

Descriptif succinct du logiciel

## **PlumBumRisk 1.0**

un outil d'évaluation des risques des stands de tir,  
basé sur le programme Excel

Décembre 2011

## Concepteurs et droits d'auteur

Le logiciel PlumBumRisk 1.0 a été mis au point sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) dans le cadre d'un travail de Master réalisé à l'Institut de géologie de l'Université de Berne par M. Dominik Rosch (édité en 2009)<sup>1</sup>.

Copyright: Office fédéral de l'environnement OFEV

autorité de la Confédération suisse) 2011

Le logiciel PlumBumRisk développé par l'Université de Berne sur mandat de l'OFEV est protégé par la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (loi sur le droit d'auteur, LDA)<sup>2</sup>.

Groupe d'accompagnement technique

Urs Eggenberger - Institut de géologie – Université de Berne

Urs Mäder - Institut de géologie – Université de Berne

Thomas Lepke - Office fédéral de l'environnement (OFEV) – Division Sols

## Responsabilité civile

Le logiciel PlumBumRisk a été développé avec le plus grand soin. Toutefois, ni l'OFEV (mandant), ni l'Université de Berne (développeur) ne peuvent garantir l'exactitude des résultats ou la précision, la fiabilité, l'actualité et l'exhaustivité du logiciel ou de son contenu.

L'OFEV se réserve expressément le droit de modifier ou de supprimer le logiciel dans son intégralité ou d'en effacer certaines parties, et ce, sans avertissement préalable. La responsabilité de l'OFEV ou de l'Université de Berne ne peut être engagée en cas de dommages matériels ou immatériels occasionnés par l'accès aux informations publiées sur PlumBumRisk, par l'utilisation, respectivement la non-utilisation de ses résultats, ou par des problèmes techniques.

Sont expressément exclus tous les dommages qui résulteraient d'une utilisation inadéquate ou illicite du logiciel PlumBumRisk ou de ses résultats, pris comme bases de décision dans le cadre du traitement d'un site contaminé. Les résultats produits par ce logiciel peuvent servir à évaluer les risques d'un site pollué, en complément aux études habituelles.

---

<sup>1</sup> Rosch, D. 2009. Travail de Master réalisé à l'Institut de géologie de l'Université de Berne. « Mobilisierung von Schwermetallen bei belasteten Standorten. Fallstudie Deponie Oberfeld • Mobilität von Pb und Sb bei Schiessanlagen » (non traduit)

<sup>2</sup> Loi fédérale du 9 octobre 1992 sur le droit d'auteur et les droits voisins (loi sur le droit d'auteur, LDA), RS 231.1)



## Description

PlumBumRisk 1.0 est un outil simplifié d'évaluation des concentrations maximales de plomb (Pb) et d'antimoine (Sb) à l'aval des stands de tir, basé sur le programme Excel<sup>3</sup>. Il peut aussi servir à estimer sommairement la capacité de rétention d'un sol, par rapport au plomb ou à l'antimoine.

L'outil est fondé sur le modèle de calcul PHREEQC<sup>4</sup>, et fait la distinction entre les zones non saturées et saturées du sol. Le tableur simplifie fortement le phénomène de mobilisation des éléments dans le sol non saturé, et traite le transport des éléments dans le sol saturé principalement sur la base de leur dilution et de leur dispersion. Les concentrations de plomb et d'antimoine calculées à l'aval des stands de tir sont des valeurs maximales estimées sur la base d'hypothèses relatives à leur mobilisation.

Le logiciel PlumBumRisk 1.0 a été conçu à l'intention des administrations cantonales spécialisées, pour leur permettre d'effectuer une première évaluation des risques liés aux sites contaminés. Bien entendu, ce logiciel est aussi à disposition d'autres cercles intéressés, et ce, gratuitement.

## Champ d'application

La Suisse possède plusieurs milliers de stands de tir, certains d'entre eux encore en activité, d'autres, hors service. En vertu de la définition de l'art. 2 de l'ordonnance sur les sites contaminés<sup>5</sup>, nombreux sont les stands de tir qui nécessitent un assainissement. Les cantons et les communes sont chargés de vérifier que l'assainissement des sites contaminés se fait conformément aux prescriptions de l'ordonnance susmentionnée. Il leur est pourtant souvent difficile, sur la base des rapports fournis, d'évaluer le risque effectif de contamination et l'urgence des mesures à prendre. Le logiciel PlumBumRisk 1.0 permet d'évaluer sommairement les concentrations de plomb et d'antimoine en un point donné des eaux souterraines situé à l'aval d'un site contaminé, mais aussi d'estimer la capacité de rétention de ces substances dans le sous-sol. En ce sens, il représente un instrument facilitant l'établissement de priorités d'assainissement ou permettant de décider s'il y a lieu – ou non – d'assainir un site contaminé (cf. art. 9 OSites: al. 1, let. a en relation avec al. 2, let. d).

---

<sup>3</sup> Microsoft Excel est une marque déposée. PlumBumRisk est une feuille Excel distribuée gratuitement.

<sup>4</sup> PhreeqC est un programme de modélisation d'une administration américaine (US Geological Service)

<sup>5</sup> Ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites, RS 814.680)

## Contexte du modèle et structure du logiciel

Le logiciel PlumBumRisk 1.0 se compose de deux masques de saisie basés sur le programme Microsoft Excel:

- 1) Masque intitulé « Calcul des concentrations », permettant de déterminer les concentrations maximales de plomb et d'antimoine dans un aquifère, à l'aval d'une source de pollution.
- 2) Masque intitulé « Calcul des capacités de rétention », pour évaluer les capacités de rétention du sous-sol.

