

## 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 ne présente pas de risques pour la santé humaine et 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 du soufre

Les composés soufrés peuvent, selon les conditions du milieu, produire de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ou, plus rarement, du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Les problèmes potentiels associés à la présence de soufre inorganique dans les sols découlent de **leur oxydation microbienne pour former de l'acide sulfurique**. L'acidification du milieu favorise à son tour la solubilisation et la migration potentielle des métaux présents, ce qui peut avoir 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 un impact sur la faune et la flore, en plus de provoquer la corrosion des équipements métalliques (ex. : 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** ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Le sulfure d'hydrogène est un gaz nauséabond (odeur d'« œuf pourri »), corrosif, inflammable et très toxique. Le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA; chapitre Q-2, r. 4.1) propose une norme de qualité de l'air ambiant de 4,3 ppb ( $6 \text{ ug/m}^3$ ) pour une durée de quatre minutes. L'une des sources anthropiques de sulfure d'hydrogène est le dépôt de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dans les 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 sols 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, le sol ne devrait pas générer d'acide puisque tout le soufre présent est déjà sous une forme oxydée. Dans ces 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 réfère aux sections 7.4 et 8.3 de la méthode d'analyse [110 - ACISOL 1.0](#). L'expérience montre qu'une concentration en soufre total inférieure à 2 000 ppm dans un sol est insuffisante pour générer un potentiel acidifiant significatif mesuré à l'aide du TDPAS. Les sols présentant des concentrations inférieures à 2 000 ppm peuvent donc être gérés sans restriction. S'ils contiennent des contaminants en concentrations supérieures aux valeurs limites des annexes I ou II du RPRT, les sols peuvent être gérés selon la Grille de gestion des sols excavés du Guide d'intervention. Lorsqu'il est établi que les composés soufrés dans le sol sont uniquement présents 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 possibles pour doser les différentes espèces soufrées.

**Tableau 1**

<b>Méthodes d'analyse requises</b>		
<b>Paramètre analysé</b>	<b>Limite de détection</b>	<b>Protocole d'analyse</b>
Soufre total	100 ppm	Détermination du carbone et du soufre; méthode par combustion et dosage spectrophotométrique infrarouge, <b>MA. 310 – CS 1.0</b>
Sulfates	2 ppm	Détermination des anions; méthode par chromatographie ionique, <b>MA. 300 – Ions 1.3</b>
Potentiel acidogène Essai statique	--	Détermination du pouvoir neutralisant, du potentiel de génération d'acide et du potentiel acidogène d'un solide, <b>MA. 110 – ACISOL 1.0</b>
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. Il comporte 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 sous forme d'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 la mesure du pH révèle que le sol est déjà acide, c'est qu'il y a déjà une problématique d'acidification liée au soufre; la confirmation par le TDPAS n'est donc pas requise.

Le résultat d'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 vérifier également le 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**

<b>Résultats du Test de détermination du potentiel acidogène des sols (TDPAS) pour les sols dont les concentrations en soufre &gt; 2 000 ppm</b>		
<b>Essai statique</b>	<b>Essai cinétique</b>	<b>Résultat du test</b>
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), il peut être géré selon l'une des options suivantes :

- Le **sol peut être laissé en place. On doit cependant le traiter pour neutraliser son 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 que le pH du sol demeure légèrement basique à moyen et à long termes;
  - 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 par la suite :
  - **éliminé dans un lieu d'enfouissement de sols contaminés (LESC) conforme au Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (RESC)** si les exigences de l'article 4<sup>1</sup> de ce règlement sont respectées (il faut notamment vérifier les concentrations des autres contaminants présents);

- **éliminé dans un lieu d'enfouissement technique (LET)** dans le respect des exigences du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR);
- **utilisé comme matériau de recouvrement journalier ou final dans un lieu d'enfouissement technique (LET)** autorisé s'il respecte les exigences des articles 42<sup>2</sup> et 50<sup>3</sup> du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR).

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. Ils devraient plutôt être **excavés et éliminés dans un LESC**.

