons décrites à la section 4.3.2.3 portant sur l'évaluation du potentiel de lixiviation à l'aide des essais cinétiques. Aussi, ces essais ne permettent pas de vérifier la réactivité des matériaux et le délai avant le début de la génération du DMA pour les différents scénarios de gestion.

Essais cinétiques en colonne

N'étant pas normalisés, les essais cinétiques en colonne peuvent être adaptés aux objectifs. Ces essais peuvent être utilisés pour vérifier le potentiel acidogène des résidus miniers à court et à long terme et pour prédire le délai avant le début de génération du DMA. De plus, ces essais permettent d'obtenir les données sur la qualité de l'eau de drainage dans des conditions plus représentatives du site minier et de simuler différents modes de gestion des résidus miniers ou scénarios de restauration des aires d'accumulation (MEND, 2009 ; UQAT, 2015). Le protocole de montage et de démontage des colonnes, les conditions d'arrosage et le choix des paramètres géochimiques mesurés sur les lixiviats générés lors des essais cinétiques en colonne sont établis en fonction des objectifs.

Interprétation des résultats des essais cinétiques pour la prédiction du potentiel du DMA

Les données obtenues lors des essais cinétiques de prédiction du DMA doivent être interprétées de manière à évaluer le potentiel acidogène des matériaux à court et à long terme. La prédiction du potentiel acidogène à long terme peut être faite, par exemple, à l'aide d'un calcul des taux d'épuisement minéralogique permettant d'évaluer quels minéraux, acidifiants ou neutralisants, seraient épuisés en premier, ou par la méthode des courbes d'oxydation/neutralisation (Benzaazoua et collab., 2004). Cette méthode est basée sur l'utilisation des charges cumulées et normalisées de SO₄ et de Ca+Mg+Mn considérés respectivement comme marqueurs de l'oxydation des sulfures et de la neutralisation de l'acidité produite.

Pour les résidus considérés comme potentiellement acidogènes, le délai avant le début de la génération du DMA doit être estimé en se basant sur les cycles de rinçage et les taux d'épuisement du PA et du PN observés au laboratoire et adaptés aux conditions climatiques des sites miniers.

4.3.1.7 Essais d'auto-échauffement

La sensibilité des matériaux miniers sulfurés au phénomène d'auto-échauffement doit être évaluée. Dans certains cas, selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation, la réalisation d'essais spéciaux visant à vérifier le potentiel d'auto-échauffement de façon plus précise serait nécessaire, surtout pour les matériaux riches en pyrrhotite (Rosenblum et Spira, 1995 ; Rosenblum et collab., 2001 ; 2014).

Les protocoles d'essais utilisés doivent permettre la prédiction du potentiel d'auto-échauffement des matériaux subissant l'altération progressive par oxydation des sulfures. Le but de ces essais est de statuer sur la nécessité de mettre en place des mesures d'atténuation supplémentaires afin de réduire les risques d'ignition dans les aires d'accumulation ou dans les chantiers souterrains remblayés avec des résidus miniers sulfurés ou de tenir compte de l'émission possible de gaz toxiques.

Lorsqu'il est jugé nécessaire d'évaluer le potentiel d'auto-échauffement des stériles et du minerai, la fraction fine des matériaux, définie par les spécialistes responsables de l'étude de caractérisation, devrait être soumise aux essais d'auto-échauffement.

4.3.2 Essais de prédiction du potentiel de lixiviation

La prédiction du potentiel de lixiviation de contaminants tels que les métaux et métalloïdes toxiques et autres substances nocives pour l'environnement constitue un élément très important d'une étude de caractérisation, puisque la gestion des matériaux miniers classés comme étant « lixiviables » requiert des mesures particulières de protection des eaux souterraines. Les principaux objectifs de ce volet de l'étude de caractérisation sont les suivants :

- le classement des matériaux en fonction du potentiel de lixiviation des contaminants;
- la prédiction de la qualité des eaux de drainage à court et à long terme.

Le potentiel de lixiviation des matériaux miniers est évalué au moyen de trois outils de prédiction : l'analyse de la composition chimique, les essais de lixiviation et les essais cinétiques. Les recommandations du Ministère concernant l'évaluation du potentiel de lixiviation des matériaux miniers sont résumées dans le diagramme décisionnel de la figure 4.2. Les étapes présentées dans les sections subséquentes devraient être suivies pour évaluer le potentiel de lixiviation des matériaux et les classer en fonction des risques environnementaux anticipés.

4.3.2.1 Identification des éléments d'intérêt environnemental dans la fraction solide

L'objectif de cette étape est de déterminer si les essais supplémentaires sont nécessaires pour le classement des matériaux miniers selon le potentiel de lixiviation. Au cours de cette étape, la composition chimique de la fraction solide des matériaux est comparée avec les teneurs de fond naturelles ou les critères génériques pour les sols des annexes 1 et 2 de la version la plus récente du Guide d'intervention. Les teneurs de fond naturelles ne peuvent être déterminées à partir d'un secteur où le sol a été contaminé par des activités industrielles. De plus, les teneurs en métaux présents dans le gîte minéral ne peuvent être considérées pour établir la teneur de fond locale puisqu'elles sont plutôt représentatives d'une anomalie très localisée.

Les substances qui dépassent les teneurs de fond naturelles ou les critères génériques A du Guide d'intervention sont considérées de façon préliminaire comme les éléments d'intérêt dont le potentiel de lixiviation doit être évalué à l'aide des essais de lixiviations et, au besoin, des essais cinétiques. Les matériaux dont les concentrations en métaux, métalloïdes et autres composés extractibles ne dépassent pas les teneurs de fond naturelles (ou les critères génériques A du Guide d'intervention) ne requièrent pas d'essais de lixiviation supplémentaires et ne sont pas considérés comme « lixiviables » (figure 4.2).

