

Contexte

En raison de la problématique particulière qu'il présente, le soufre n'est pas visé aux annexes I et II du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT), puisque ce contaminant n'est pas problématique pour la santé humaine et qu'il ne pose pas de risques pour les écosystèmes. Par contre, comme la présence de soufre dans les sols peut mener à la production d'acide sulfurique ou de sulfure d'hydrogène, un critère relatif au soufre total apparaît dans la grille des critères génériques du Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés. Cette fiche présente les orientations relatives à la gestion du soufre dans les sols. Elle vise toutes les espèces inorganiques soufrées.

La problématique liée au soufre

Les composés soufrés peuvent, selon les conditions du milieu, produire de l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou, plus rarement, du sulfure d'hydrogène (H_2S).

Les problèmes potentiels associés à la présence de soufre inorganique dans les sols découlent de **leur oxydation microbienne en acide sulfurique**. L'acidification du milieu favorise à son tour la solubilisation et la migration potentielle des métaux présents, ce qui peut entraîner un impact sur la qualité de l'eau souterraine et de surface; la présence d'acide sulfurique influence le pH du sol et peut avoir aussi un impact sur la faune et la flore, en plus de provoquer la corrosion de l'équipement métallique (ex. : des réservoirs souterrains) et la détérioration des infrastructures en béton (ex. : fondations de bâtiment) ou en maçonnerie.

Un autre problème associé à la présence de soufre sous forme réduite est le **dégagement de sulfure d'hydrogène** (H_2S). Le sulfure d'hydrogène est un gaz nauséabond, corrosif, inflammable et très toxique. Son odeur « d'œuf pourri » est perçue dès 0,5 partie par milliard (ppb) par certaines personnes, mais le seuil moyen de détection est de 15,4 ppb. Le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA; chapitre Q-2, r. 4.1) propose une norme de qualité d'air ambiant de 4,3 ppb (6 $\mu g/m^3$) pour une durée de quatre minutes. L'une des sources anthropiques de sulfure d'hydrogène est le dépôt de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dans des terrains qui peut produire des biogaz lors de la réduction microbienne des sulfates par les bactéries sulfatoréductrices. Il est à noter que le sulfure d'hydrogène peut être présent à l'état naturel dans la nappe phréatique. Il provient de la décomposition des matières organiques de source végétale ou animale.

Dans les sols, le soufre peut être présent sous différentes formes inorganiques. Cependant, la forme utilisée par les bactéries et qui entraîne la génération d'acide à partir des sols est le soufre élémentaire. Par ailleurs, lorsqu'il y a des résidus miniers dans un terrain, le soufre s'y trouve sous la forme de sulfures métalliques. Pour cette raison, le potentiel acidogène sera évalué à partir d'une méthode différente selon qu'il s'agit de sol ou de résidus miniers.

Les tests de potentiel acidogène

L'étude de l'historique du terrain devrait permettre de déduire la présence potentielle de soufre « problématique », laquelle pourra ensuite être confirmée, le cas échéant, par un test en laboratoire (méthode d'analyse [310 – CS 1.0](#)). La détermination du soufre total ne permet pas de distinguer les différentes formes de soufre (sulfures ou sulfates). Lorsqu'on suspecte qu'il est présent en quantité importante (> 2 000 ppm), le dosage des sulfates (méthode d'analyse [300 – Ions 1.3](#)) est recommandé. Lorsque la contamination est présente depuis de nombreuses années, il existe une forte probabilité que le soufre total présent ne soit plus sous une forme oxydable par les bactéries. Lorsque le soufre est seulement présent sous forme de sulfates, cela implique que le sol ne devrait pas générer d'acide puisque tout le soufre présent est déjà sous une forme oxydée. Dans ce cas, on peut envisager de soustraire la concentration de sulfates (calculée en S) de la teneur en soufre total avant de faire la conversion en équivalent acide sulfurique.