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

Lorsqu'un sol contenant du soufre en concentrations > 2 000 ppm présente un potentiel acidogène négatif (voir le tableau 2) et un potentiel de génération de sulfure d'hydrogène négatif ou respectant les concentrations du tableau 3, il sera **géré en fonction des autres contaminants qui y sont présents, le cas échéant**.

La gestion du sol devra alors se faire conformément à la Grille de gestion des sols excavés présentée à l'annexe 5 du Guide d'intervention.

Par exemple, un sol dont les contaminants autres que le soufre sont présents en concentrations ≤ aux critères A de l'annexe 2 du Guide d'intervention pourra être utilisé sans restriction sur tout terrain. De la même façon, selon qu'un sol contient des contaminants en concentrations < aux critères B (valeurs limites de l'annexe I du RPRT); ≤ aux critères B; ≥ aux critères B, mais ≤ aux critères C (valeurs limites de l'annexe II du RPRT); < aux critères de l'annexe I du RESC, ou ≥ aux critères de l'annexe I du RESC, il sera géré en fonction des différentes options présentées dans la Grille de gestion des sols excavés.

### La gestion des sols contenant du H<sub>2</sub>S

Si l'étude sommaire de l'historique du terrain ou si les conditions qu'on y observe permettent de **soupçonner le dégagement de H<sub>2</sub>S**, il convient d'effectuer des prélèvements représentatifs de gaz dans le sol à l'aide de

1 Essentiellement, les conditions pertinentes de l'article 4 sont les suivantes : l'annexe I du RESC doit être respectée en ce qui concerne les contaminants autres que le soufre, et le sol doit contenir 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  $1 \times 10^{-4}$  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 doivent être < critères B et les autres contaminants < critères C.

puits d'exploration adaptés ou de sondes et de faire le dosage à l'aide d'un appareil de détection du H<sub>2</sub>S dont la limite de détection permet la comparaison aux valeurs de référence présentées dans le tableau 3.

Le barème de référence considéré ici est **la norme de qualité de l'air ambiant de 4,3 ppb ou 6 ug/m<sup>3</sup> 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 (H<sub>2</sub>S) puisque le milieu ambiant est généralement oxydant et que les conditions pour la production de H<sub>2</sub>S sont particulières. Celles-ci nécessitent un milieu réducteur comportant de la matière organique 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 H<sub>2</sub>S est de 15,4 ppb avec un seuil inférieur de 0,5 ppb. Il est

recommandé de faire l'analyse du H<sub>2</sub>S 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 l'air interstitiel du sol à différentes profondeurs. Par exemple, les valeurs maximales acceptables sont de 2 867 ppm pour les échantillons prélevés à une profondeur de 1 mètre et de 4 674 ppm à 2 mètres, et ainsi de suite en fonction de la profondeur d'échantillonnage. Cela correspond à la norme d'air ambiant du RAA obtenue en multipliant la concentration de sulfure d'hydrogène dans l'air interstitiel du sol par le facteur d'atténuation correspondant à la profondeur du prélèvement. En ce qui concerne les mesures qui seraient prises à une profondeur intermédiaire à celles indiquées dans le tableau 3, il est recommandé d'appliquer le critère associé à la profondeur la moins importante. Par exemple, pour une mesure prise à 4 mètres de profondeur, on appliquerait le critère du tableau 3 associé à la profondeur de 3 mètres (7 049 ppm).

**Tableau 3**

Plages de concentrations de H <sub>2</sub> 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	1,5 x 10 <sup>-6</sup>	2 867	4,3
1,5	1,2 x 10 <sup>-6</sup>	3 583	4,3
2	9,2 x 10 <sup>-7</sup>	4 674	4,3
3	6,1 x 10 <sup>-7</sup>	7 049	4,3
5	3,7 x 10 <sup>-7</sup>	11 622	4,3
7	2,6 x 10 <sup>-7</sup>	16 538	4,3
10	1,8 x 10 <sup>-7</sup>	23 889	4,3
15	1,2 x 10 <sup>-7</sup>	35 833	4,3
20	9,2 x 10 <sup>-8</sup>	46 739	4,3

\* Ministry of Environment and Climate Change Strategy, British Columbia. *Protocol 22 for contaminated sites – Application of vapour attenuation factors to characterize vapour contamination*, 2017, 11 p.