### Bases de la démarche

Ci-après, on trouvera un résumé des bases de l'instrument PHREEQC, qui ont été simplifiées pour la mise en œuvre au moyen des masques Excel du présent logiciel. Pour obtenir un descriptif plus détaillé, il faut s'adresser aux concepteurs. Afin de structurer leur modèle, ces derniers ont tenu compte de la source de la contamination (dans la couche supérieure de sol et le sous-sol), de la dispersion des polluants dans un milieu non saturé et de leur transport dans un milieu saturé. En se fondant sur les modélisations effectuées par Wersin (2007)<sup>6</sup>, ils ont représenté les principaux processus au moyen du programme de modélisation géochimique PHREEQC (cf. fig. 1).

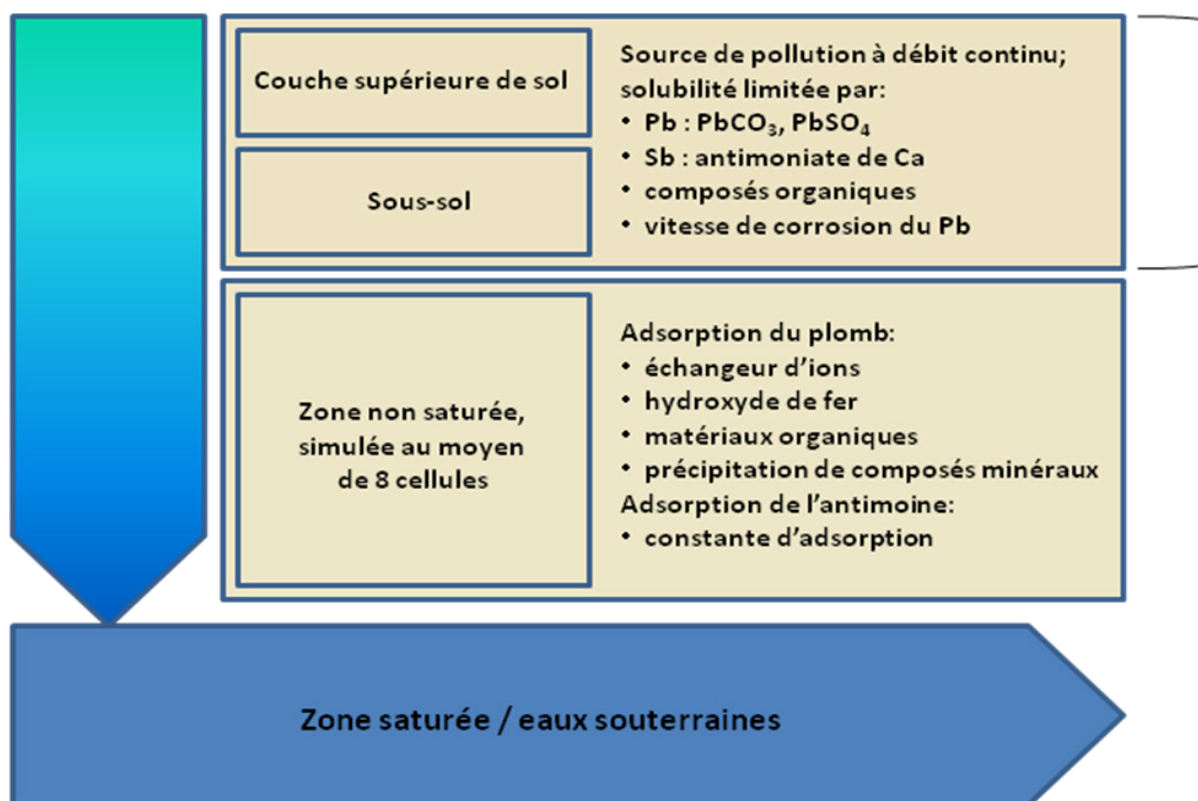


Fig. 1: Représentation schématique des processus

<sup>6</sup> Wersin, P. (2007): *Gefährdung von Grundwasser durch Schiessanlagen, Blei und Antimon; sur mandat de l'OFEV, rapport n° 00174.3 rédigé par Geotest (non traduit)*

## Mobilisation des polluants dans la zone non saturée

S'agissant de la mobilisation de l'antimoine, les concepteurs ont admis une source à débit constant, laquelle correspond à l'équilibre chimique de l'antimoniite de calcium. La rétention de l'antimoine a été définie par une constante d'adsorption ( $K_d$ ) égale à 20 l/kg. La constante  $K_d$  a été estimée sur la base d'expérimentations d'adsorption et de désadsorption. Ces hypothèses sont plausibles, car on a constaté que cette valeur reste constante dans une grande palette de taux d'acidité (pH) et pour des concentrations de substances très variables.

Pour le plomb, en revanche, le modèle a été élaboré d'une manière plus complexe. Dans la zone de sol non saturée, les concepteurs ont admis une pression partielle de  $\text{CO}_2$  multipliée par dix par rapport à la pression atmosphérique, ainsi que, pour la composition de l'eau interstitielle, une teneur standard en calcium, sodium, sulfates et chlorures. L'eau de percolation est calculée pour être en équilibre avec l'anglésite, la cérusite, la gibbsite ainsi que – suivant le scénario choisi – la calcite.

La zone non saturée est subdivisée en huit cellules. Il n'est pas tenu compte du phénomène de dispersion latérale, qui n'a pas d'effets sur de petites distances. Les concepteurs ont admis un taux d'infiltration constant. Ils n'ont pas prévu, dans leur modèle, que la source de plomb et d'antimoine se dégrade.