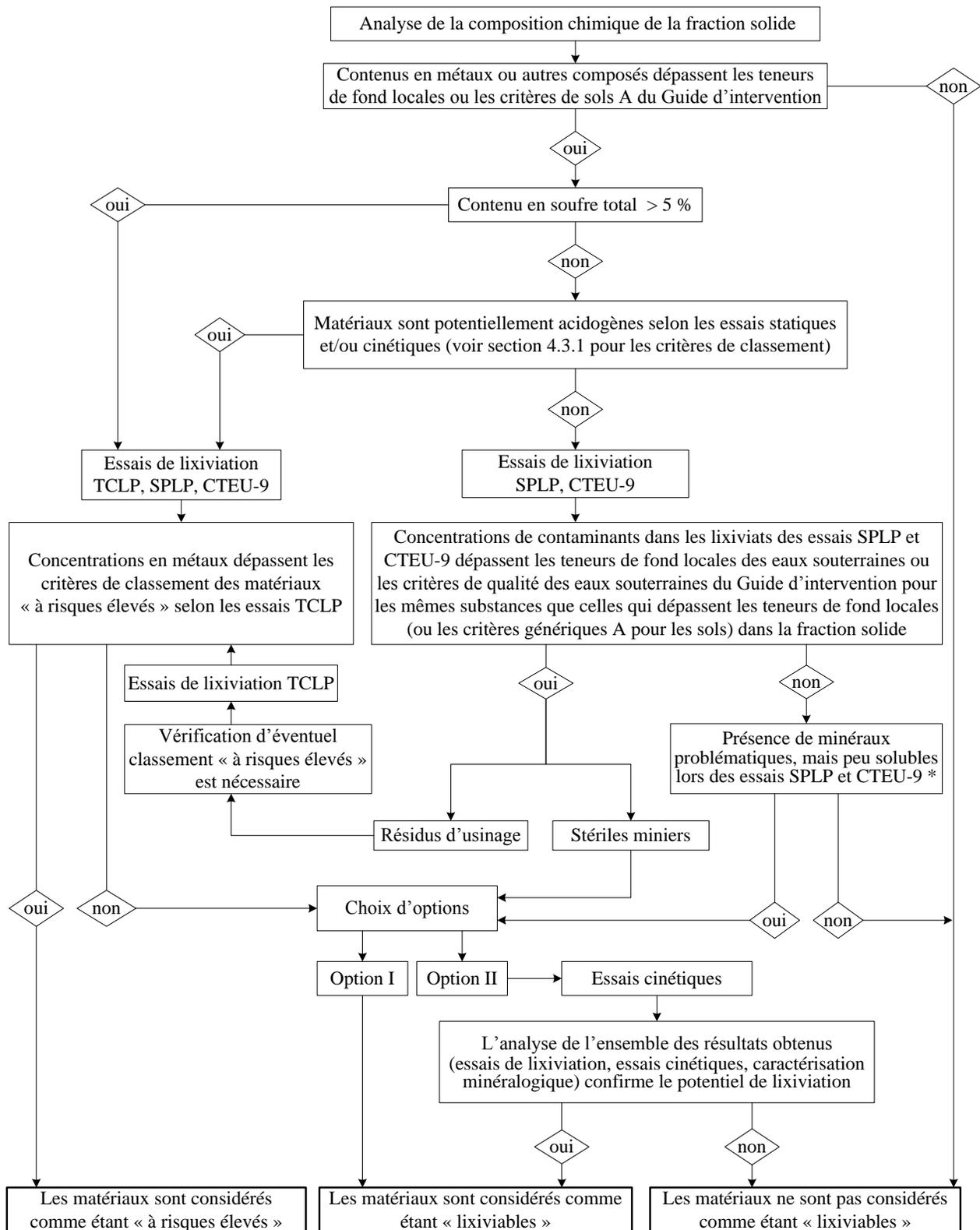


Figure 4.2 Évaluation du potentiel de lixiviation et classement des matériaux

* Par exemple, en présence des traces des métaux toxiques dans les sulfures, sels, ou oxydes.

4.3.2.2 Évaluation de la mobilité potentielle des contaminants à l'aide des essais de lixiviation

Lorsque les concentrations obtenues lors de l'analyse de la composition chimique des matériaux sont supérieures aux teneurs de fond naturelles (ou les critères génériques A du Guide d'intervention), les essais de lixiviation doivent être effectués selon les protocoles permettant de tester la mobilité d'éléments d'intérêt dans les conditions de pH différentes : fortement acides (essai TCLP), faiblement acides (essai SPLP) et neutres (essai CTEU-9). Le but des essais de lixiviation est de comparer la composition des lixiviats avec les valeurs seuils pour détecter les contaminants qui pourraient être mobiles selon différentes conditions et qui pourraient causer des effets néfastes sur le milieu environnant. Les teneurs de fond naturelles des eaux souterraines ou les critères de qualité des eaux souterraines du Guide d'intervention sont utilisés comme valeurs seuils.

Le choix des essais minimalement requis doit être adapté aux caractéristiques acidogènes des matériaux testés. Pour les matériaux qui ne sont pas susceptibles de générer du DMA et dont le contenu en soufre total est inférieur à 5 %, la réalisation de deux essais de lixiviation, SPLP et CTEU-9, est requise (figure 4.2). Lorsque les concentrations en métaux, métalloïdes ou autres substances extractibles mesurées dans la fraction solide des matériaux testés sont supérieures aux teneurs de fond locales (ou les critères génériques A du Guide d'intervention) et que les concentrations en mêmes substances mesurées dans les lixiviats des essais SPLP ou CTEU-9 dépassent les teneurs de fond naturelles des eaux souterraines (ou les critères de qualité des eaux souterraines présentés à l'annexe 7 du Guide d'intervention), les matériaux sont considérés de façon préliminaire comme ayant un potentiel de lixiviation. De plus, pour des résidus miniers issus d'un procédé de traitement de minerai, les essais de lixiviation supplémentaires, selon le protocole TCLP, sont demandés pour vérifier si ces matériaux ne sont pas « à risques élevés ».

Lorsque les matériaux soumis aux essais TCLP produisent un lixiviats contenant un contaminant dont la concentration est supérieure aux critères énoncés dans l'annexe A du présent Guide, ces matériaux sont classés directement comme étant « à risques élevés ». Dans le cas contraire, deux options sont possibles (figure 4.2) :

Option I : classer les résidus comme étant « lixiviables » sans procéder aux essais cinétiques de vérification ;

Option II : vérifier le potentiel de lixiviation des résidus à l'aide d'essais cinétiques et les prendre en considération pour le classement définitif des matériaux testés.

Si les résultats des essais SPLP ou CTEU-9 ne confirment pas un potentiel de lixiviation, une évaluation supplémentaire doit être réalisée afin de juger de la nécessité de poursuivre la caractérisation avec les essais cinétiques, comme il est décrit dans la section 4.3.2.3.

Pour les matériaux caractérisés par des teneurs élevées en soufre ($S_{total} > 5\%$) et pour ceux qui sont considérés comme étant « potentiellement acidogènes » selon les essais statiques ou cinétiques, la réalisation de trois essais de lixiviation, TCLP, SPLP et CTEU-9, est requise (figure 4.2). Les essais TCLP sont exigés pour ce type de matériaux afin d'évaluer leur potentiel de lixiviation dans les conditions fortement acides pouvant exister dans les aires d'accumulation des résidus générateurs d'acide ou des résidus ayant de fortes teneurs en soufre. Dans le cas où les matériaux ne sont pas classés comme étant à risques élevés selon les résultats des essais TCLP, ils doivent être soumis aux essais cinétiques pour évaluer leur potentiel de lixiviation dans les conditions favorables à l'oxydation des sulfures et à la génération du DMA. Une autre option possible est de les classer *de facto* comme étant lixiviables sans procéder aux essais cinétiques (voir les options I et II suggérées ci-dessus et à la figure 4.2).

Les essais TCLP, SPLP et CTEU-9 sont normalisés par le CEAEQ dans le cadre de la méthode MA. 100 – Lix.com.1.1 *Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques* (CEAEQ, 2012). Pour les résidus miniers d'usage, le protocole des essais TCLP, SPLP et CTEU-9 inclut le dosage de contaminants dans la fraction liquide et exige que les échantillons transmis au laboratoire ne soient pas filtrés pour séparer la fraction

solide, mais soient prélevés sous forme de boues en préservant les proportions originales de la fraction liquide et solide, telles qu'elles sont acheminées dans une aire d'accumulation.

4.3.2.3 Évaluation du potentiel de lixiviation à l'aide des essais cinétiques

Il est fortement recommandé de procéder aux essais cinétiques pour tous les matériaux présentant un potentiel de lixiviation afin de faire une évaluation plus précise de la charge chimique apte à être relâchée dans l'eau de contact. Les cas où les essais cinétiques seraient exigés pour la prédiction du potentiel de lixiviation des matériaux miniers sont résumés à la figure 4.2.

