

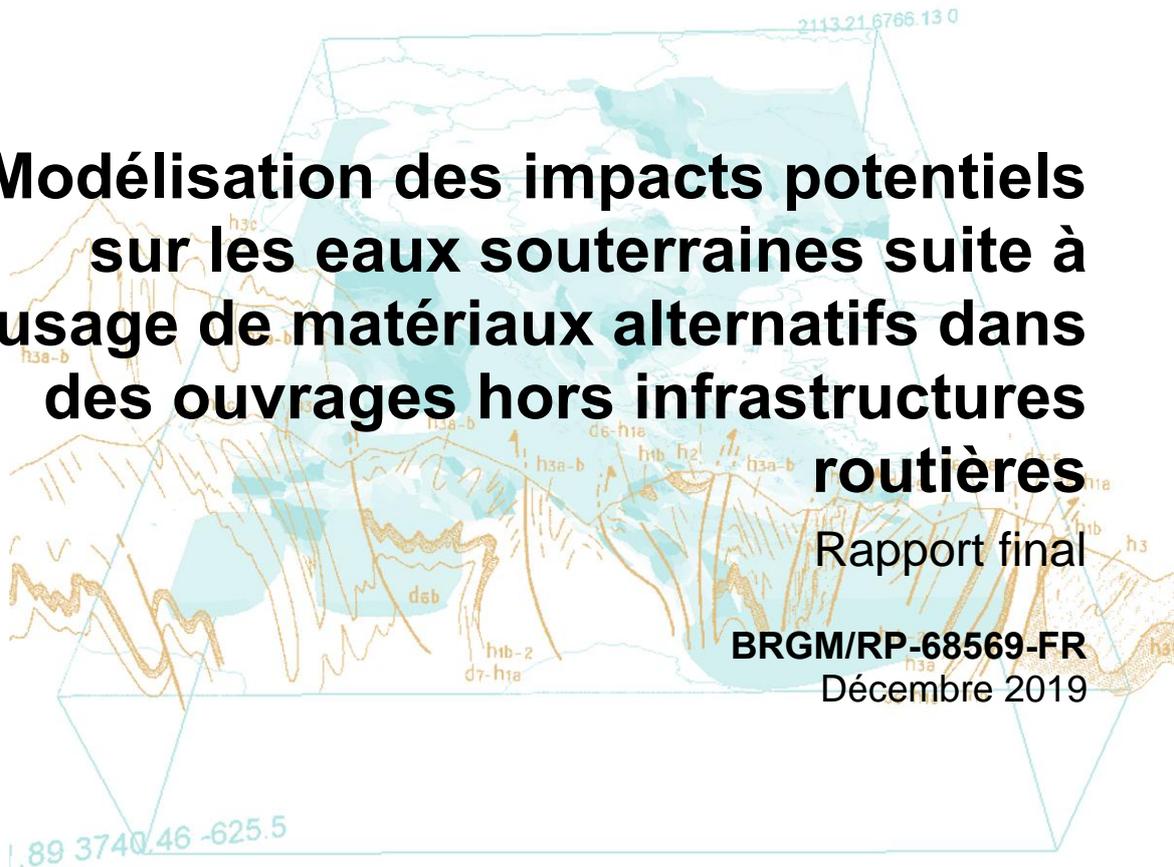


Modélisation des impacts potentiels sur les eaux souterraines suite à l'usage de matériaux alternatifs dans des ouvrages hors infrastructures routières

Rapport final

BRGM/RP-68569-FR

Décembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Modélisation des impacts potentiels sur les eaux souterraines suite à l'usage de matériaux alternatifs dans des ouvrages hors infrastructures routières

Rapport final

BRGM/RP- 68569-FR
Décembre 2019

G. Boissard

Vérificateur :
Nom : Coussy Samuel
Fonction : Ingénieur
Date : 06/01/2020

Signature :



Approbateur :
Nom : Hubert LEPROND
Fonction: Responsable d'Unité
3SP
Date : 08/01/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : modélisation, impact, eaux souterraines, déchets

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

G. Boissard (2019) – Modélisation des impacts potentiels sur les eaux souterraines suite à l’usage de matériaux alternatifs dans des ouvrages hors infrastructures routières. Rapport final. BRGM/RP-68569-FR, 51 p., ill., 7 fig., 10 tabl., 3 ann.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l’autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les modélisations réalisées dans la présente étude se placent dans le cadre du groupe de travail Matériaux qui travaille actuellement sur la possibilité de réutilisation de matériaux alternatifs issus du BTP¹ dans d'autres domaines que celui des infrastructures routières auxquelles ils sont majoritairement dédiés (mur, façade, canalisation, terrasse, toit, mobilier urbain, trottoir, dallage, fondations, ...). L'objectif de ces modélisations est d'évaluer l'impact potentiel de l'utilisation de matériaux alternatifs issus du BTP sur la qualité des eaux souterraines.

Les calculs menés ont permis de fournir des estimations du facteur d'atténuation² (FA) des concentrations source pour différents scénarios envisagés. A terme, ces facteurs d'atténuation seront utilisés pour définir des valeurs seuils de réutilisation des matériaux alternatifs considérés permettant de satisfaire un référentiel de qualité des eaux souterraines donné. Il est à noter que ce dernier point ne fait pas partie de la présente étude.

Les scénarios pris en compte diffèrent selon :

- La profondeur d'immersion dans la nappe de certains types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs ;
- Le contexte climatique ;
- Le type de formations dans les zones saturée et non saturée ;
- L'épaisseur des zones saturée et non saturée ;
- Le gradient hydraulique de la zone saturée ;
- La distance à la zone d'utilisation des matériaux alternatifs.

Parmi tous les scénarios modélisés, le facteur d'atténuation le plus faible correspond à celui des scénarios 8 et 16 du cahier des charges³, pour un point d'observation des concentrations à 20 m de la zone source. Ce facteur, identique pour les 2 scénarios, est de 1,9.