S'agissant du plomb, sa capacité de rétention dépend largement du type de sous-sol; les facteurs déterminants sont ici la teneur en argiles et en hydroxyde de fer, ainsi que la teneur en calcite. Si le sous-sol ne contient pas de calcite, la restitution du plomb et de l'antimoine dans les eaux souterraines sera beaucoup plus rapide. Si de la calcite est présente dans le sol, elle jouera le rôle d'une substance-tampon qui freinera la mise en solution du plomb. En présence d'argiles, le plomb se fixe sur elles par un phénomène d'échange d'ions; en présence d'hydroxyde de fer, il se dépose à leur surface. Les deux phénomènes font baisser la teneur en plomb et en antimoine dissous et retardent ainsi leur migration dans le sol.

Le graphique ci-dessous représente les répercussions de différentes hypothèses (pas de carbonates, 1 % ou 10 % de carbonates dans le sol). En l'absence de carbonates, la concentration en plomb dans l'eau qui passe de la zone de sol non saturée à la zone saturée correspond à la concentration d'infiltration, à savoir 0,66 mg/l Pb. Si la teneur en carbonates atteint 10 %, la concentration en plomb est nettement réduite, contrôlée qu'elle est par le carbonate de plomb. Si la teneur en carbonates atteint 1 %, on observe une mobilisation du plomb dès que tous les carbonates sont dissous – et qu'ils ne jouent donc plus le rôle de matériaux-tampon. A un tel stade, lorsque le pH chute rapidement, le plomb adsorbé est mobilisé très rapidement et sa concentration peut atteindre un multiple de la concentration d'infiltration.

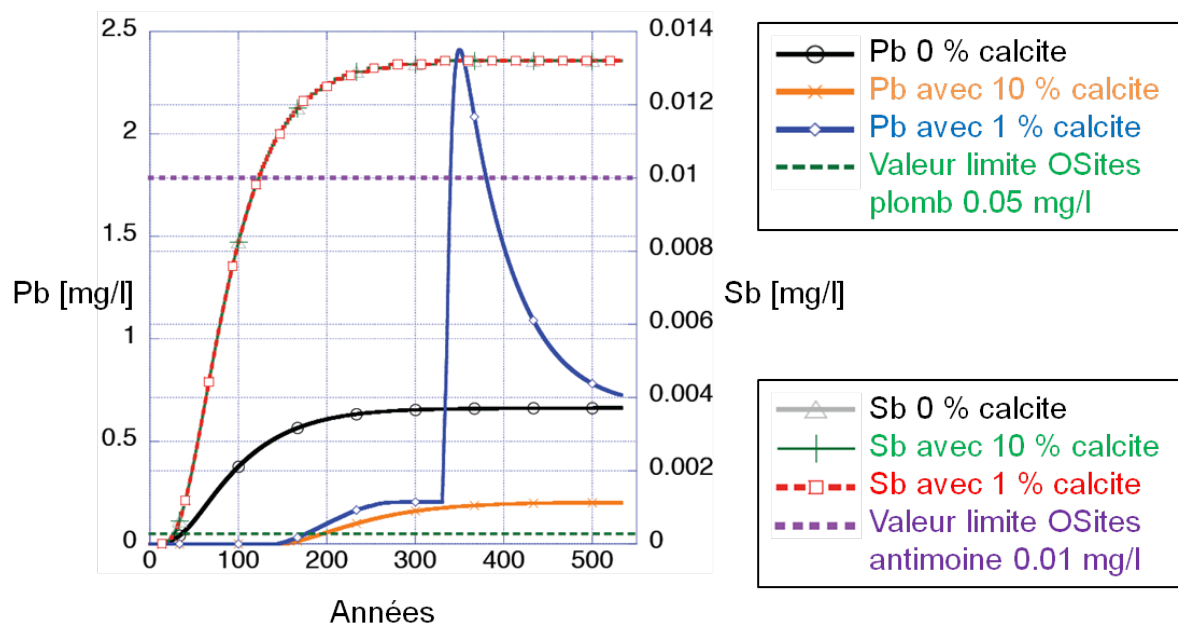


Fig. 2:

Courbes de restitution du plomb et de l'antimoine à la sortie de la zone non saturée de sol, pour différentes teneurs en calcite. Les concentrations de polluants dans l'eau interstitielle à l'entrée dans la nappe sont des constantes; elles sont les suivantes: 0,66 mg/l Pb et 0,0132 mg/l Sb

## Zone saturée

L'eau interstitielle dont il a été question ci-dessus finit par s'infiltrer dans la zone saturée. Si la zone non saturée ne peut plus jouer son rôle de rétention, le plomb et l'antimoine dissous dans l'eau interstitielle parviennent dans les eaux souterraines, selon les courbes de restitution présentées. Les intrants sont fonction de la quantité de précipitations, de la surface d'écoulement, de la porosité du sol ainsi que de sa capacité de rétention. Les mêmes processus géochimiques sont à l'œuvre dans la zone saturée que dans celle non saturée, à la différence que les phénomènes de dispersion et de dilution jouent un rôle de premier plan dans la zone saturée.