Dans certains cas, l'analyse des données minéralogiques serait essentielle pour la prise de décisions concernant la réalisation des essais cinétiques pour la prédiction du potentiel de lixiviation. Par exemple, les essais cinétiques seraient nécessaires lorsque les matériaux miniers révèlent la présence de minéraux problématiques peu solubles (voir section 4.2.3.2.) lors des essais de lixiviation de courte durée (SPLP et CTEU-9). Il est cependant possible de choisir une autre option permettant de procéder au classement final sans effectuer les essais cinétiques, à la condition que ces matériaux soient classés *de facto* comme étant lixiviables.

Les essais cinétiques de prédiction du potentiel de lixiviation sont semblables aux essais cinétiques réalisés pour évaluer le potentiel du DMA (voir section 4.3.1.6.). Il est donc recommandé de mener l'évaluation du potentiel du DMA et l'évaluation du potentiel de lixiviation en parallèle afin de planifier de manière optimale les essais cinétiques en fonction des objectifs.

Essais cinétiques recommandés pour la prédiction du potentiel de lixiviation

Les essais cinétiques réalisés en colonne ainsi que sur des parcelles expérimentales de terrain sont à privilégier pour évaluer le potentiel de lixiviation des matériaux miniers. N'étant pas conçu pour prédire la qualité des eaux de drainage, un essai en cellule humide ne représente pas le meilleur choix pour évaluer le potentiel de lixiviation. Les essais en cellule humide peuvent sous-estimer la lixiviation des contaminants, surtout pour les résidus faiblement réactifs. De plus, cette méthode ne permet pas de simuler la précipitation et la dissolution des minéraux secondaires, qui peuvent être déterminantes pour la chimie des eaux de drainage dans les conditions naturelles. En effet, les rinçages fréquents et le rapport liquides/solides élevé engendrent le lessivage complet des produits d'oxydation et minimisent la précipitation de minéraux secondaires lors des essais en cellule humide, ce qui ne correspond pas aux conditions de terrain. Ainsi, la prédiction de la qualité des eaux de drainage à partir des données obtenues lors des essais en cellules humides exige des vérifications et des précautions supplémentaires (MEND, 2009; INAP, 2014; UQAT, 2015).

Pour obtenir une évaluation plus juste et précise du potentiel de lixiviation des matériaux miniers, il est donc préférable de procéder avec les essais cinétiques en colonne permettant l'établissement de conditions géochimiques plus représentatives de celles de terrain. Le protocole de montage et de démontage des colonnes, les conditions d'arrosage et le choix des paramètres géochimiques mesurés sur les lixiviats générés lors des essais en colonne sont établis en fonction des objectifs (UQAT, 2015). La durée des essais est également établie selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de l'étude de caractérisation et peut varier en fonction des caractéristiques des matériaux testés et des objectifs des essais. Typiquement, les essais cinétiques en colonne sont arrêtés lorsque les concentrations des contaminants détectés dans les lixiviats se sont stabilisées.

Le choix d'un essai cinétique peut cependant être restreint par la quantité limitée de matériaux disponibles. Pour les projets en développement, la quantité des résidus provenant d'une usine pilote peut être insuffisante pour monter une colonne. La réalisation d'un essai en cellule humide s'avère alors une solution de rechange et les résultats obtenus seront pris en considération. Pour les mines en exploitation, il est recommandé de réaliser les essais cinétiques sur les résidus ayant déjà subi de l'altération à la suite de l'exposition aux conditions environnementales ainsi que sur les résidus fraîchement produits afin de comparer la qualité de l'eau de drainage, la minéralogie à la fin des essais, les PA et PN, la capacité de sorption, etc.

Interprétation des résultats des essais cinétiques pour la prédiction du potentiel de lixiviation

Pour interpréter les résultats des essais cinétiques, les concentrations des contaminants détectés dans les lixiviats lors de tous les cycles de lixiviation sont comparées avec les valeurs seuil (les teneurs de fond naturelles ou les critères de qualité des eaux souterraines du Guide d'intervention). Les résultats obtenus lors des premiers cycles de lixiviation (*first flush*) devraient être également analysés afin d'évaluer leur influence sur le potentiel de lixiviation global des matériaux testés. La durée et l'amplitude de dépassement des valeurs seuils pendant les premiers cycles de lixiviation, l'identification de minéraux facilement solubles pouvant être à l'origine des dépassements et les risques de contamination des eaux souterraines doivent être pris en considération.

Dans le cas où les concentrations de contaminants ne se sont pas stabilisées au moment de l'interprétation des résultats et démontrent une tendance à la hausse, des explications doivent être fournies concernant les processus géochimiques responsables de lixiviation ainsi que les risques et l'ampleur attendue de dépassement des valeurs seuils à long terme.

Le classement définitif des matériaux soumis aux essais cinétiques se fait en prenant en considération l'ensemble des données disponibles, incluant les résultats de tous les essais de lixiviation réalisés, les données de la caractérisation minéralogique, la composition chimique de la fraction liquide des résidus issus de l'usine de traitement de minerai et d'autres données pertinentes.

Évaluation du potentiel de sorption

Lors de l'interprétation des essais cinétiques, il est nécessaire de tenir compte d'éventuels phénomènes de sorption pouvant retarder le début de la détérioration de la qualité des eaux de drainage. À la fin de l'essai, il est notamment essentiel d'investiguer la présence des minéraux secondaires formés dans les matériaux testés et de vérifier le comportement d'éventuels minéraux sorbants pouvant retenir temporairement les métaux lixiviables à l'intérieur des colonnes. De plus amples informations sur les méthodes disponibles pour l'évaluation du potentiel de sorption des résidus miniers peuvent être obtenues dans le rapport de l'UQAT (2015).

4.3.3 Vérification de la qualité de la fraction liquide des résidus miniers

La composition chimique de la fraction liquide de tous les matériaux miniers acheminés dans une aire d'accumulation des résidus miniers doit être vérifiée afin de s'assurer que les lixiviats qui vont percoler ne vont pas présenter de risque de contamination pour les eaux souterraines (exemple : résidus miniers d'usinage sous forme de boues, boues de traitement des eaux usées minières, etc.). Cette vérification se fait à l'aide des teneurs de fond naturelles (ou des critères de qualité des eaux souterraines du Guide d'intervention) et des critères énoncés dans l'annexe A du présent Guide afin de vérifier si ces matériaux ne sont pas « à risques élevés ».

La fraction liquide des matériaux miniers peut être contaminée par des produits chimiques utilisés dans le procédé de traitement du minerai (exemple : agents collecteurs, déprimants, moussants, floculants, solvants organiques, régulateurs de pH, etc.). Une contamination peut aussi être causée par des substances toxiques générées lors de l'exploitation minière (exemple : hydrocarbures, explosifs).

Pour les nouveaux projets, la qualité de la fraction liquide des résidus miniers générés lors des essais à l'usine pilote doit être analysée. Pour les projets existants, la fraction liquide des résidus miniers acheminés dans une aire d'accumulation sous forme de boues doit être échantillonnée à la sortie de l'usine de traitement.

Pour les matériaux sulfurés, la présence de thiosels dans les eaux de procédé peut conduire à la contamination du milieu récepteur et doit être vérifiée. Lorsque les thiosels sont rejetés dans l'environnement, ils peuvent contribuer à l'acidification des eaux réceptrices et à la dissolution des sédiments et la mise en solution de métaux potentiellement toxiques. La caractérisation des thiosels dans

les eaux de drainage des résidus miniers sulfurés est nécessaire afin de prévoir, le cas échéant, des mesures de prévention ou d'atténuation adéquates pour la protection du milieu récepteur.