Le facteur d'atténuation le plus élevé correspond à celui du scénario 12 du cahier des charges⁴, pour un point d'observation des concentrations à 200 m de la zone source. Le facteur calculé est de 1 244.

¹ Bâtiments et Travaux Publics

² Le facteur d'atténuation est défini comme le rapport entre la concentration source (concentration d'émission des polluants) et le maximum de concentration calculé en un point situé à l'aval hydraulique de la source.

³ Scénario 8 : Flux de recharge de 250 mm/an ; Zone non saturée de 1,5 m d'épaisseur et composée de limons ; Zone saturée de 7 m d'épaisseur, avec une perméabilité de 3.10^{-3} m/s, une porosité de 7,5 % et un gradient de 0,25 % ; Hauteur sous eau des ouvrages de type 3 de 3,77 m.

Scénario 16 : Flux de recharge de 300 mm/an ; Zone non saturée de 1,5 m d'épaisseur et composée de limons ; Zone saturée de 7 m d'épaisseur, avec une perméabilité de 3.10^{-3} m/s, une porosité de 7,5 % et un gradient de 0,25 % ; Hauteur sous eau des ouvrages de type 3 de 3,77 m.

⁴ Scénario 12 : Flux de recharge de 300 mm/an ; Zone non saturée de 17,5 m d'épaisseur et composée de loam limoneux ; Zone saturée de 75 m d'épaisseur, avec une perméabilité de 4.10^{-4} m/s, une porosité de 0,5 % et un gradient de 1,1 % ; Absence d'ouvrages de type 3.

Par ailleurs, les résultats ont montré que :

- Les paramètres qui apparaissent les plus sensibles sont :
 - La vitesse de Darcy de la nappe (correspondant au produit de la perméabilité par le gradient hydraulique) ;
 - La hauteur sous eau des ouvrages de type 3 (matériaux de construction immergés dans la nappe) ;
 - L'épaisseur de la zone saturée.
- Le flux de recharge, l'épaisseur et le type de zone non saturée ainsi que la porosité de la zone saturée influent peu sur le calcul du facteur d'atténuation.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Contexte et objectifs | 7 |
| 1.1. CONTEXTE | 7 |
| 1.2. OBJECTIF | 7 |
| 2. Méthodologie | 9 |
| 2.1. PRINCIPE | 9 |
| 2.2. SCENARIOS ETUDIES | 10 |
| 2.2.1. Profondeur d'immersion dans la nappe de certains types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs | 10 |
| 2.2.2. Contexte climatique | 12 |
| 2.2.3. Type de formations dans les zones saturée et non saturée | 13 |
| 2.2.4. Epaisseur des zones saturée et non saturée | 13 |
| 2.2.5. Gradient hydraulique..... | 13 |
| 2.2.6. Distances des POC à la zone d'utilisation | 13 |
| 2.2.7. Synthèse..... | 14 |
| 2.3. CODE DE CALCUL UTILISE | 14 |
| 3. Modélisations réalisées | 15 |
| 3.1. MAILLAGE ET ETENDUE DU MODELE..... | 15 |
| 3.2. PARAMETRES DE MODELISATION..... | 16 |
| 3.2.1. Modélisation de l'écoulement..... | 16 |
| 3.2.2. Modélisation du transport..... | 18 |
| 4. Résultats | 21 |
| 4.1. ETUDE DE SENSIBILITE | 22 |
| 4.2. ESTIMATION DE L'EXTENSION HORIZONTALE DU PANACHE..... | 25 |
| 5. Conclusions..... | 27 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Principe des modélisations réalisées | 9 |
| Figure 2 : Types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs | 11 |
| Figure 3 : Dimensions du modèle (vue du modèle dans son intégralité) – Scénario 1 (exagération verticale : x20) | 15 |
| Figure 4 : Maillage du modèle (vue au niveau de la zone source) et localisation des points d'observation (POC) – Scénario 1 | 16 |
| Figure 5 : Flux massique imposé pour les ouvrages de type 3 (en rouge) | 19 |
| Figure 6 : Exemple de panache au bout de 30 ans – Scénario 1 (exagération verticale : x20).. | 21 |
| Figure 7 : Exemple de courbe de restitution au point d'observation à 20 m – Scénario 1 | 22 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Taux de présence des ouvrages considérées | 12 |
| Tableau 2 : Flux de recharge sous les ouvrages considérés | 13 |
| Tableau 3 : Scénarios modélisés | 14 |
| Tableau 4 : Tableau de synthèse de l'architecture du modèle | 15 |
| Tableau 5 : Perméabilités horizontales retenues | 17 |
| Tableau 6 : Paramètres de la ZNS | 18 |
| Tableau 7 : Porosités efficaces retenues | 20 |
| Tableau 8 : Variantes considérées dans l'étude de sensibilité | 23 |
| Tableau 9 : Facteurs d'atténuation obtenus à 20 m pour les différentes variantes de l'étude de sensibilité | 24 |
| Tableau 10 : Estimation de l'extension horizontale du panache | 26 |

Liste des annexes

| | |
|---|----|
| Annexe 1 Cahier des charges | 29 |
| Annexe 2 Facteurs d'atténuation calculés | 35 |
| Annexe 3 Extension horizontale des panaches | 39 |

1. Contexte et objectifs

1.1. CONTEXTE

La Directive Cadre Déchets 2008/98/CE du 19 Novembre 2008 précise que la réutilisation et le recyclage des déchets doivent être privilégiés par rapport à leur élimination en installations de stockage, tout en veillant au respect de la protection de l'environnement et de la santé humaine. Lorsque des ressources secondaires sont valorisées, une des principales cibles potentielles est la ressource en eau souterraine. Pour juger de l'acceptabilité du recyclage, il est donc nécessaire d'évaluer un impact potentiel sur les eaux souterraines. Cette approche a été utilisée dans un contexte d'élaboration de textes règlementaires et de guides par le passé et notamment :

- 1) pour la définition des critères d'admission des déchets de la Directive 1999/31/CE ;
- 2) pour le guide sur l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières.