## Processus pris en compte par le logiciel PlumBumRisk 1.0

Des fragments de projectiles ont pénétré dans le sol, et des réactions d'altération libèrent du plomb et de l'antimoine. Ces réactions varient beaucoup d'un site à l'autre (pluviométrie, teneur en éléments organiques et en éléments minéraux du sol, etc.). Le logiciel PlumBumRisk se contente ici de déterminer des taux invariables de dissolution pour les sous-sols riches en carbonates ou dépourvus de carbonates. Pour calculer la quantité de métaux lourds libérés, les concepteurs ont pris en considération les quantités annuelles de précipitation. Ils n'ont pas tenu compte des phénomènes qui retardent le passage de ces métaux lourds à travers la zone non saturée. En effet, ils partent de l'idée que, pour évaluer le risque de pollution, il faut se baser sur un état stationnaire, qui ne s'installe qu'au bout d'une très longue période.

La quantité résiduelle de plomb et d'antimoine dissous dans la zone saturée dépend beaucoup de la teneur en argiles du sous-sol (échange d'ions) et de la présence d'hydroxyde de fer (adsorption superficielle). Une fois que les capacités d'adsorption de la zone saturée sont épuisées, un état stationnaire du sol s'installe, présentant une concentration constante de polluants. Dans le logiciel PlumBumRisk, seule cette concentration-ci est calculée. Les principaux paramètres à prendre en compte sont alors la dilution et la dispersion. Le second masque de saisie du logiciel permet d'évaluer la quantité de métaux lourds affectée par des processus de retard, et présente en un point donné situé à l'aval de la source de pollution. Cela permet d'estimer sommairement la quantité de métaux lourds qui pourrait ou non atteindre le point d'observation situé à l'aval de la source.

Dans la zone non saturée, les paramètres ci-après ont été calibrés pour les calculs:

- porosité de 30 %, dont les  $\frac{2}{3}$  des pores sont saturés en eau,
- taux d'infiltration égal à  $\frac{1}{3}$  de la pluviométrie annuelle moyenne, ce qui correspond à une vitesse linéaire de déplacement de l'eau interstitielle de 1,5 m/an, selon la loi de Darcy.

Dans les zones saturées, on a fixé le coefficient de dispersion à 10 % ou  $\frac{1}{10}$  de la vitesse de déplacement des eaux souterraines dans la direction de leur écoulement.



## Mode d'emploi du logiciel

Pour utiliser le logiciel PlumBumRisk 1.0, il est nécessaire de disposer du programme Microsoft Excel.

Le document contient deux masques de saisie que l'on trouve à la feuille « Saisie » (cf. fig. 3a & 3b). La figure 3a permet de calculer la concentration en métaux lourds à l'aval du site (avec graphique correspondant). La figure 3b permet d'estimer la capacité de rétention du sous-sol en un point donné à l'aval de la source. La deuxième et la troisième feuille d'Excel (« Linesource », capacité de rétention) contiennent les formules mathématiques et les constantes permettant de calculer les concentrations maximales de plomb et d'antimoine dans le sol, ainsi que la capacité de rétention de ce dernier pour ces métaux lourds. Ces données constituent la base utilisée par le logiciel PlumBumRisk 1.0. L'utilisateur ne peut les modifier. Il est toutefois possible de passer outre l'interdiction d'écriture au moyen du mot de passe « plumbum ».

Définition du scénario / détermination de la concentration en Pb	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
Teneur en calcite du sol > 2 % en poids. Réponse: oui / -			oui
Teneur en calcite du sol < 2 % en poids. Si oui, indiquer une valeur mesurée ou une valeur empirique de la concentration en Pb dans l'eau interstitielle [mg/l]. Réponse : valeur / -		mg/l	-
Teneur en gypse du sol: env. 30 % ou présence de sulfates dans les eaux souterraines [960 mg/l]. Réponse : oui / -			-
<b>Paramètres du système</b>			
Pluviométrie annuelle	N	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a	1
Largeur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	B	m	4
Longueur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	L	m	20
Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	T	m	2
Vitesse d'écoulement des eaux souterraines	V	m/j	0.5
Angle entre l'axe d'écoulement et l'axe de la butte: si ces deux axes sont parallèles, angle = 0° ; si les deux axes divergent, angle = 0 à 90°; si la butte pare-balles n'a pas une forme allongée (long. ≈ larg.), angle = -	γ	°	45
<b>Intrants basés sur la modélisation PHREEQC</b>			
Concentration (Co) de Pb au passage dans la zone saturée: variable en fonction du scénario choisi	Co Pb	mg/l	0.2
Concentration d'antimoine au passage dans la zone saturée = 1/50 de la concentration en Pb	Co Sb	mg/l	0.004