4.3.4 Utilisation des facteurs d'échelle pour la prédiction de la qualité des eaux de drainage

Un des principaux objectifs de la caractérisation géochimique des matériaux miniers est d'obtenir les données nécessaires à l'évaluation de la qualité des eaux de drainage qui entrent en contact avec les différents matériaux, afin de prévoir un traitement adéquat des eaux minières avant leur rejet dans l'environnement. La prédiction de la qualité des eaux de drainage est aussi nécessaire pour fournir des données d'entrée pour les modélisations numériques de transport de contaminants dans les eaux souterraines. Les concentrations de contaminants obtenues lors des essais de laboratoire ne devraient pas être considérées directement comme celles qui seraient rencontrées sur le terrain. Les divergences entre les conditions d'essais effectués au laboratoire et celles de terrain, appelées les facteurs d'échelle, doivent être prises en considération pour la prédiction de la qualité des eaux de drainage.

Les principaux aspects à considérer lorsque des facteurs d'échelle sont appliqués pour la prédiction de la qualité des eaux de drainage sont les suivants :

- le bilan d'eau qui prend en considération les facteurs hydrologiques et hydrogéologiques *in situ* (degré de saturation en eau, quantité des précipitations directes sur les aires d'accumulation, données locales sur l'évaporation, coefficients de ruissellement, taux d'infiltration d'eau dans les empilements, etc.);
- la quantité de matériaux exposés à la lixiviation;
- la variabilité des caractéristiques des différentes unités géologiques ou des zones d'étude à l'intérieur des aires d'accumulation existantes;
- la température locale;
- la granulométrie des matériaux et autres facteurs.

En général, les résultats des essais cinétiques sont à privilégier comme données d'entrée dans les calculs de prédiction de la qualité des eaux de drainage puisqu'ils sont plus représentatifs de la réalité du terrain. Dans certains cas, il serait aussi convenable d'utiliser les résultats des essais de lixiviation de courte durée à des fins de simulation (par exemple, lorsque la durée des essais cinétiques n'était pas suffisante pour générer du DMA ou du DNC). Dans tous les cas, il faut utiliser une approche conservatrice dans le choix des données d'entrée pour les modélisations numériques et le jugement professionnel est nécessaire afin de faire les choix adéquats. Idéalement, des modélisations de deux types devraient être réalisées, soit une modélisation « réaliste » et une modélisation présentant le pire cas possible. Dans tous les cas, la présentation des résultats de modélisation devrait inclure une discussion sur les sources d'incertitude associée à la prédiction de la qualité des eaux minières, les hypothèses retenues et les limites des modèles conceptuels utilisés.

4.3.5 Essais de terrain

En règle générale, les essais de terrain sont des essais cinétiques à plus grande échelle réalisés directement sur les sites miniers dans le but d'étudier le comportement géochimique des matériaux miniers dans les conditions les plus représentatives de la réalité. Les essais de terrain servent à valider les conclusions découlant des essais de laboratoire et permettent de tester les scénarios de gestion des résidus miniers ou les concepts de restauration. Les modalités des essais de terrain, incluant la conception des essais, les instruments de mesure utilisés, les paramètres analysés, la fréquence et la durée des suivis, sont établies au cas par cas, selon le jugement professionnel des spécialistes responsables de la réalisation

des essais de terrain. Pour certains projets, les modalités des essais de terrain sont définies dans les autorisations ministérielles.

Les principaux types d'essais de terrain sont les essais en barils et les parcelles expérimentales de terrain, aussi appelées cellules de terrain. De plus amples informations sur les essais de terrain peuvent être obtenues dans le rapport de l'UQAT (2015).

4.3.6 Évaluation de la radioactivité des matériaux miniers

La radioactivité des matériaux miniers provient principalement de l'uranium-238 [U-238], du thorium-232 [Th-232] et des autres radionucléides naturels constituant leurs chaînes de désintégration qui peuvent être présents en concentrations variables dans de nombreux minéraux, notamment :

- les minéraux d'uranium et de thorium;
- les minéraux de terres rares;
- les minéraux de niobium;
- les minéraux de tantale;
- les minéraux de zirconium;
- les minéraux de titane;
- les phosphates.

Une évaluation préliminaire de la radioactivité potentielle des matériaux est faite sur la base des connaissances du type de gisement exploité, de la composition chimique et minéralogique du minerai ou de la détection directe de la radioactivité à l'aide de détecteurs de rayonnement.

Certaines exploitations minières sont plus susceptibles de contenir des minéraux comportant des teneurs élevées en radionucléides (notamment, les mines d'uranium, de terres rares, de tantale, de niobium, de lithium, de phosphates ou de graphite). Pour ces types d'exploitations, une évaluation du potentiel radioactif doit être réalisée de manière plus détaillée. Par ailleurs, lorsque la présence potentielle de la radioactivité est exclue et que la détermination de l'activité massique des radionucléides (calcul de la valeur du coefficient S) ne s'avère pas nécessaire, une justification basée sur les analyses chimiques de l'uranium et du thorium au minimum (et autres études pertinentes) doit être fournie.

Lorsque la présence de la radioactivité est soupçonnée, les caractéristiques radioactives des matériaux doivent être évaluées en suivant le diagramme décisionnel présenté à la figure 4.3. Dans un premier temps, la présence de l'équilibre séculaire doit être démontrée. Par la suite, le calcul de la valeur du coefficient S doit être réalisé à l'aide de l'équation [1] présentée à la section 1.3.6.

Dans le cas où les résidus miniers d'usinage seraient acheminés dans une aire d'accumulation sous forme de boues, lors de l'évaluation de la radioactivité, l'échantillonnage du résidu minier doit être représentatif des conditions de terrain. Le calcul du coefficient S s'effectue sur le total des radionucléides de la fraction liquide et solide du résidu minier échantillonné.

4.3.6.1 Vérification de l'équilibre

Pour évaluer s'il y a présence d'un équilibre, il faut vérifier si les activités des radionucléides d'une chaîne de désintégration sont égales entre elles ou égales à un facteur près. Les radionucléides recommandés pour la vérification de l'équilibre dans les matériaux miniers sont au minimum les suivants :

- Série uranium-238 : U-238, Ra-226, Pb-210;
- Série thorium-232 : Th-232, Ra-228 (ou Ac-228), Th-228.

De plus amples informations sur la méthode de vérification de l'équilibre dans les matériaux miniers peuvent être obtenues dans le document intitulé *Radionucléides recommandés pour l'analyse de la radioactivité dans les matrices environnementales* (MDDELCC, 2017). Si les résultats laissent croire que l'équilibre n'est pas présent, il pourrait être nécessaire de faire l'analyse d'un nombre plus élevé de radionucléides.

4.3.6.2 Activité massique C

Pour le calcul de la valeur S, il faut connaître l'activité massique C et l'activité massique maximale A pour chaque radionucléide présent dans les matériaux caractérisés (voir section 1.3.6). Dans la majorité des cas, la méthode de la spectrométrie gamma est utilisée pour déterminer les activités massiques des éléments radioactifs présents dans les matériaux miniers. Généralement, les analyses par spectrométrie gamma à réaliser seraient les mesures de l'activité des émetteurs gamma des séries naturelles de l'uranium-238, de l'uranium-235 et du thorium-232 ainsi que la mesure de l'activité du potassium-40, comme le montre le tableau C-1 de l'annexe C.