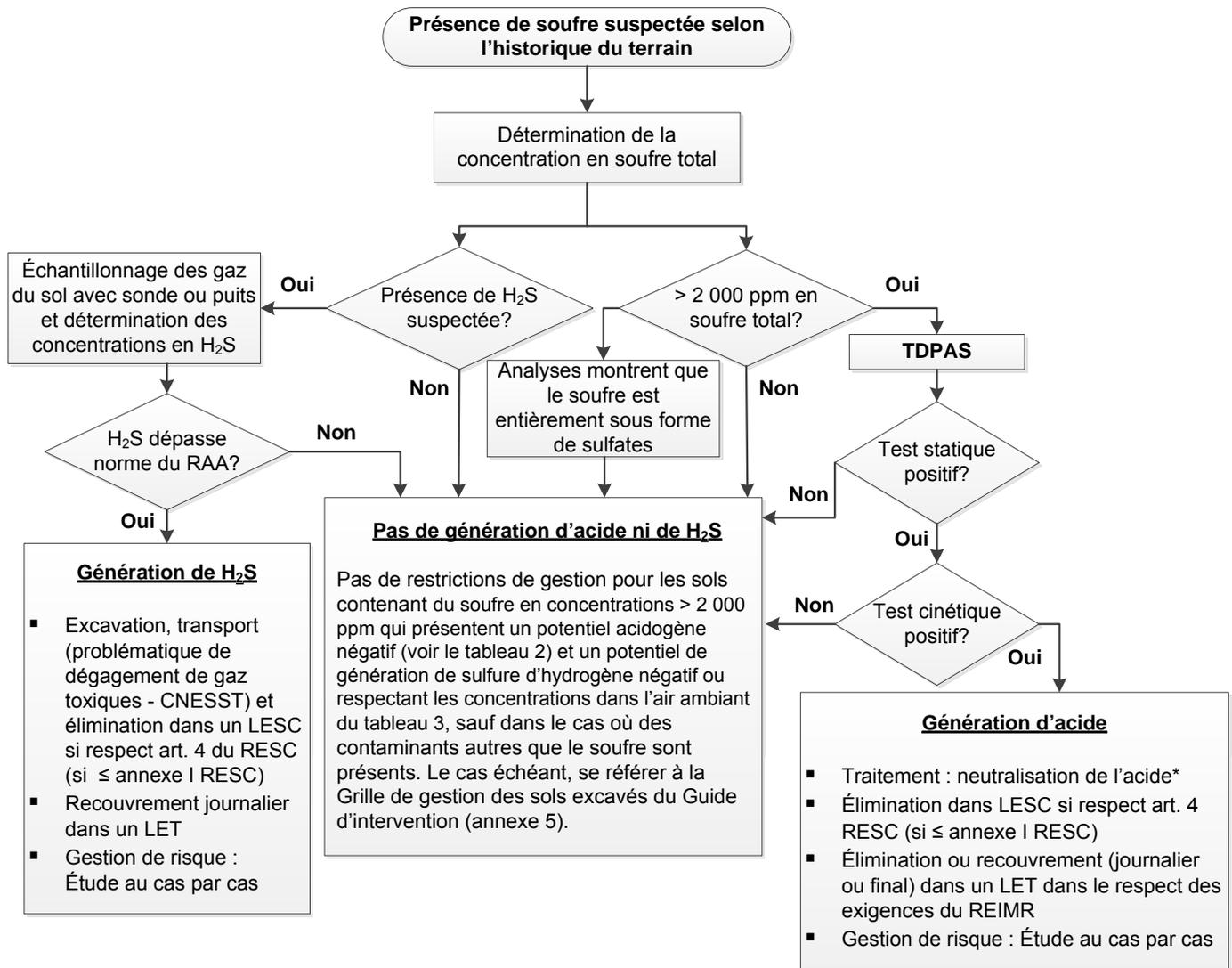
Lorsque **le sol dégage du sulfure d'hydrogène en concentrations supérieures aux valeurs du tableau 3**, il doit être éliminé dans un LESC respectant les exigences du RESC. Cependant, l'excavation de ces sols peut présenter des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs. Les problèmes sont 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 dans 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.