Dans le Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés (le Guide d'intervention), le potentiel de génération d'acide est évalué à partir de sols contenant des espèces soufrées à l'aide du Test de détermination du potentiel acidogène des sols (TDPAS). Le TDPAS fait référence aux sections 7.4 et 8.3 de la méthode d'analyse [110 - ACISOL 1.0](#). Si la concentration en soufre total est inférieure à 2 000 ppm, l'expérience montre que ce niveau de concentration dans un sol est insuffisant pour générer un potentiel acidifiant significatif mesuré à l'aide du TDPAS. Les sols contenant des concentrations inférieures à 2 000 ppm en soufre peuvent donc être gérés sans restriction ou, s'ils contiennent des contaminants en concentrations supérieures aux valeurs limites des annexes I et/ou II du RPRT, selon la Grille de gestion des sols excavés du Guide d'intervention. Lorsqu'il est établi que les composés soufrés présents dans le sol sont entièrement sous une forme oxydée, c'est-à-dire sous la forme de sulfates (méthode d'analyse 300 – Ion 1.2), le test de potentiel de génération d'acide n'est pas requis.

Le TDPAS sert à déterminer en laboratoire si un échantillon de sol contenant du soufre présente un risque de s'acidifier par oxydation microbiologique. Ce test ne peut être utilisé dans le cas des résidus miniers qui contiennent des sulfures métalliques.

Dans le cas de résidus miniers, le test à utiliser est celui du potentiel de génération d'acide prévu par la

Directive 019 et décrit aux sections 7.3 et 8.2 de la méthode d'analyse MA 110-ACISOL 1.0.

Le tableau 1 présente les méthodes d'analyse disponibles pour doser les différentes espèces soufrées.

Tableau 1

Méthodes d'analyse requises		
Paramètre analysé	Limite de détection	Protocole d'analyse
Soufre total	100 ppm	Détermination du carbone et du soufre; méthode par combustion et dosage spectrophotométrique infrarouge, MA. 310 – CS 1.0
Sulfate	2 ppm	Détermination des anions; méthode par chromatographie ionique, MA. 300 – Ions 1.3
Potentiel acidogène Essai statique	--	Détermination du pouvoir neutralisant, du potentiel de génération d'acide et du potentiel acidogène d'un solide, MA. 110 – ACISOL 1.0
Potentiel acidogène Essai cinétique	--	Test de détermination du potentiel acidogène des sols, Université Laval, 1999
Sulfure d'hydrogène	--	Par exemple : Jerome 631-X Hydrogene Sulfide Analyser

Le TDPAS doit être réalisé sur un échantillon de sol représentatif du milieu d'une masse minimale de 50 g et prévoit deux étapes séquentielles, soit un essai statique et un essai cinétique.

L'essai statique consiste à mesurer le pH théoriquement atteint dans le sol si le soufre total est entièrement oxydé en acide sulfurique. Un essai statique est positif si le pH obtenu est inférieur à 5,5. Le protocole détaillé de l'essai statique est disponible sur le site Web du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (méthode d'analyse 110-ACISOL 1.0 section 8.3). Ce test a été conçu pour les sols. Si le pH du sol est déjà acide, cela signifie qu'il y a déjà une problématique d'acidification liée au soufre et ainsi, la confirmation par le TDPAS n'est pas requise.

Un essai statique positif devrait être confirmé par un essai cinétique (Test de détermination du potentiel acidogène des sols, Université Laval, 1999). Ce dernier consiste à ajouter au sol des bactéries oxydantes dans le but de transformer le soufre inorganique en acide sulfurique. Si le pH obtenu est inférieur à 5,5, l'essai cinétique est positif et le sol présente un potentiel acidogène. Il n'est pas utile de réaliser l'étape cinétique si le résultat de l'étape statique est négatif. Le tableau suivant résume l'interprétation des essais statique et cinétique.

Par ailleurs, il est pertinent de faire également une vérification du respect du critère de sulfure d'hydrogène dans l'eau afin d'établir s'il existe un impact sur l'eau souterraine ou de surface.

Tableau 2

Résultats du Test de détermination du potentiel acidogène des sols (TDPAS) pour les sols dont les concentrations en soufre > 2 000 ppm		
Essai statique	Essai cinétique	Résultat du test
Négatif (pH > ou = 5,5)	Non requis	Potentiel acidogène négatif
Positif (pH < 5,5)	Négatif	Potentiel acidogène négatif
Positif (pH < 5,5)	Positif (pH < 5,5)	Potentiel acidogène positif

Note : Lorsque la concentration en soufre total est inférieure à 2 000 ppm, le sol est considéré comme ayant un potentiel acidogène négatif, et le TDPAS n'a pas à être réalisé.

En tenant pour acquis que des échantillons représentatifs des espèces soufrées et de la matrice de sol ont été prélevés et que le TDPAS a été correctement réalisé et interprété, les règles de gestion décrites ci-après s'appliquent. Elles sont également résumées dans le schéma décisionnel présenté à la figure 1.