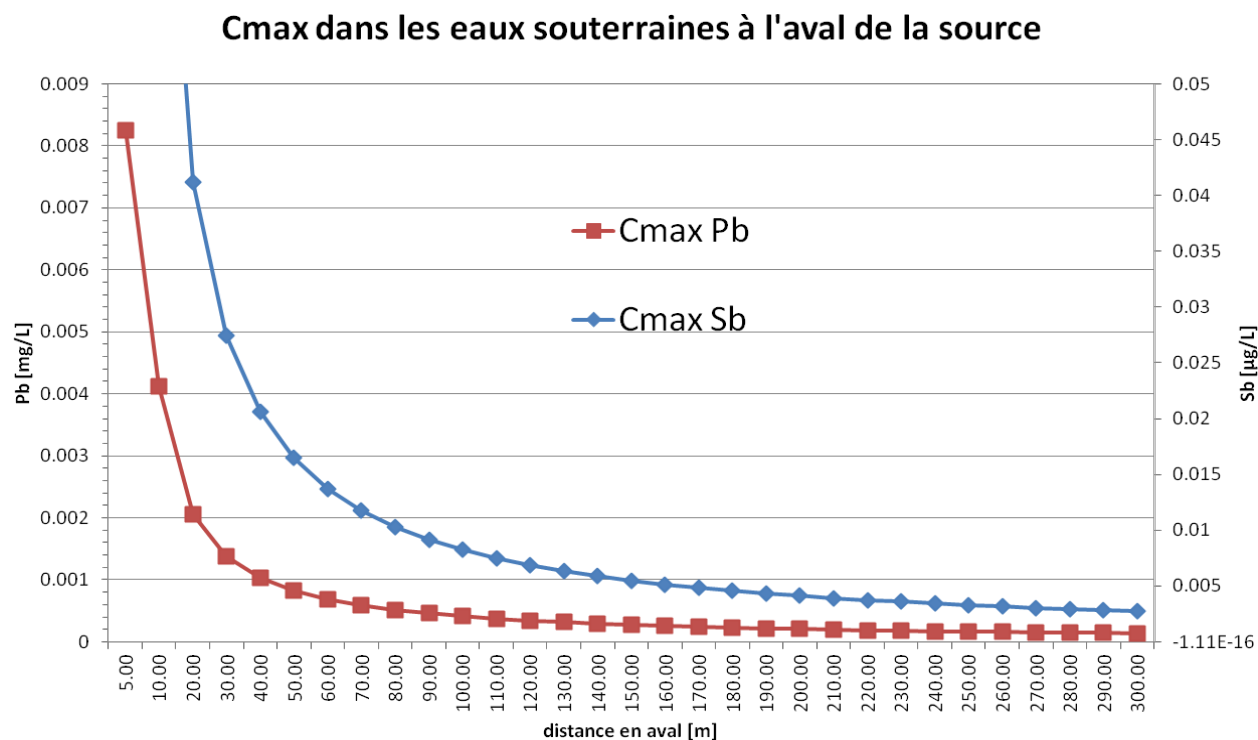


Fig. 3a: Concentrations maximales de Pb et Sb dans les eaux souterraines à l'aval de la source

Estimation de la capacité de rétention du sous-sol	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
Pollution résiduelle au Pb dans le sous-sol, après assainissement du site	Cs	mg/kg	1000
Longueur de la surface assainie	Ls	m	20
Largeur de la surface assainie	Bs	m	60
Surface de l'aire assainie	As	m <sup>2</sup>	1200
Profondeur moyenne de la source de pollution au Pb dans le sous-sol	Ts	m	0.5
Teneur moyenne en argiles du sous-sol	Ex	%	7.5
Teneur moyenne en oxydes de fer	Fe	%	0.25
Largeur du courant souterrain dans la direction d'écoulement (Bs Bu ≥ Ls)	Bu	m	6
Longueur de l'aquifère (jusqu'au point d'observation)	Laq	m	100
Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	Baq	m	2
Rapport entre le nombre maximum d'atomes de Pb et de Sb dissous et le nombre de sites de fixation	Vr	-	0.35

Fig. 3b: Estimation de la capacité de rétention du sous-sol

## Description des paramètres

La figure 4 illustre le masque de saisie établi à l'aide de Microsoft Excel, pour déterminer les concentrations maximales de plomb et d'antimoine dans les eaux souterraines. Les champs à fond vert doivent être remplis manuellement. Les champs à fond orange présentent les valeurs calculées sur la base des données introduites, et qui décrivent l'état de l'infiltrat au moment de la pénétration dans la zone saturée.

	Définition du scénario / détermination de la concentration en Pb	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
<b>a</b>	Teneur en calcite du sol > 2 % en poids. Réponse: oui / -			oui
<b>b</b>	Teneur en calcite du sol < 2 % en poids. Si oui, indiquer une valeur mesurée ou une valeur empirique de la concentration en Pb dans l'eau interstitielle [mg/l]. Réponse : valeur / -		mg/l	-
<b>c</b>	Teneur en gypse du sol: env. 30 % ou présence de sulfates dans les eaux souterraines [960 mg/l]. Réponse : oui / -			-
<b>Paramètres du système</b>				
<b>d</b>	Pluviométrie annuelle	N	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a	1
<b>e</b>	Largeur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	B	m	4
<b>f</b>	Longueur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	L	m	20
<b>g</b>	Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	T	m	2
<b>h</b>	Vitesse d'écoulement des eaux souterraines	V	m/j	0.5
<b>i</b>	Angle entre l'axe d'écoulement et l'axe de la butte: si ces deux axes sont parallèles, angle = 0° ; si les deux axes divergent, angle = 0 à 90°; si la butte pare-balles n'a pas une forme allongée (long. ≈ larg.), angle = -	γ	°	45
<b>Intrants basés sur la modélisation PHREEQC</b>				
<b>j</b>	Concentration (C <sub>0</sub> ) de Pb au passage dans la zone saturée: variable en fonction du scénario choisi	C <sub>0</sub> Pb	mg/l	0.2
<b>k</b>	Concentration d'antimoine au passage dans la zone saturée = 1/50 de la concentration en Pb	C <sub>0</sub> Sb	mg/l	0.004

Fig. 4: Masque de saisie pour déterminer les concentrations maximales de plomb et d'antimoine dans les eaux souterraines