Le groupe de travail Matériaux qui travaille actuellement sur la possibilité de réutilisation de matériaux alternatifs issus du BTP⁵ dans d'autres domaines que celui des infrastructures routières auquel ils sont majoritairement dédiés, souhaite développer cette approche d'évaluation des risques pour les eaux souterraines.

1.2. OBJECTIF

L'objectif de la présente étude est d'évaluer par modélisation l'impact potentiel de l'utilisation de matériaux alternatifs issus du BTP dans des ouvrages hors infrastructures routières sur la qualité des eaux souterraines. Les calculs fourniront des estimations du facteur d'atténuation⁶ (FA) des concentrations source pour les différents scénarios envisagés.

A terme, ces facteurs d'atténuation seront utilisés pour définir des valeurs seuils de réutilisation des matériaux alternatifs considérés permettant de satisfaire à un référentiel de qualité des eaux souterraines donné. Ce dernier point ne fait pas partie de la présente étude.

⁵ Bâtiments et Travaux Publics

⁶ Le facteur d'atténuation est défini comme le rapport entre la concentration source (concentration d'émission des polluants) et le maximum de concentration calculé en un point situé à l'aval hydraulique de la source.

2. Méthodologie

2.1. PRINCIPE

Plusieurs phénomènes ayant lieu dans les nappes (notamment la dilution, la dispersion, l'adsorption et la dégradation) tendent à faire diminuer les concentrations dans les eaux souterraines au fur et à mesure que la distance à la source de pollution augmente. Ces phénomènes sont appelés phénomènes d'atténuation.

La modélisation numérique permet de simuler ces phénomènes et permet de calculer les concentrations dans les eaux souterraines au niveau de la cible envisagée (appelée point d'observation des concentrations), en aval hydraulique de la zone d'utilisation de matériaux alternatifs issus du BTP (Figure 1).

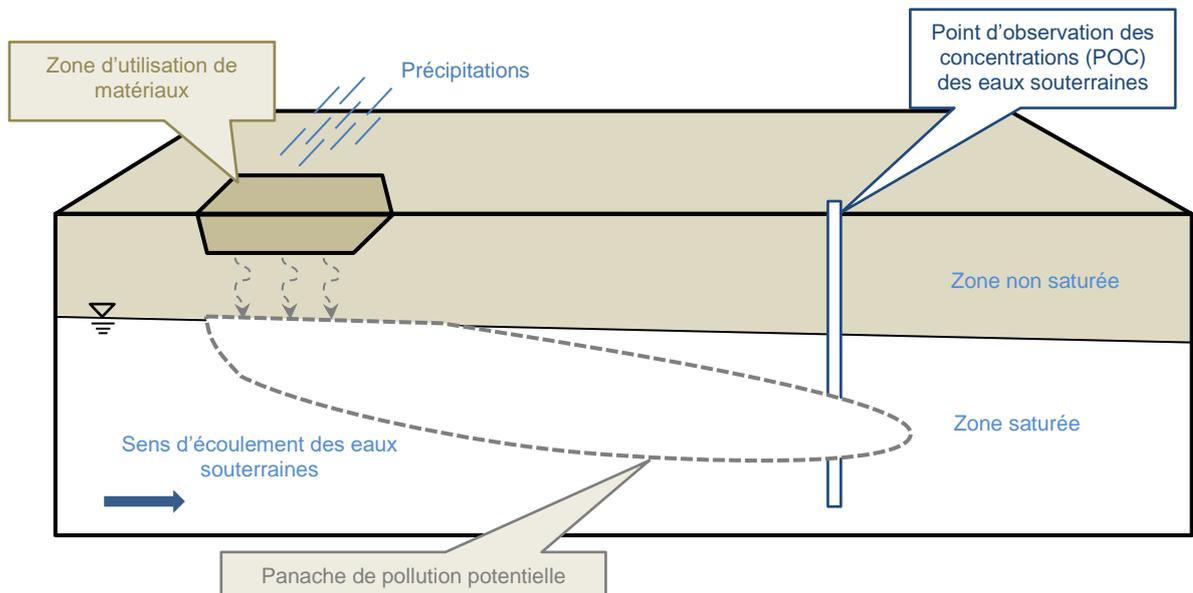


Figure 1 : Principe des modélisations réalisées

Ces calculs permettent de déterminer un facteur d'atténuation (FA) qui est défini comme le rapport entre la concentration source imposée (arbitrairement considérée à 100 mg/L) au niveau de la zone d'utilisation des matériaux et la concentration maximale calculée au niveau du point d'observation des concentrations dans les eaux souterraines (POC) :

$$FA = \frac{\text{Concentration au niveau de la zone d'utilisation des matériaux}}{\text{Concentration maximale calculée au niveau du POC}}$$

Il est à noter que l'ensemble des modélisations réalisées dans le cadre de la présente étude tiennent compte des phénomènes d'atténuation dans la nappe (zone saturée) et la zone non saturée (ZNS).

2.2. SCENARIOS ETUDIES

Ce paragraphe reprend de manière synthétique les éléments définis dans le cahier des charges élaboré par le CEREMA pour la réalisation de cette étude. Davantage de détails pourront être trouvés en Annexe 1.

Différents scénarios ont été simulés, selon :

- La profondeur d'immersion dans la nappe de certains types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs ;
- Le contexte climatique ;
- Le type de formations dans les zones saturée et non saturée ;
- L'épaisseur des zones saturée et non saturée ;
- Le gradient hydraulique ;
- La distance du POC à la zone d'utilisation des matériaux alternatifs.