Par ailleurs, tous les émetteurs gamma d'une chaîne de désintégration n'ont pas à être mesurés pour déterminer l'activité massique C. Pour certains radionucléides, en l'absence d'une mesure, l'activité massique C peut être estimée à partir de données disponibles pour les radionucléides qui les précèdent ou qui les suivent dans une chaîne de désintégration à l'équilibre ou dans un des sous-équilibres formés à l'intérieur d'une chaîne dont l'équilibre a été rompu. Des sous-équilibres à considérer lorsque l'équilibre total est brisé sont fournis dans le tableau C-2 de l'annexe C.

En plus des mesures par spectrométrie gamma, les activités et les teneurs de certains radionucléides sont également quantifiables par d'autres techniques d'analyse (exemple : activation neutronique, spectrométrie alpha, scintillation liquide, ICP-MS, etc.). L'activité massique d'un élément radioactif peut aussi être calculée à partir de sa concentration dans les matériaux caractérisés. Ainsi, il est possible de déterminer par calcul l'activité de l'U-238, de l'U-235, de l'U-234, du Th-232 ou du K-40 dans le minerai ou le résidu minier à partir de l'analyse chimique de l'uranium, du thorium ou du potassium naturel.

Le plus souvent, la part de la série de l'U-235 est considérée comme négligeable pour l'évaluation de la radioactivité naturelle d'un échantillon. Toutefois, si une activité en U-235 est mesurée, cette série sera alors considérée. De même, l'activité du K-40 dans les échantillons de matériaux miniers est parfois négligeable. Toutefois, si une activité en K-40 est mesurée, on tiendra compte également de cette série.

Bien qu'il n'y ait pas de domaine accrédité par le Ministère pour chacune des analyses servant à déterminer la radioactivité, il est recommandé de faire affaire avec un laboratoire qui détient une accréditation ISO/CEI-17025 (2017).

4.3.6.3 Activité massique maximale A

Les valeurs de l'activité massique maximale A ont été définies dans le *Règlement sur les matières dangereuses* (RMD) de façon à tenir compte de la dangerosité relative de chaque radionucléide (voir l'annexe 1 du RMD). Les valeurs A, pour les radionucléides des séquences radioactives typiques pour les projets miniers, sont présentées au tableau C-1 de l'annexe C.

4.3.6.4 Calcul du coefficient S

La procédure typique de calcul du coefficient S à l'aide de l'équation [1] est présentée au tableau C-1 de l'annexe C. Si la valeur du coefficient S est supérieure à 1, les matériaux miniers sont considérés comme radioactifs et il y a nécessité de procéder à l'évaluation de la radioactivité dans le lixiviat.

4.3.6.5 Évaluation de la radioactivité dans le lixiviat

Pour les matériaux radioactifs, l'évaluation de l'activité des radionucléides présents dans le lixiviat doit être faite afin de vérifier si les matériaux doivent être classés comme étant « à risques élevés ». Le lixiviat est obtenu par la méthode MA.100-Lix.com.1.1 (TCLP) prescrite par le *Règlement sur les matières dangereuses*. Les échantillons prélevés pour évaluer la radioactivité dans le lixiviat doivent être représentatifs des conditions de terrain. Ainsi, les échantillons doivent être transmis au laboratoire sous forme de boues, le cas échéant.

Le résidu minier est considéré à risque élevé si le lixiviat de ce résidu émet des rayonnements ionisants et pour lequel la valeur du coefficient S_L , obtenue à partir de l'équation [2], est supérieure à 0,05. Étant donné que la valeur de S_L à respecter dans le lixiviat est relativement basse en comparaison de ce qui est exigé pour le minerai ou le résidu minier lui-même, cela devrait être mentionné au laboratoire responsable des analyses afin que les limites de détection soient suffisamment basses pour évaluer le respect de la valeur de S_L de 0,05.

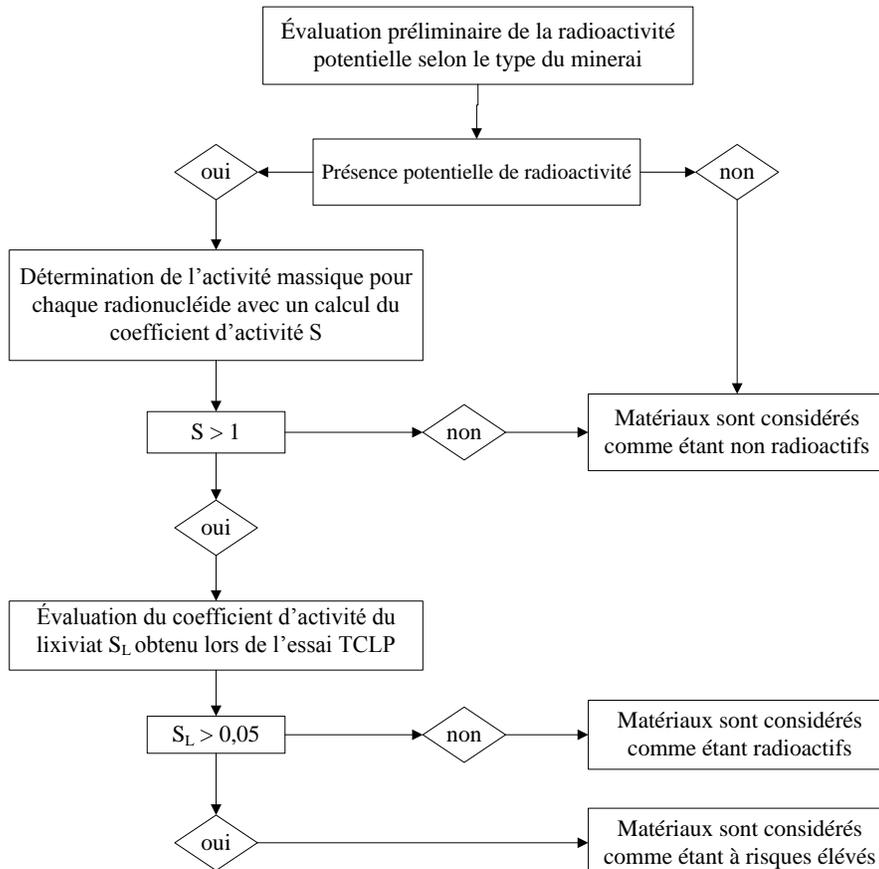


Figure 4.3 Évaluation de la radioactivité et classement des matériaux

CHAPITRE 5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX MINIERS

L'ensemble des résultats analytiques et leur interprétation doivent être présentés dans un rapport de caractérisation géochimique des matériaux miniers. Le rapport doit être signé par les professionnels responsables de l'étude avec indication de la formation, de la profession et de la fonction occupée.

Le présent chapitre traite des éléments essentiels qui devraient être inclus dans le rapport de caractérisation géochimique (un aide-mémoire à l'annexe D peut être utilisé pour vérifier si le rapport contient les informations nécessaires).

5.1 Contenu du rapport de l'étude de caractérisation

Le rapport de caractérisation contient typiquement les éléments suivants :

- Résumé du rapport de caractérisation
- Introduction
- Renseignements généraux sur le contexte géologique du projet et les matériaux caractérisés
- Programme d'échantillonnage
- Méthodes d'analyse et protocoles d'essais
- Résultats d'analyses et d'essais
- Interprétations des résultats
- Conclusions

Au besoin, d'autres sections ou d'autres renseignements pertinents peuvent être ajoutés.