Paramètres	Description
a	Si la teneur en calcite du sol > 2 % en poids, la teneur en plomb dissous est suffisamment limitée par la précipitation de la cérusite (effet tampon). La concentration en Pb dans l'eau interstitielle est minime. Si l'utilisateur répond par « oui » dans ce champ, le logiciel PlumBumRisk 1.0 se base sur une concentration en Pb à l'entrée dans la nappe de 0,2 mg/l. La calcite n'a aucune influence sur la concentration d'antimoine.
b	Si la teneur en calcite < 2 % en poids, la capacité de retenir le Pb dans le sol est limitée dans le temps. La concentration en Pb dans l'eau interstitielle augmente au cours d'une longue période. Les concepteurs du logiciel ont prévu, en pareil cas, une fourchette de valeurs pouvant aller de 0,2 à 10 mg/l, caractérisant la concentration en Pb à l'entrée dans la nappe.
c	Si la teneur en gypse du sol est très élevée (> 30 %) et/ou que les eaux souterraines sont très riches en sulfates, la précipitation de l'anglésite limite la concentration en Pb dans l'eau interstitielle (effet tampon). Ce cas de figure est cependant extrêmement rare. Le logiciel PlumBumRisk 1.0 se fonde alors sur une concentration en Pb dans l'eau interstitielle, à l'entrée dans la nappe, de 3 mg/l.
d	Le logiciel PlumBumRisk 1.0 se base sur l'approximation suivante: 1/3 des précipitations annuelles s'infiltre dans le sol.
e / f	Valeurs destinées au calcul des bilans de masse
g	Distance verticale entre la surface du sol et le niveau piézométrique des eaux souterraines.
h	Vitesse d'écoulement des eaux souterraines [m/j]
i	En un point donné dans la nappe à l'aval du site, les <u>concentrations</u> varient en fonction de l'angle entre l'axe de l'écoulement et l'axe de la butte pare-balles d'un stand de tir. Si l'axe d'écoulement est parallèle à l'axe de la butte (angle = 0°), il faut additionner les concentrations par unité de surface [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]. Si l'axe d'écoulement est perpendiculaire à celui de la butte, la concentration calculée diminue. Le logiciel a prévu un facteur de corrélation entre cette concentration et l'angle entre les deux axes. Toutefois la charge en polluants n'est pas modifiée.
j	Cette variable décrit, en fonction du scénario choisi, la concentration en Pb dans l'eau interstitielle qui atteint la zone saturée du sol lorsqu'elle parvient dans les eaux souterraines (concentration entrante).
k	Cette variable décrit, en fonction du scénario retenu, la concentration en Sb dans l'eau interstitielle qui atteint les eaux souterraines. Dans cet outil, les concepteurs ont admis que la concentration en Sb est toujours égale à $1/50$ de la concentration en Pb – bien que la concentration en antimoine ne soit pas dépendante de la teneur en calcite.

La figure 5 illustre le masque de saisie établi à l'aide de Microsoft Excel pour estimer la capacité de rétention de la zone saturée. Les champs à fond vert doivent être remplis manuellement. Les champs à fond blanc contiennent des résultats intermédiaires déterminés par le logiciel PlumBumRisk 1.0, sur la base des données introduites, pour calculer ensuite la capacité de rétention du sous-sol (indiquée dans le champ à fond orange).

Estimation de la capacité de rétention du sous-sol		Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
<b>q</b>	Pollution résiduelle au Pb dans le sous-sol, après assainissement du site	Cs	mg/kg	1000
<b>r</b>	Longueur de la surface assainie	Ls	m	20
<b>s</b>	Largeur de la surface assainie	Bs	m	60
	Surface de l'aire assainie	As	m <sup>2</sup>	1200
<b>t</b>	Profondeur moyenne de la source de pollution au Pb dans le sous-sol	Ts	m	0.5
<b>u</b>	Teneur moyenne en argiles du sous-sol	Ex	%	7.5
<b>v</b>	Teneur moyenne en oxydes de fer	Fe	%	0.25
<b>w</b>	Largeur du courant souterrain dans la direction d'écoulement ( $Bs \leq Bu \leq Ls$ )	Bu	m	6
<b>x</b>	Longueur de l'aquifère (jusqu'au point d'observation)	Laq	m	100
<b>y</b>	Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	Baq	m	2
<b>z</b>	Rapport entre le nombre maximum d'atomes de Pb et de Sb dissous et le nombre de sites de fixation	Vr	-	0.35

Fig. 5: Masque de saisie pour déterminer la capacité de rétention du sous-sol

Paramètres	Description
q	Présence de plomb dans le sous-sol, ou présence résiduelle de plomb après assainissement
r / s	Dimensions de la surface assainie
t	Profondeur moyenne où se situe la source de pollution au Pb dans le sous-sol
u	Plus la teneur en argiles du sol est élevée, plus nombreux sont les sites de fixation des polluants par échange d'ions, et plus importantes, les quantités de polluants retenus.
v	Plus la teneur des sols en hydroxyde de fer est élevée, plus grande est la surface de fixation disponible pour adsorber les atomes de Pb et de Sb.
w	Largeur de l'écoulement des eaux souterraines dans le sens de leur écoulement ( $Bs \leq Bu \leq Ls$ )
x	Distance entre la source de pollution résiduelle et le point d'observation
y	Épaisseur de l'aquifère (épaisseur effective de la couche dans laquelle l'infiltration se produit)
z	Le rapport entre le nombre maximal d'atomes de Pb et de Sb solubles et le nombre de sites de fixation disponibles devrait au mieux se situer entre 0,1 et 1,0. Si ce rapport est > 1,0, des atomes de Pb et de Sb dissous peuvent pénétrer dans les eaux souterraines. Si ce rapport est < 0,5, le sous-sol fait office de barrière géogène.