2.2.1. Profondeur d'immersion dans la nappe de certains types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs

Trois types d'ouvrages pouvant intégrer des matériaux alternatifs issus du BTP ont été considérés selon le flux d'eau susceptible de les traverser (voir annexe 1) :

- Type 1 : A faible flux d'eau : mur, façade (faible exposition initiale), canalisation enterrée, coulis de béton (sous couverture), terrasse, toit, terrassement sous bâti, fondations hors d'eau, mobilier urbain, blocs guidage chantier, bornes, tampons... ;
- Type 2 : A fort flux d'eau : trottoir, (piste cyclable), dallage, place pavée, terrain de sports ;
- Type 3 : Objets immergés dans la nappe: fondations en eau, canalisations.

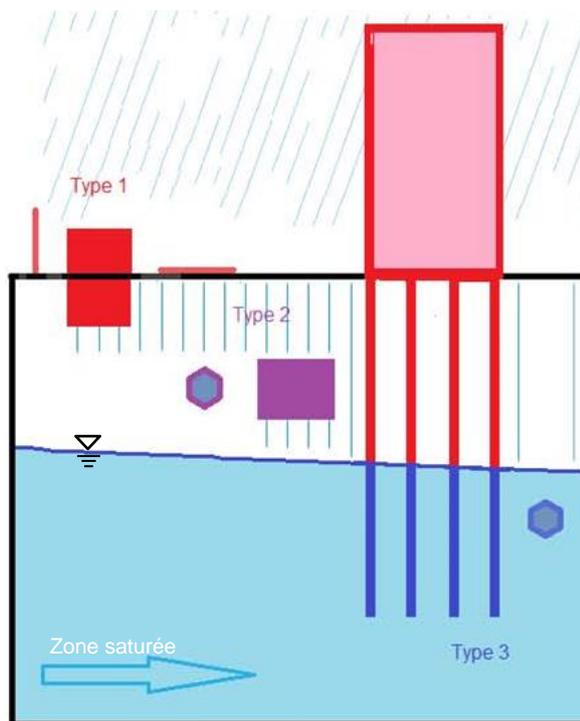


Figure 2 : Types d'ouvrages envisagés pour la réutilisation des matériaux alternatifs

La diversité et la multiplicité d'ouvrages complexifient l'appréciation d'un impact cumulé sur les eaux souterraines. Il est en effet difficile d'intégrer les multiples paramètres que constituent en particulier la morphologie et la disposition dans l'espace de chaque ouvrage. Ainsi, il a été choisi de prendre en compte une zone source intégrant l'ensemble des ouvrages possibles. Au sein de cette zone, les différents ouvrages sont présents en proportion de leur surface d'exposition, par rapport à l'ensemble des surfaces exposées aux entrées d'eau. La densité (ou taux de présence) de chacun des types d'ouvrages a été estimée à partir d'une analyse géostatistique sur 3 villes :

- Une commune fortement urbanisée (Villeurbanne / 1 452 ha et 9 800 hab/km²) ;
- Une commune de moindre densité (Bron / 1 030 ha et 3 800 hab/km²) ;
- Une commune moins urbanisée (aménagée) à habitat plus individuel et dispersé (L'Isle-d'Abeau / 911 ha et 1 700 hab/km²).

Trois densités d'environnement (faiblement, moyennement et très urbanisé) ont été retenues selon le taux de présence de chacun des 3 types d'ouvrages (cf. Tableau 1).

| Densité d'environnement | Taux de présence (%) | | |
|----------------------------|----------------------|--------|--------|
| | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
| Très urbanisé | 22,6 | 5,9 | 3,1 |
| Moyennement urbanisé | 10,3 | 4,8 | 0,6 |
| Faiblement urbanisé | 4,4 | 3,4 | 0 |

Tableau 1 : Taux de présence des ouvrages considérées

Dans le cadre de cette étude, seul un environnement de type « très urbanisé » a été considéré.

Les ouvrages de type 3 (ouvrages immergés, type « fondations profondes ») sont implantés au centre de la zone source. Plusieurs profondeurs d'immersion dans la zone saturée, de 0,24 m à 3,77 m, ont été considérées (voir annexe 1). Leur largeur et leur longueur sont de 17,55 m⁷.

2.2.2. Contexte climatique

Deux flux de recharge de la nappe, correspondant à 2 contextes climatiques différents, ont été considérés :

- 250 mm/an ;
- 300 mm/an.

Ces flux de recharge sont appliqués sur l'ensemble du domaine modélisé, hormis au niveau de la zone d'utilisation. Au niveau de cette zone, le flux de recharge est calculé à partir de la densité de présence des 3 types d'ouvrages et du flux de recharge considéré sous chaque type d'objet. Un flux de recharge différent a été considéré pour chaque type d'objet et chaque contexte climatique. Les ouvrages de type 3 étant immergés dans la nappe, le flux traversant ces objets correspond au flux d'écoulement de la nappe qui est variable selon le scénario considéré (cf. Tableau 2).

⁷ Ces valeurs ont été définies dans la version 4 du texte envoyé par le Cerema au BRGM par mail du 04/07/16.

| Flux de recharge sur l'ensemble du domaine modélisé [mm/an] | Flux de recharge sous ouvrage [mm/an] | |
|---|---------------------------------------|--------|
| | Type 1 | Type 2 |
| 250 | 100 | 250 |
| 300 | 100 | 300 |

Tableau 2 : Flux de recharge sous les ouvrages considérés

Le flux de recharge (Q en mm/an) au niveau de la zone source est calculé comme suit :

$$Q = t_1 * q_1 + t_2 * q_2 + (1-t_1-t_2) * q \quad (\text{Équation 1})$$

Avec t_1 et t_2 , respectivement le taux de présence des ouvrages de type 1 et 2 [-] ;

q_1 et q_2 , respectivement le flux de recharge sous les ouvrages de type 1 et 2 [mm/an] ;

q , le flux de recharge sur l'ensemble du domaine modélisé [mm/an].

2.2.3. Type de formations dans les zones saturée et non saturée

Huit formations aquifères différentes et huit formations non saturées ont été considérées. Ces formations se distinguent par des paramètres hydrodynamiques différents :

- Perméabilité et porosité efficace pour les formations aquifères ;
- Paramètres de Van Genuchten, teneur en eau à saturation, teneur en eau résiduelle et conductivité hydraulique à saturation pour les formations non saturées.