5.1.1 Résumé du rapport de caractérisation

Le résumé du rapport de caractérisation comprend habituellement une brève description du contexte de l'étude de caractérisation, des matériaux caractérisés, des essais réalisés, des résultats obtenus ainsi que les conclusions concernant le classement des matériaux en fonction des risques environnementaux anticipés (voir chapitre 1).

5.1.2 Introduction

L'introduction devrait comprendre les objectifs de l'étude de caractérisation, les renseignements sur les rapports de caractérisation et autres documents consultés dans la cadre de la présente étude, avec un bref rappel des résultats antérieurs obtenus sur les mêmes matériaux, le cas échéant.

5.1.3 Renseignements généraux sur le contexte géologique du projet et les matériaux caractérisés

Pour les projets miniers, cette partie du rapport doit fournir les renseignements sur le contexte géologique du gisement et sur le type de minéralisation et de roches encaissantes, incluant la description sommaire de

la nature des sulfures et des carbonates présents, le cas échéant. Pour d'autres types de projets industriels impliquant la gestion des matériaux miniers, il faut fournir de l'information sur la provenance et la nature des matériaux caractérisés. Pour tous les types de projets, une brève description du procédé de traitement du minerai et des réactifs utilisés doit être présentée.

Les renseignements suivants pourraient être présentés sous forme de tableau :

- une estimation de la quantité du minerai et des stériles qui seront générés lors de l'exploitation minière et qui font l'objet de la caractérisation (présentée en tonnes pour chaque unité géologique identifiée);
- une estimation de la quantité des différents types des résidus miniers d'usinage et, le cas échéant, les quantités estimées des résidus miniers entreposés dans les différentes zones des aires d'accumulation existantes;
- une estimation des proportions relatives de chaque unité géologique, chaque type de résidus d'usinage ou chaque zone d'études par rapport à l'ensemble de chaque catégorie des matériaux caractérisés (minerai, stériles, résidus miniers d'usinage).

5.1.4 Programme d'échantillonnage

Dans cette section du rapport, une description détaillée du programme d'échantillonnage doit être fournie, y compris les renseignements sur :

- les dates approximatives de chaque campagne d'échantillonnage;
- les objectifs d'échantillonnage, les stratégies et les approches utilisées;
- le nombre d'échantillons prélevés par unité géologique, type de résidus d'usinage ou zone d'étude (présenté sous forme de tableau);
- au besoin, une justification du nombre d'échantillons;
- un plan, une carte ou une coupe stratigraphique longitudinale indiquant l'endroit du prélèvement d'échantillons;
- la nature et le type d'échantillons prélevés (échantillon en vrac, carotte de forage, échantillon prélevé dans une aire d'accumulation, échantillon ponctuel, composite, tamisé, broyé, etc.).

5.1.5 Méthodes d'analyse et protocoles d'essais

Les titres de toutes les méthodes standardisées ou une description détaillée des protocoles d'essais non standardisés utilisés pour évaluer les caractéristiques géochimiques des matériaux doivent être fournis. Pour les analyses de radioactivité, une confirmation d'accréditation ISO/CEI-17025 doit être montrée.

Pour les essais de terrain, une description détaillée des essais doit être présentée, y compris les données sur :

- les intervenants chargés de la conception et de la réalisation des essais;
- la conception et la durée des essais;
- les instruments de mesure utilisés pour effectuer le suivi des cellules expérimentales;

- les paramètres de suivis, la fréquence et d'autres modalités de prise d'échantillons pour les analyses chimiques.

5.1.6 Résultats d'analyses et d'essais

Les résultats de tous les essais réalisés lors de l'étude de caractérisation doivent être synthétisés sous forme de tableaux présentant les résultats par unité géologique, type de résidu ou zone d'étude. Les résultats détaillés obtenus pour chaque échantillon testé ainsi que les paramètres statistiques énumérés dans la section 3.3.2 du présent Guide doivent être fournis en annexe. Une liste détaillée des résultats qui devraient être fournis est présentée dans l'annexe D du présent Guide.

5.1.7 Interprétation des résultats

Une interprétation des résultats obtenus doit être présentée de façon à pouvoir attribuer aux matériaux miniers une ou plusieurs des caractéristiques, telles que « lixiviables », « acidogènes », « cyanurés », « inflammables », etc., dont la connaissance permettrait de classer les matériaux testés selon le système de classification imposé par le Ministère et exposé dans le chapitre 1 du présent Guide. Pour les matériaux considérés comme étant acidogènes, une estimation du délai avant le début de génération d'acide devrait être fournie. S'ils sont disponibles, les résultats des modélisations visant à prédire la qualité des eaux de drainage devraient être présentés, accompagnés des principales données d'entrée telles que la quantité totale des matériaux soumis à la lixiviation, les taux de lixiviation et les bilans d'eau utilisés pour effectuer les calculs (voir section 4.3.4).

5.1.8 Conclusions

Cette section du rapport doit contenir les conclusions sur le classement des matériaux caractérisés selon les critères du Ministère, ainsi que, le cas échéant, les recommandations sur les caractérisations supplémentaires nécessaires et les suivis géochimiques à mettre en place pour vérifier les prédictions faites sur la base des essais de laboratoire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM (2018). D5744-18 Standard Test Method for Laboratory Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell. *ASTM International*. West Conshohocken, PA.
- BENZAZOUA, M., B. BUSSIÈRE, A.-M. DAGENAIS et M. ARCHAMBAULT (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 46, 1086-1101.
- CEAEQ (2012). *Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques, MA. 100 – Lix.com.1.1, Rév. 1*. MDDEFP, Québec, 17 p. En ligne. <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA100Lixcom11.pdf>.
- CEAEQ (2015). *Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie. DR-12-VMC*. MDDELCC, Québec, 29 p. En ligne. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accréditation/PALA/DR12VMC_protocole_val_chimie.pdf.
- CEAEQ (2016). *Guide d'estimation de l'incertitude des mesures pour les analyses chimiques. DR-12-INC*. MDDELCC, Québec, 14 p. En ligne. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accréditation/PALA/DR12INC_guide_incert.pdf.
- INAP (2014). The Global Acid Rock Drainage Guide. En ligne. <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>.
- ISO/CEI 17025 (2017). Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.
- LAWRENCE, R.W., et Y. WANG (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Ottawa, Canada, 451-464.
- MDDELCC (2016). *Guide d'intervention — Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés*. Québec, 210 p. En ligne. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide-intervention/guide-intervention-protection-rehab.pdf>.
- MDDELCC (2017). *Radionucléides recommandés pour l'analyse de la radioactivité dans les matrices environnementales*, 31 p. En ligne. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/documents/radionucleides-analyse-radioactivite.pdf>.
- MDDEP (2002). *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction*. Québec, 47 p. En ligne. http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/inorganique/matiere-residuelle-inorganique.pdf.
- MDDEP (2008a). *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 1 – Généralités*. CEAEQ, Québec, 58 p. En ligne. <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/generalitesC1.pdf>.
- MDDEP (2008b). *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 8 – Échantillonnage des matières dangereuses*. CEAEQ, Québec, 87 p. En ligne. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/mat_dang_C8.pdf.