## Evaluation des résultats et limites de l'outil

Les résultats obtenus grâce au logiciel PlumBumRisk 1.0 doivent être utilisés avec circonspection. Ils ne peuvent servir qu'à évaluer sommairement les risques de pollution et à fixer les buts de l'assainissement. Le logiciel ne doit pas être utilisé comme unique instrument pour formuler ces buts et ne doit être utilisé que pour décrire les phénomènes liés au plomb et à l'antimoine. Notamment, il ne peut pas servir à déterminer le comportement d'autres métaux lourds, tels que le chrome, ni celui des substances organiques.

Il comporte des simplifications. Par exemple, il ne permet pas, d'une part, de réaliser des évaluations diachroniques et, d'autre part, il fixe la concentration en antimoine comme une constante, indépendante du scénario choisi. (Dans le modèle, cette concentration est toujours fixée à  $1/50$  de la concentration en plomb.)

## Exemple d'application du logiciel PlumBumRisk 1.0

### Situation initiale

La ciblirie d'un stand de tir est située en zone S3 de protection des eaux, tandis que la butte pare-balles se trouve dans le secteur A<sub>u</sub>. En vertu de l'OTAS, il est raisonnable de fixer un but d'assainissement égal à 1 000 mg/kg de Pb; les coûts de l'opération sont alors imputables. A une distance de 40 m de la butte se trouve la limite de la zone S2. Par mesure de prévention, il est possible de fixer un but de l'assainissement plus rigoureux pour les zones S1 et S2 (300 mg/kg Pb). Sans présenter de justificatifs, la commune prétend que la capacité de rétention du sous-sol est faible et que sa perméabilité est élevée. S'appuyant sur cette affirmation et arguant du fait que la zone S2 n'est pas très éloignée, elle fixe le but de l'assainissement à 300 mg/kg Pb. Dans le cas présent, le logiciel PlumBumRisk peut être utile. Il permet de vérifier que ce but peut être admis – et donc que les frais d'assainissement sont imputables en vertu de l'OTAS – ou au contraire de conclure que tel n'est pas le cas.

### Valeurs choisies

Etant donné que – selon les indications fournies – la capacité de rétention du sol semble faible, on fixe la teneur en calcite à une valeur < 2 % en poids. Dans le champ « Teneur en calcite du sol > 2 % en poids », on inscrit la valeur « - ». Dans le champ « Teneur en calcite du sol < 2 % en poids », on doit inscrire une valeur située entre 0,2 et 10 mg/l. En cas de faible capacité de rétention, cette valeur doit être plutôt basse. On choisit dans le cas présent 3,6 mg/l. De même, dans le champ « Teneur en gypse du sol: env. 30 % ou présence de sulfates dans les eaux souterraines [960 mg/l] », on inscrit la valeur « - ».

La quantité de précipitations annuelles est estimée à 1,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> par an. On tire du projet d'assainissement les dimensions de la butte pare-balles, la profondeur de l'aquifère et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines. Pour le présent exemple, les valeurs suivantes sont choisies: butte de 20 x 10 m, profondeur de 5 m et vitesse de 1 m/jour. S'agissant de l'angle que forment entre eux les axes de la butte pare-balles et de l'écoulement, on le choisit ici à 45°. En général, il est possible de déterminer cette donnée sur la base de matériel cartographique. Ces valeurs sont saisies au moyen du masque permettant de déterminer les concentrations de Pb et de Sb dans les eaux souterraines (cf. fig. 6a et 6b).

Définition du scénario / détermination de la concentration en Pb	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
Teneur en calcite du sol > 2 % en poids. Réponse: oui / -			-
Teneur en calcite du sol < 2 % en poids. Si oui, indiquer une valeur mesurée ou une valeur empirique de la concentration en Pb dans l'eau interstitielle [mg/l]. Réponse : valeur / -			3.60
Teneur en gypse du sol: env. 30 % ou présence de sulfates dans les eaux souterraines [960 mg/l]. Réponse : oui / -			-
<b>Paramètres du système</b>			
Pluviométrie annuelle	N	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a	1.6
Largeur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	B	m	20
Longueur de la butte pare-balles, pollution > 2 000 mg/kg Pb	L	m	10
Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	T	m	5
Vitesse d'écoulement des eaux souterraines	V	m/j	1
Angle entre l'axe d'écoulement et l'axe de la butte: si ces deux axes sont parallèles, angle = 0° ; si les deux axes divergent, angle = 0 à 90°; si la butte pare-balles n'a pas une forme allongée (long. ≈ larg.), angle = -	γ	°	45
<b>Intrants basés sur la modélisation PHREEQC</b>			
Concentration (Co) de Pb au passage dans la zone saturée: variable en fonction du scénario choisi	Co Pb	mg/l	3.6
Concentration d'antimoine au passage dans la zone saturée = 1/50 de la concentration en Pb	Co Sb	mg/l	0.072