Les valeurs retenues pour ces paramètres seront détaillées dans le paragraphe 3.2.1.

2.2.4. Epaisseur des zones saturée et non saturée

Les épaisseurs considérées de la zone saturée et de la ZNS varient respectivement entre 5 et 75 et entre 1,5 et 17,5 m.

2.2.5. Gradient hydraulique

Différents gradients hydrauliques, variant de 0,05 % à 1,1 %, ont été considérés.

2.2.6. Distances des POC à la zone d'utilisation

La position des points d'observation des concentrations (notés POC) a été déterminée en conformité avec les hypothèses du Groupe de Travail Européen (GM-TAC) à l'origine des critères d'admission de la Directive Décharge 1999/31/CE, soit 20 m (cas des métaux et métalloïdes) et 200 m (cas des sels solubles) en aval hydraulique de la source.

2.2.7. Synthèse

Au total, seize scénarios ont été modélisés (cf. Tableau 3).

| Scénario | Recharge sur l'ensemble du domaine modélisé [mm/an] | Type d'aquifère | Type de formation en ZNS | Épaisseur de la ZNS [m] | Épaisseur de la zone saturée [m] | Gradient hydraulique [%] | Profondeur d'immersion des ouvrages de type 3 |
|----------|---|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|---|
| 1 | 250 | 1 | 1 | 4 | 50 | 0,26 | 1,27 |
| 2 | | 2 | 2 | 6 | 40 | 0,05 | 0,24 |
| 3 | | 3 | 3 | 11 | 30 | 0,81 | 0 |
| 4 | | 4 | 4 | 17,5 | 75 | 1,1 | 0 |
| 5 | | 5 | 5 | 3,5 | 20 | 0,28 | 1,77 |
| 6 | | 6 | 6 | 3,5 | 5 | 0,05 | 1,77 |
| 7 | | 7 | 7 | 5 | 15 | 0,14 | 0,27 |
| 8 | | 8 | 8 | 1,5 | 7 | 0,25 | 3,77 |
| 9 | 300 | 1 | 1 | 4 | 50 | 0,26 | 1,27 |
| 10 | | 2 | 2 | 6 | 40 | 0,05 | 0,24 |
| 11 | | 3 | 3 | 11 | 30 | 0,81 | 0 |
| 12 | | 4 | 4 | 17,5 | 75 | 1,1 | 0 |
| 13 | | 5 | 5 | 3,5 | 20 | 0,28 | 1,77 |
| 14 | | 6 | 6 | 3,5 | 5 | 0,05 | 1,77 |
| 15 | | 7 | 7 | 5 | 15 | 0,14 | 0,27 |
| 16 | | 8 | 8 | 1,5 | 7 | 0,25 | 3,77 |

Tableau 3 : Scénarios modélisés

Remarque importante :

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude sont propres aux hypothèses considérées dans les différents scénarios. En particulier, ces résultats ne peuvent en aucun cas s'appliquer aux écoulements en milieu fissuré ou karstique.

2.3. CODE DE CALCUL UTILISE

Le logiciel de modélisation utilisé est le logiciel MARTHE™, développé par le BRGM et spécifiquement dédié à la simulation des écoulements souterrains. MARTHE™ est mis en œuvre depuis une trentaine d'années pour des modélisations hydrodynamiques, pouvant être couplées à des processus hydrodispersifs, thermiques et chimiques. Le logiciel utilise une méthode de calcul par différences finies, associée à un maillage rectangulaire de type « écossais ».

3. Modélisations réalisées

3.1. MAILLAGE ET ETENDUE DU MODELE

Le modèle a été construit en 2 dimensions correspondant à une coupe verticale des zones saturée et non saturée. Le modèle a donc été construit dans un plan XY avec l'axe Y parallèle à la pesanteur.

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes (Tableau 4).

| | |
|---|--|
| Longueur du domaine (m) | 4 000 |
| Hauteur du domaine (m) | Variable selon les épaisseurs de la zone saturée et de la ZNS |
| Dimensions des mailles (m) Hors source | 20 selon l'axe X 0,25 selon l'axe Y |
| Dimensions des mailles (m) Source | 20 et entre 1,25 et 10 autour des ouvrages de type 3 selon l'axe X 0,25 selon l'axe Y |
| Longueur de la source (m) | 200 |

Tableau 4 : Tableau de synthèse de l'architecture du modèle

Les dimensions du modèle et le maillage sont présentés en Figure 3 et Figure 4.

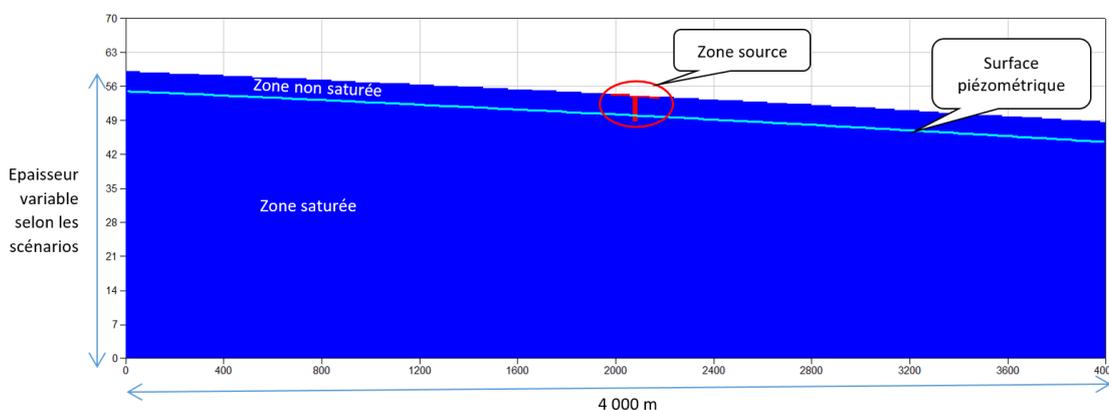


Figure 3 : Dimensions du modèle (vue du modèle dans son intégralité) – Scénario 1
(exagération verticale : x20)