Les règles de gestion des sols acidogènes

Lorsque **le sol présente un potentiel acidogène positif** (voir le tableau 2), celui-ci peut être géré selon deux options, soit le traitement ou l'élimination dans un lieu d'enfouissement de sols contaminés :

- **Le sol peut être laissé en place. Il doit cependant être traité pour neutraliser le potentiel acidogène.**
Le traitement peut consister notamment à ajouter un produit minéral alcalin (ex. : de la chaux agricole) au sol afin d'augmenter sa capacité de neutralisation de l'acide. Pour ce faire, le procédé de neutralisation nécessite :
 - un calcul stœchiométrique de la quantité de chaux agricole requise pour maintenir le pH légèrement basique à moyen et à long terme;
 - une optimisation de la granulométrie de la chaux agricole pour assurer une efficacité à long terme;
 - des essais en laboratoire sur des colonnes de sols contaminés pour optimiser les conditions de traitement;
 - la détermination d'une approche efficace pour incorporer la chaux dans les sols de surface (ex. : une herse);
 - des essais pilotes à plus grande échelle pour optimiser les conditions de traitement;
 - une gestion de l'eau de surface (ruissellement) et un suivi de la qualité de l'eau souterraine et de surface.
- Le sol peut être **excavé et éliminé dans un lieu d'enfouissement de sols contaminés (LESC)** conforme au Règlement sur l'enfouissement de sols contaminés (RESC) si les exigences de l'article 4¹ de ce règlement sont respectées (il faut vérifier notamment les concentrations des autres contaminants présents).

Il est à noter que les **sols** qui présentent un **potentiel acidogène positif** et des **concentrations en soufre égales ou supérieures à 20 000 ppm** (équivalant à

10 fois le critère de 2 000 ppm du Guide d'intervention) ne devraient **pas faire l'objet d'un traitement** par neutralisation, mais devraient être **excavés et éliminés dans un LES C**.

Les règles de gestion des sols ne générant ni acide ni sulfure d'hydrogène

Lorsque **le sol présente un potentiel acidogène négatif** (voir le tableau 2), un potentiel de génération de sulfure d'hydrogène négatif et que les autres contaminants sont présents à des concentrations conformes aux valeurs limites applicables, il peut être géré selon les options suivantes (aussi présentées à la figure 1) :

- Le sol, dont les contaminants autres que le soufre sont présents en concentrations inférieures ou égales aux valeurs limites de l'annexe I du RPRT (critères B du Guide d'intervention), peut être **laissé en place ou remblayé sur le terrain d'où il est excavé**.
- **Le sol peut être remblayé sur d'autres terrains** à vocation résidentielle en voie de réhabilitation ou sur un terrain à vocation commerciale ou industrielle, à la condition que son utilisation n'ait pas pour effet d'augmenter la contamination du terrain récepteur.
- Le sol peut être **utilisé comme matériau de recouvrement journalier ou final** dans un **lieu d'enfouissement technique (LET)** autorisé s'il respecte les exigences des articles 42² et 50³ du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR).
- Le sol peut être **utilisé comme matériau de recouvrement hebdomadaire en période estivale** dans un **lieu d'enfouissement en tranchée** autorisé s'il respecte les exigences du paragraphe 3^o de l'article 90 du REIMR.
- Le sol peut être **éliminé dans un LET** si les exigences du paragraphe 9^o de l'article 4 du REIMR sont respectées (contaminants inférieurs aux valeurs limites de l'annexe I du RPRT). Il est à noter que le REIMR fait référence aux annexes du RPRT et que le soufre total n'y figure pas. Le respect de l'annexe I du RPRT concerne donc les autres contaminants également présents.
- Le sol peut aussi être **éliminé dans un lieu d'enfouissement de débris de construction ou de démolition (LED CD)** si les exigences (contaminants inférieurs aux valeurs limites de l'annexe I du RPRT) de l'article 101 du REIMR sont respectées.

¹ Essentiellement, les conditions pertinentes de l'article 4 sont le respect de l'annexe I du RESC pour les contaminants autres que le soufre et que le sol contienne moins de 25 % de matières résiduelles après ségrégation. D'autres conditions relatives à la teneur en liquide, à la présence d'explosifs, de matières radioactives et de BPC sont aussi mentionnées.