- MEND (2009). *Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials*. Report 1.20.1 by Price, W. CANMET, British Columbia. En ligne. http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.20.1_PredictionManual.pdf.
- MERN (2017). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec. Québec, 80 p. En ligne. https://mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers_VF.pdf.
- MILLER, S., A. ROBERTSON et T. DONAHUE (1997). Advances in acid drainage prediction using the net acid generating (NAG) test. *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, Canada*, 535-549.
- ROSENBLUM, F., et P. SPIRA (1995). Evaluation of hazard from self-heating of sulphide rock. *CIM Bulletin 88 (989)*, 44-49.
- ROSENBLUM, F., J. NESSET et P. SPIRA (2001). Evaluation and control of self-heating in sulphide concentrates. *CIM Bulletin 94 (1056)*, 92-99.
- ROSENBLUM, F., J. NESSET et J. FINCH (2014). Review of self-heating testing methodologies. *Proceedings of the 46th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors (CIM)*, 67-89.
- SOBEK, A. A, W. A SCHULLER, J. R. FREEMAN et R. M. SMITH (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- SRK (1989). *Draft acid rock drainage technical guide, volume 1*. Norecol Environmental Consultants, Gormely Process Engineering, British Columbia Acid Mine Drainage Task Force, 274 p.
- UQAT (2015). *Revue de littérature en vue de la mise à jour du guide de caractérisation des résidus miniers et du minerai – Rapport PU-2013-05-806*. URSTM, Québec, 48 p.

ANNEXE A – CRITÈRES DE CLASSEMENT POUR LES MATÉRIAUX MINIERIS À RISQUES ÉLEVÉS

Paramètre	Critère (mg/l)	Paramètre	Critère (mg/l)
Arsenic	5,0	Mercure	0,1
Baryum	100	Nitrates + nitrites	1000
Bore	500	Nitrites	100
Cadmium	0,5	Plomb	5,0
Chrome	5,0	Sélénium	1,0
Fluorures totaux	150	Uranium	2,0

ANNEXE B – MÉTHODES D'ESSAIS DE RÉFÉRENCE

Essai/Paramètre	Titre de la méthode		Référence
Concentration de composés organiques			
Composés organiques volatils	Détermination des composés organiques volatils dans l'eau et les sols: dosage par « Purge and trap » couplé à un chromatographe en phase gazeuse et à un spectromètre de masse		MELCC / CEAEQ MA.400 - COV2.0
Composés phénoliques	Détermination des composés phénoliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse après dérivation avec l'anhydride acétique		MELCC / CEAEQ MA.400 - Phé 1.0
Dioxines et furanes	Détermination des dibenzo-para-dioxines polychlorés et des dibenzofuranes polychlorés : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse		MELCC / CEAEQ MA.400 - D.F. 1.1
Halogènes organiques totaux	Détermination des halogènes organiques totaux : méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique		MELCC / CEAEQ MA.400 - Hal 1.1
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse		MELCC / CEAEQ MA.400 - HAP 1.1
Hydrocarbures pétroliers (C10-C50)	Détermination des hydrocarbures pétroliers (C10 à C50) : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme		MELCC / CEAEQ MA.400 - HYD.1.1
Contenu en cyanure			
Cyanure disponible et cyanure total	Détermination des cyanures : méthode colorimétrique automatisée avec l'acide isonicotinique et l'acide barbiturique – distillation manuelle		MELCC / CEAEQ MA.300 - CN 1.2
Contenu total en métaux et métalloïdes			
Métaux et métalloïdes	Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon		MELCC / CEAEQ MA.200 - Mét. 1.2
Inflammabilité			
Point d'éclair : résidus liquides et semi-liquides	Détermination de la température du point d'éclair selon la technique Pensky-Martens (vase clos)		MELCC / CEAEQ MA.108 - P.E. 1.1
Potentiel de génération d'acide			
Teneur en soufre et en carbone	Détermination du carbone et du soufre : méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge		MELCC / CEAEQ MA.310 - CS 1.0
Essais statiques	Détermination du pouvoir neutralisant, du potentiel de génération d'acide et du potentiel acidogène d'un solide « Acid-base accounting (ABA) » par la méthode de Sobek modifiée par Lawrence et Wang		MELCC / CEAEQ MA.110 - ACISOL 1.0 Sobek et collab. (1978) Lawrence et Wang (1997)
	« Standard Test Method for Laboratory Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell »		ASTM D5744
Essais cinétiques	Essai en colonne		MEND (2009) UQAT (2015)
Potentiel de lixiviation			
Essais de lixiviation de courte durée	Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques	TCLP / Lixiviation dans des conditions acides	MELCC / CEAEQ MA.100 - Lix.com.1.1
		SPLP / Lixiviation pour simuler les pluies acides	
		CTEU-9 / Lixiviation à l'eau	
Essais cinétiques	Essai en colonne		MEND (2009) UQAT (2015)

ANNEXE C – ÉVALUATION DU POTENTIEL RADIOACTIF

Tableau C-1 Données nécessaires pour le calcul de la valeur S pour les séries naturelles de l'U-238, du Th-232, de l'U-235 et du K-40