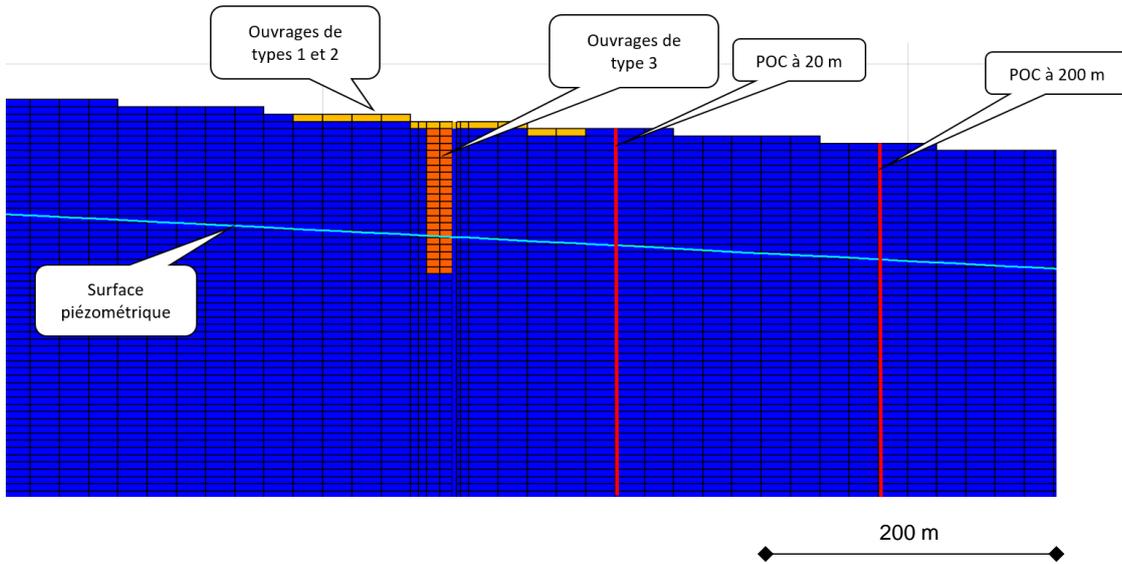


Figure 4 : Maillage du modèle (vue au niveau de la zone source) et localisation des points d'observation (POC) – Scénario 1

L'emplacement de la zone source a été défini de manière spécifique à chaque scénario afin que les contraintes de vitesse d'écoulement (directement liée à la contrainte de gradient hydraulique et de perméabilité) et d'épaisseur de la zone saturée soient bien respectées. Un maillage différent a donc été créé pour chaque scénario.

3.2. PARAMETRES DE MODELISATION

3.2.1. Modélisation de l'écoulement

Le modèle d'écoulement est construit en régime permanent.

Conditions limites :

En amont et en aval du modèle, des conditions de charge hydraulique constante ont été imposées de manière à respecter le gradient hydraulique.

Paramètres d'écoulement :

Les perméabilités horizontales retenues sont présentées ci-après (Tableau 5).

| Type d'aquifère | Perméabilité horizontale (m/s) |
|-----------------|-----------------------------------|
| 1 | $2 \cdot 10^{-3}$ |
| 2 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | $8 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | $4 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $2,8 \cdot 10^{-3}$ |
| 6 | $5 \cdot 10^{-5}$ |
| 7 | $2 \cdot 10^{-3}$ |
| 8 | $3 \cdot 10^{-3}$ |

Tableau 5 : Perméabilités horizontales retenues

Les valeurs de perméabilités verticales correspondent à celles des perméabilités horizontales divisées par 5.

Paramètres de la ZNS :

Les paramètres retenues proviennent de la formulation de van Genuchten [1980]⁸ pour 8 des 12 types de sol de la classification de l'USDA d'après Carsel and Parrish [1988]⁹, cité par Šimůnek et al. [2006]¹⁰. Ces paramètres sont présentés ci-après (Tableau 6).

⁸ Van Genuchten M.T. (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 44, p. 892-898.

⁹ Carsel, R.F., and Parrish, R. S. (1988) - Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, Water Resour. Res., 24, 755-769, 1988.

¹⁰ Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th. (2006) - The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media - User Manual - Version 1.0. http://ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/53102000/pdf_pubs/P2164.pdf (Accès Août 2018)

| Type de ZNS | Conductivité hydraulique à saturation [m/s] | Teneur en eau résiduelle [-] | Teneur en eau à saturation [-] | Paramètre a [cm ⁻¹] | Paramètre n [-] |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Sable | 8,3.10 ⁻⁵ | 0,045 | 0,43 | 0,145 | 2,68 |
| Limon | 6,9.10 ⁻⁷ | 0,034 | 0,46 | 0,016 | 1,37 |
| Argile sableuse | 3,3.10 ⁻⁷ | 0,1 | 0,38 | 0,027 | 1,23 |
| Loam limoneux | 1,3.10 ⁻⁶ | 0,067 | 0,45 | 0,02 | 1,41 |
| Sable limoneux | 4,1.10 ⁻⁵ | 0,057 | 0,41 | 0,124 | 2,28 |
| Loam argileux | 7,2.10 ⁻⁷ | 0,095 | 0,41 | 0,019 | 1,31 |
| Argile limoneuse | 5,6.10 ⁻⁸ | 0,07 | 0,36 | 0,005 | 1,09 |
| Limon | 6,9.10 ⁻⁷ | 0,034 | 0,46 | 0,016 | 1,37 |

Tableau 6 : Paramètres de la ZNS

Il est à noter que, pour des raisons de sécurité numérique, une perméabilité minimale doit être imposée dans la zone non saturée. Cette valeur a été fixée à 10⁻⁸ m/s (soit environ 300 mm/an) car elle correspond à la valeur maximale du flux de recharge imposé en surface. Au-delà, des problèmes de divergence apparaîtraient. Dans la réalité, cela correspondrait à l'apparition de phénomènes de ruissellement qui ne sont pas pris en compte dans le cadre des présentes modélisations.