² Les matériaux de recouvrement journalier doivent avoir une conductivité hydraulique minimale de 1×10^{-4} cm/s et moins de 20 % en poids de particules < 0,08 mm; des composés organiques volatils < critères B et les autres contaminants < critères C.

³ Les matériaux de recouvrement final doivent avoir une conductivité hydraulique spécifique selon l'usage et les composés organiques volatils < critères B et les autres contaminants < critères C.

Les sols contenant du soufre (> 2 000 ppm), mais qui présentent un potentiel acidogène négatif et qui ne dégagent pas de sulfure d'hydrogène, et dont les concentrations des autres contaminants sont inférieures ou égales aux critères A peuvent être gérés sans restriction.

La gestion des sols contenant du H₂S

Si l'étude sommaire de l'historique du terrain ou si les conditions qu'on y observe permettent de **soupçonner le dégagement de H₂S**, il convient d'effectuer des prélèvements représentatifs de gaz dans le sol à l'aide de puits d'exploration adaptés ou de sondes et de faire le dosage à l'aide d'un appareil de détection de H₂S dont la limite de détection est d'au moins 1 ppb.

Le barème de référence considéré ici est **la norme de qualité de l'air ambiant de 4,3 ppb ou 6 ug/m³ pour quatre minutes, du RAA adopté en 2011**. Un facteur d'atténuation sera utilisé pour transposer les résultats obtenus sous la surface du sol de manière à pouvoir les comparer aux valeurs **d'air ambiant** (tableau 3). Il est à noter que la présence de sulfates ne permet pas d'affirmer qu'il y aura nécessairement production de sulfure d'hydrogène (H₂S) puisque le milieu ambiant est

généralement oxydant et que les conditions pour la production de H₂S sont particulières. Celles-ci nécessitent un milieu réducteur comportant des matières organiques et caractérisé par une humidité adéquate.

La présence d'une odeur nauséabonde (odeur d'œuf pourri) est un indice important de la présence de sulfure d'hydrogène. La moyenne de détection olfactive du H₂S est de 15,4 ppb avec un seuil inférieur de 0,5 ppb. Il est recommandé de faire l'analyse du H₂S dans les pores du sol à l'aide d'une sonde ou dans un puits d'échantillonnage adapté.

Le tableau 3 ci-dessous présente les valeurs maximales acceptables des échantillons prélevés dans le sol à différentes profondeurs. Ainsi, les valeurs maximales acceptables sont de 285 ppm pour les échantillons prélevés à une profondeur de 1 mètre ou moins; de 355 ppm à une profondeur de 1,5 mètre; de 465 ppm à 2 mètres; de 705 ppm à 3 mètres; de 1 160 ppm à 5 mètres, etc. Cela correspond à la norme d'air ambiant du RAA obtenue en multipliant la concentration de sulfure d'hydrogène dans la porosité d'aération du sol par le facteur d'atténuation correspondant à la profondeur du prélèvement.

Tableau 3

Plages de concentrations de H ₂ S acceptables			
Profondeur de l'échantillon en mètres	Facteur d'atténuation* relatif à la qualité de l'air ambiant	Concentration échantillonnée en ppm	Résultat reporté au niveau de l'air ambiant en ppb
1	0,000015	285	4,3
1,5	0,000012	355	4,3
2	0,0000092	465	4,3
3	0,0000061	705	4,3
5	0,0000037	1 160	4,3
7	0,0000026	1 650	4,3
10	0,0000018	2 390	4,3
15	0,0000012	3 580	4,3
20	0,00000092	4 660	4,3

* Ministry of Environment, B.C. *Technical Guidance on Contaminated Sites, Vapour Investigation and Remediation*, 2009, 10 p.

Si le sol **ne dégage pas d'odeur** de sulfure d'hydrogène et si **la détermination du H₂S est négative (sous la limite de détection)**, les sols peuvent être gérés selon les options mentionnées dans la section précédente, et ce, pour **les sols ne présentant pas de potentiel acidogène**.