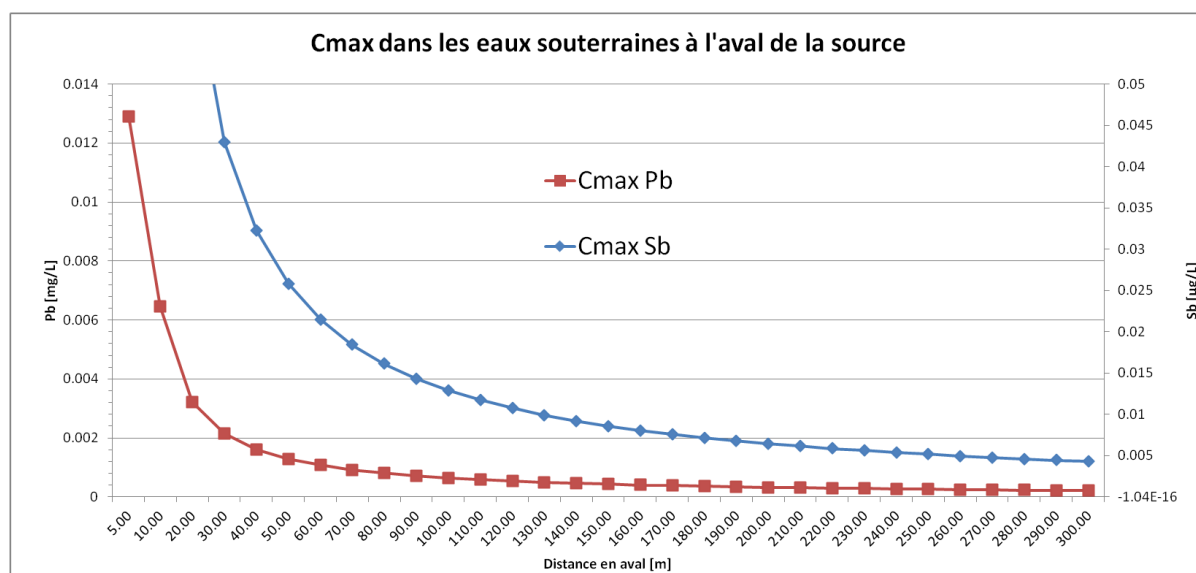


Fig. 6b: Courbes des concentrations maximales de Pb/Sb à l'aval de la source, en fonction du scénario retenu

A 40 m de la butte, les courbes de la fig. 6b indiquent les concentrations maximales de 0,016 mg/l Pb et de 0,032 µg/l Sb. Pour un but d'assainissement de 1 000 mg/kg Pb (fig. 7), le rapport entre le nombre maximal d'atomes de plomb et d'antimoine solubles et le nombre

de sites de fixation disponibles est de 0,2. En d'autres termes, chaque atome dissous de Pb ou de Sb dispose de cinq possibilités de se fixer. A titre de comparaison, la figure 8 fournit les mêmes indications pour un but d'assainissement de 300 mg/kg Pb. On voit que ce rapport s'amenuise à 0,06, ce qui signifie que chaque atome dissous de Pb ou de Sb dispose maintenant de 17 sites pour se fixer.

Estimation de la capacité de rétention du sous-sol	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
Pollution résiduelle au Pb dans le sous-sol, après assainissement du site	Cs	mg/kg	1'000
Longueur de la surface assainie	Ls	m	10
Largeur de la surface assainie	Bs	m	20
Surface de l'aire assainie	As	m <sup>2</sup>	200
Profondeur moyenne de la source de pollution au Pb dans le sous-sol	Ts	m	0.5
Teneur moyenne en argiles du sous-sol	Ex	%	3
Teneur moyenne en oxydes de fer	Fe	%	0.1
Largeur du courant souterrain dans la direction d'écoulement ( $Bs \geq Ls$ )	Bu	m	6
Longueur de l'aquifère (jusqu'au point d'observation)	Laq	m	40
Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	Baq	m	5
Rapport entre le nombre maximum d'atomes de Pb et de Sb dissous et le nombre de sites de fixation	Vr	-	0.20

Fig. 7: Etude de cas: capacité de rétention calculée pour un but d'assainissement de 1 000 mg/kg Pb

Estimation de la capacité de rétention du sous-sol	Symbole	Unité	Fenêtre de saisie
Pollution résiduelle au Pb dans le sous-sol, après assainissement du site	Cs	mg/kg	300
Longueur de la surface assainie	Ls	m	10
Largeur de la surface assainie	Bs	m	20
Surface de l'aire assainie	As	m <sup>2</sup>	200
Profondeur moyenne de la source de pollution au Pb dans le sous-sol	Ts	m	0.5
Teneur moyenne en argiles du sous-sol	Ex	%	3
Teneur moyenne en oxydes de fer	Fe	%	0.1
Largeur du courant souterrain dans la direction d'écoulement ( $Bs \geq Ls$ )	Bu	m	6
Longueur de l'aquifère (jusqu'au point d'observation)	Laq	m	40
Profondeur de l'aquifère (du niveau piézométrique)	Baq	m	5
Rapport entre le nombre maximum d'atomes de Pb et de Sb dissous et le nombre de sites de fixation	Vr	-	0.06

Fig. 8: Etude de cas: capacité de rétention calculée pour un but d'assainissement de 300 mg/kg Pb



En comparant les deux buts de l'assainissement, on s'aperçoit qu'aucun danger imminent ne menace les eaux souterraines dans la zone S2, même en choisissant le but de l'assainissement le moins ambitieux, à savoir 1 000 mg/kg Pb.

Ainsi, le logiciel PlumBumRisk peut s'avérer utile dans des cas semblables. Dans le cas présent, il a permis de se faire une idée réaliste du risque de pollution. Ces résultats ont facilité la prise de décision quant à la nécessité d'assainir le site en vertu de l'art. 9, al. 1, let a OSites, en relation avec l'art. 9, al. 2, let. d OSites. Ils ont également contribué à fixer le but de l'assainissement. Pourtant, il n'est pas judicieux de fixer des buts concrets d'assainissement sur la seule base de ce logiciel; il s'agit de prendre en compte encore d'autres données factuelles et d'autres considérations.