3.2.2. Modélisation du transport

Le modèle de transport est basé sur le modèle d'écoulement précédent. Il est construit en régime transitoire et les calculs sont conduits jusqu'à ce que la concentration au point d'observation étudié ait atteint sa valeur d'équilibre maximale.

Conditions initiales :

Les concentrations initiales dans la zone saturée sont considérées nulles.

Conditions limites :

Une condition de type « flux massique » est imposée au niveau de la zone source. Le flux massique ($Q_{1,2}$ en mg/mois/m²) émis par les ouvrages de type 1 et 2 est défini comme suit :

$$Q_{1,2} = C * (f_1 * t_1 / 12 + f_2 * t_2 / 12) \quad (\text{Équation 2})$$

Avec C, concentration imposée (valeur arbitraire de 100 mg/L) ;

f_1 et f_2 , le flux de recharge sous les ouvrages de type 1 et 2 [mm/an] ;

t_1 et t_2 , respectivement le taux de présence des ouvrages de type 1 et 2 [-].

Ce flux est imposé de manière homogène sur toute la surface de la zone source.

Le flux massique (Q_3 en mg/mois/m²) émis par les ouvrages de type 3 est défini comme suit :

$$Q_3 = C * 1000 * v \quad (\text{Équation 3})$$

Avec C , concentration imposée (valeur arbitraire de 100 mg/L) ;

v , vitesse d'écoulement de la nappe au niveau des ouvrages de type 3 [m/mois] ;

Etant donné que les ouvrages de type 3 sont considérés imperméables à l'écoulement, il a été techniquement impossible d'imposer une condition de flux au droit des mailles en question. Le flux massique au niveau des ouvrages de type 3 a donc été imposé en aval hydraulique direct de cette zone (cf. Figure 5).

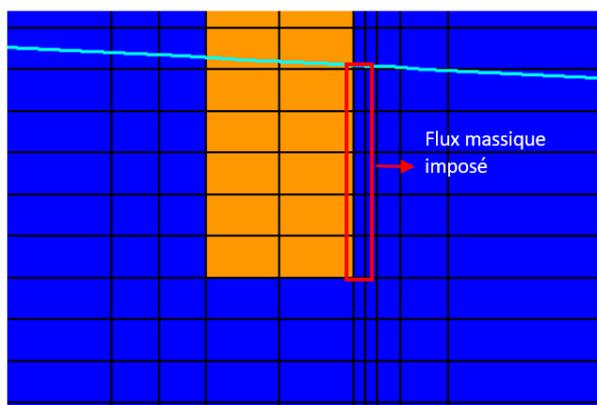


Figure 5 : Flux massique imposé pour les ouvrages de type 3 (en rouge)

Les hypothèses considérées dans la définition du terme source sont les suivantes :

- Les ouvrages intégrant des matériaux alternatifs issus du BTP sont soumis à la lixiviation par les eaux de pluie et les eaux souterraines ;
- Les éluats correspondants s'infiltrent dans les eaux souterraines à une « concentration source » supposée constante et égale à une valeur posée arbitrairement égale à 100 mg/L ;
- Il n'y a pas d'appauvrissement du terme source (source infinie) ;
- Les phénomènes d'adsorption et de dégradation des polluants ne sont pas considérés.

Paramètres de transport :

La porosité efficace est fixée selon le type d'aquifère.

| Type d'aquifère | Porosité efficace (%) |
|-----------------|-----------------------|
| 1 | 9 |
| 2 | 0,01 |
| 3 | 5,5 |
| 4 | 0,5 |
| 5 | 12 |
| 6 | 0,1 |
| 7 | 8,5 |
| 8 | 7,5 |

Tableau 7 : Porosités efficaces retenues

La dispersivité longitudinale (α_x) retenue est égale au dixième de la taille de l'échelle d'observation (20 m ou 200 m). Pour les dispersivités transversale horizontale (α_y) et transversale verticale (α_z), les relations empiriques suivantes ont été utilisées :

$$\alpha_y = 0,35.\alpha_x$$

$$\alpha_z = 0,05.\alpha_x$$

Ces relations, conformément aux recommandations du bureau de normalisation ASTM, sont celles qui ont été utilisées pour la modélisation des impacts liés à l'utilisation de matériaux alternatifs ou hors spécifications en technique routière¹¹.

Résultats :

La valeur de concentration retenue pour le calcul du facteur d'atténuation est :

- La concentration maximale calculée, une fois l'équilibre atteint, au niveau du point d'observation étudié ;
- Et la valeur maximale de la concentration au niveau du point d'observation, sur toute la hauteur de la colonne d'eau (concentration maximale parmi celles calculées aux différentes profondeurs).

¹¹ Bellenfant G., Guyonnet D. (2009) – Modélisation des impacts liés à l'utilisation de matériaux alternatifs ou hors spécifications en technique routière. BRGM/RP-57322-FR, 42 p., 8 fig., 3 tabl., 2 ann.

4. Résultats

Les facteurs d'atténuation calculés sont présentés en Annexe 2 (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Il est à noter qu'initialement (cf. Cahier des charges en Annexe 1), l'épaisseur de la zone saturée des scénarios 7 et 15 était considérée égale à 5 m. Toutefois, cette épaisseur n'a pas pu techniquement être imposée à 5 m. Cela est dû au fait que, vu la relativement faible perméabilité de l'aquifère et la contrainte d'infiltration imposée, le profil de charge hydraulique correspond à un dôme piézométrique. Au centre du dôme, la hauteur minimale de la colonne d'eau est de 28 m. En effet, le choix, avant lancement des calculs, d'un aquifère moins épais, conduit à une stabilisation du niveau piézométrique telle que l'épaisseur minimale de la zone saturée est de 28 m. Les calculs de facteurs d'atténuation ont donc porté sur cette épaisseur (et non 5 m comme initialement prévu).