Lorsque **le sol dégage du sulfure d'hydrogène**, il doit être éliminé dans un LESC respectant les exigences du RESC. Cependant, l'excavation de ces sols peut représenter des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs. Les problèmes sont liés aux odeurs et à l'exposition potentielle. L'évaluation et la gestion de ces

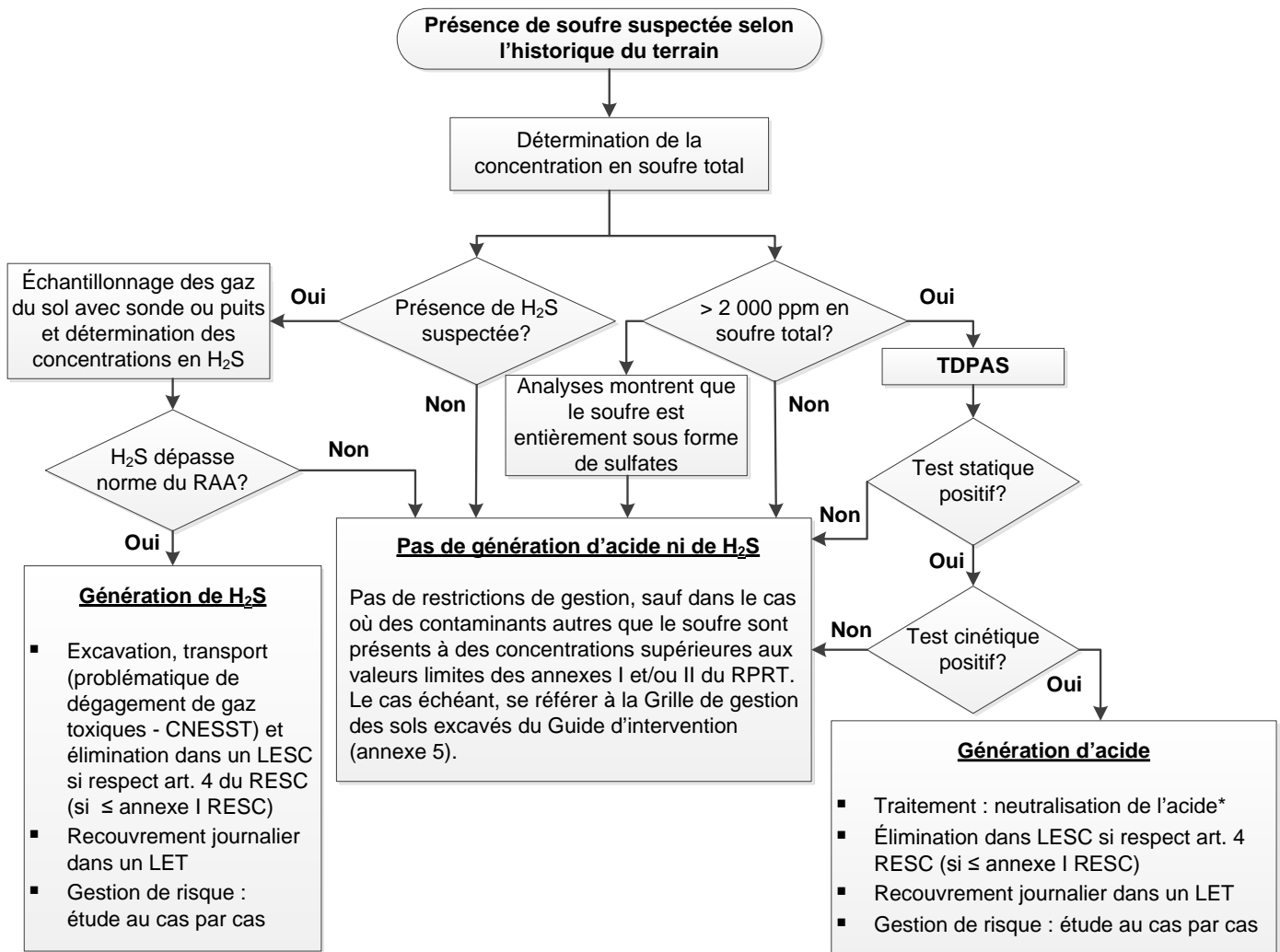
risques nécessitent la collaboration de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail et de la direction de santé publique régionale.

La figure 1 résume diverses situations en fonction des espèces soufrées et des différentes options de gestion de sols prévues par le Guide d'intervention.

Personne-ressource :

Mathieu Laporte-Saumure, Direction du Programme de réduction des rejets industriels et des lieux contaminés

Figure 1 : Schéma décisionnel – Gestion des sols contenant du soufre



* Il est à noter que le traitement par neutralisation n'est pas applicable aux sols présentant un potentiel acidogène avec des concentrations en soufre total supérieures ou égales à 20 000 ppm.