Radionucléide	Activité massique (ou volumique) mesurée ou estimée, C _n [kBq/kg ou kBq/L]	Activité massique (ou volumique) maximale, A _n [kBq/kg ou kBq/L]	Rapport C _n /A _n
Série de l'U-238 :			
²³⁸ U	C ₁ (²³⁸ U)	4	C ₁ (²³⁸ U)/4
²³⁴ Th*	C ₂ (²³⁴ Th)	4	C ₂ (²³⁴ Th)/4
^{234m} Pa	C ₃ (^{234m} Pa)	4	C ₃ (^{234m} Pa)/4
²³⁴ U	C ₄ (²³⁴ U)	4	C ₄ (²³⁴ U)/4
²³⁰ Th	C ₅ (²³⁰ Th)	4	C ₅ (²³⁰ Th)/4
²²⁶ Ra	C ₆ (²²⁶ Ra)	4	C ₆ (²²⁶ Ra)/4
²²² Rn	C ₇ (²²² Rn)	40	C ₇ (²²² Rn)/40
²¹⁸ Po	C ₈ (²¹⁸ Po)	40	C ₈ (²¹⁸ Po)/40
²¹⁴ Pb	C ₉ (²¹⁴ Pb)	40	C ₉ (²¹⁴ Pb)/40
²¹⁴ Bi	C ₁₀ (²¹⁴ Bi)	40	C ₁₀ (²¹⁴ Bi)/40
²¹⁴ Po	C ₁₁ (²¹⁴ Po)	40	C ₁₁ (²¹⁴ Po)/40
²¹⁰ Pb	C ₁₂ (²¹⁰ Pb)	4	C ₁₂ (²¹⁰ Pb)/4
²¹⁰ Bi	C ₁₃ (²¹⁰ Bi)	40	C ₁₃ (²¹⁰ Bi)/40
²¹⁰ Po	C ₁₄ (²¹⁰ Po)	4	C ₁₄ (²¹⁰ Po)/4
Sous-total des sommes des rapports C_n/A_n pour la série de l'U-238 (S_{U-238}) :			$\Sigma C_n/A_n$
Série du Th-232 :			
²³² Th	C ₁ (²³² Th)	4	C ₁ (²³² Th)/4
²²⁸ Ra	C ₂ (²²⁸ Ra)	40	C ₂ (²²⁸ Ra)/40
²²⁸ Ac	C ₃ (²²⁸ Ac)	40	C ₃ (²²⁸ Ac)/40
²²⁸ Th	C ₄ (²²⁸ Th)	4	C ₄ (²²⁸ Th)/4
²²⁴ Ra	C ₅ (²²⁴ Ra)	40	C ₅ (²²⁴ Ra)/40
²²⁰ Rn	C ₆ (²²⁰ Rn)	40	C ₆ (²²⁰ Rn)/40
²¹⁶ Po	C ₇ (²¹⁶ Po)	40	C ₇ (²¹⁶ Po)/40
²¹² Pb	C ₈ (²¹² Pb)	40	C ₈ (²¹² Pb)/40
²¹² Bi	C ₉ (²¹² Bi)	40	C ₉ (²¹² Bi)/40
²¹² Po (64 % de ²¹² Bi)	C ₁₀ (²¹² Po)	40	C ₁₀ (²¹² Po)/40
²⁰⁸ Tl (36 % de ²¹² Bi)	C ₁₁ (²⁰⁸ Tl)	40	C ₁₁ (²⁰⁸ Tl)/40
Sous-total des sommes des rapports C_n/A_n pour la série du Th-232 (S_{Th-232}) :			$\Sigma C_n/A_n$
Série de l'U-235 :			
²³⁵ U	C ₁ (²³⁵ U)	4	C ₁ (²³⁵ U)/4
²³¹ Th	C ₂ (²³¹ Th)	4	C ₂ (²³¹ Th)/4
²³¹ Pa	C ₃ (²³¹ Pa)	4	C ₃ (²³¹ Pa)/4
²²⁷ Ac	C ₄ (²²⁷ Ac)	4	C ₄ (²²⁷ Ac)/4
²²⁷ Th	C ₅ (²²⁷ Th)	4	C ₅ (²²⁷ Th)/4
²²³ Ra	C ₆ (²²³ Ra)	40	C ₆ (²²³ Ra)/40
²¹⁹ Rn	C ₇ (²¹⁹ Rn)	40	C ₇ (²¹⁹ Rn)/40
²¹⁵ Po	C ₈ (²¹⁵ Po)	40	C ₈ (²¹⁵ Po)/40
²¹¹ Pb	C ₉ (²¹¹ Pb)	40	C ₉ (²¹¹ Pb)/40
²¹¹ Bi	C ₁₀ (²¹¹ Bi)	40	C ₁₀ (²¹¹ Bi)/40
²⁰⁷ Tl	C ₁₁ (²⁰⁷ Tl)	40	C ₁₁ (²⁰⁷ Tl)/40
Sous-total des sommes des rapports C_n/A_n pour la série de l'U-235 (S_{U-235}) :			$\Sigma C_n/A_n$
⁴⁰ K	C _{K40}	400	$S_{K40} = C_{K40}/400$
Coefficient S (total des rapports C_n/A_n; S = S_{U-238} + S_{Th-232} + S_{U-235} + S_{K40})			S

* Les émetteurs gamma sont indiqués en gras.

Tableau C-2 Sous-équilibres à considérer pour estimer l'activité massique C

Parent	Radionucléides descendants en équilibre
Série de l'U-238	
^{238}U	^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{234}Pa
^{226}Ra	^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po
^{210}Pb	^{210}Bi , ^{210}Po
Série du Th-232	
^{228}Ra	^{228}Ac
^{228}Th	^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl , ^{212}Po

Tiré du document intitulé Radionucléides recommandés pour l'analyse de la radioactivité dans les matrices environnementales (MDDELCC, 2017).

ANNEXE D – CONTENU DU RAPPORT DE CARACTÉRISATION – AIDE-MÉMOIRE

Contenu du rapport de caractérisation	Inclus	Non applicable
Résumé du rapport de caractérisation		
Introduction		
Contexte de l'étude de caractérisation		
Objectifs de l'étude de caractérisation		
Documents consultés		
Renseignements généraux sur le contexte géologique du projet et les matériaux caractérisés		
Pour les projets miniers : le contexte géologique incluant la description sommaire des types de roches et de la nature de la minéralisation		
Pour d'autres types de projets industriels impliquant la gestion des matériaux miniers : la description du projet et la provenance des matériaux caractérisés		
Types de matériaux qui font l'objet de l'étude de caractérisation (minerai, stériles, résidus miniers d'usinage, résidus grossiers, fins, désulfurés, concentrés de sulfures issus de la désulfuration, résidus transformés, boues de traitement, etc.)		
Estimation de la quantité de matériaux qui font l'objet de la caractérisation (présentée en tonnes)		
Quantité de minerai (présentée pour chaque unité géologique identifiée dans le minerai)		
Quantité de stériles miniers (présentée pour chaque unité géologique identifiée dans les stériles)		
Quantité de résidus miniers d'usinage (présentée par type de résidus d'usinage générés)		
Zones d'étude identifiées dans les aires existantes d'accumulation de stériles avec une estimation du tonnage des matériaux qui y sont entreposés		
Zones d'étude identifiées dans les aires existantes d'accumulation des résidus d'usinage avec une estimation du tonnage des matériaux qui y sont entreposés		
Réactifs utilisés dans le procédé de traitement du minerai		
Programme d'échantillonnage		
Date de l'échantillonnage		
Objectifs, stratégie et approche d'échantillonnage		
Justification du nombre d'échantillons prélevés par unité géologique, type de résidus d'usinage ou zone d'étude		
Localisation des échantillons		
Nature et type des échantillons (échantillon en vrac, carotte de forage, aire d'accumulation, échantillon ponctuel, composite, etc.)		

Méthodes d'analyse et protocoles d'essais (présentés par catégorie d'essai avec les paramètres analysés et les limites analytiques)		
Méthodes d'analyses chimiques		
Méthodes d'analyse minéralogique		
Protocoles d'essais statiques de prédiction du DMA		
Protocoles d'essais de lixiviation		
Méthodes d'analyse granulométrique		
Protocoles d'essais d'auto-échauffement pour les résidus sulfurés		
Protocoles d'essais cinétiques		
Protocoles d'essais de terrain		
Méthodes d'analyse de la radioactivité et de l'inflammabilité		
Résultats (présentés par unité géologique, type de résidus d'usinage ou zone d'étude)		
Composition chimique avec les données statistiques, comparée aux teneurs de fond naturelles ou aux critères génériques pour les sols du <i>Guide d'intervention</i>		
Composition minéralogique		
Granulométrie		
Résultats des essais statiques de prédiction du DMA		
Résultats des essais SPLP et CTEU-9		
Résultats des essais TCLP		
Résultats des essais cinétiques		
Résultats des essais de terrain		
Composition chimique de la fraction liquide des résidus miniers		
Résultats des essais d'auto-échauffement pour les résidus sulfurés		
Résultats d'évaluation des caractéristiques radioactives		
Résultats d'évaluation du potentiel de contamination par des composés organiques		
Résultats d'évaluation du potentiel d'inflammabilité		
Interprétation des résultats (présentés par unité géologique, type de résidus ou zone d'étude)		
Potentiel de génération d'acide		
Potentiel de lixiviation		
Estimation de la qualité des eaux de drainage		
Délai avant le début de génération d'acide		
Potentiel d'auto-échauffement pour les résidus sulfurés		
Contamination par des cyanures		
Contamination par des composés organiques		
Potentiel radioactif		
Potentiel d'inflammabilité		
Conclusions		
Classement des matériaux caractérisés selon les critères du Ministère		
Recommandations sur les suivis géochimiques à mettre en place		
Recommandations sur les caractérisations supplémentaires		



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 