Exemples de représentation graphique des résultats :

La figure suivante (Figure 6) montre un exemple de panache obtenu au bout de 30 ans d'émission.

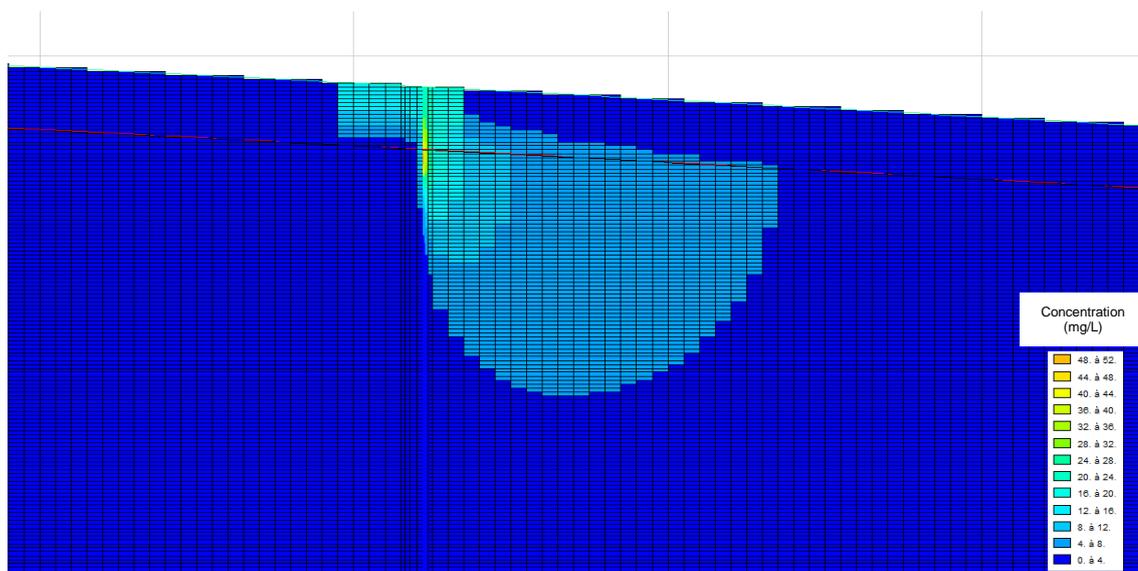


Figure 6 : Exemple de panache au bout de 30 ans – Scénario 1 (exagération verticale : x20)

La figure suivante (Figure 7) montre un exemple de courbe de restitution obtenu au niveau d'un point d'observation des concentrations placé à 20 m de la zone source.

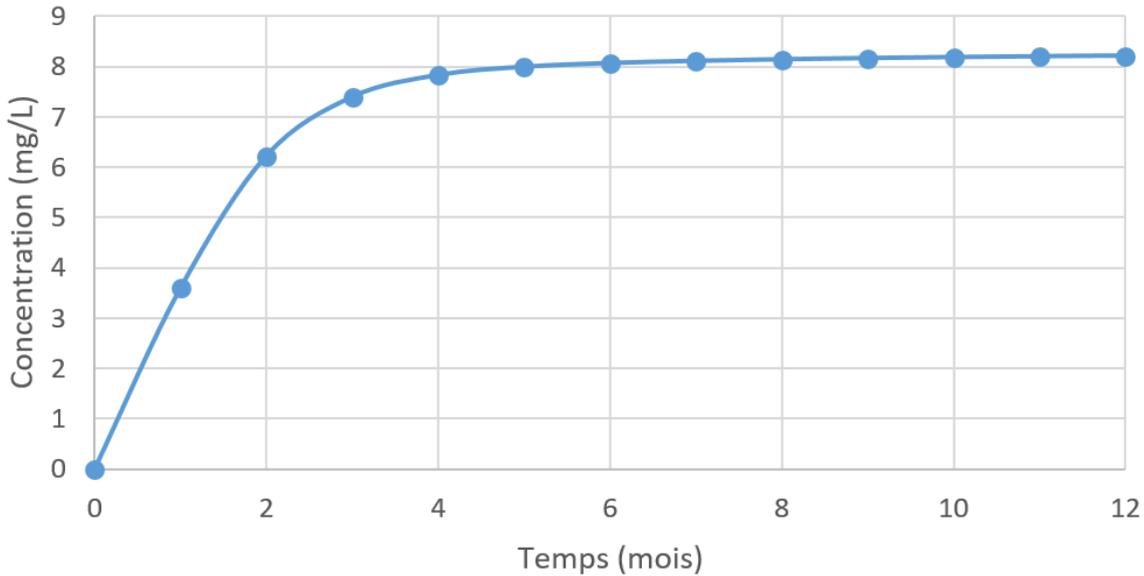


Figure 7 : Exemple de courbe de restitution au point d'observation à 20 m – Scénario 1

4.1. ETUDE DE SENSIBILITE

Différentes variantes ont été considérées pour étudier la sensibilité des paramètres. Ces variantes ont comme base commune le scénario 4.

Les différents paramètres d'entrée du modèle considérés sont les suivants :

- L'épaisseur de la zone non saturée ;
- Le type de zone non saturée ;
- La perméabilité de la zone saturée ;
- La porosité de la zone saturée ;
- Le gradient hydraulique de la zone saturée ;
- L'épaisseur de la zone saturée ;
- La hauteur sous eau des objets de type 3.

Les valeurs utilisées pour étudier la sensibilité d'un paramètre sont la valeur minimale et maximale parmi tous les scénarios considérés. Lorsque la valeur d'un paramètre du scénario de base correspond déjà à un extremum (valeur minimale ou maximale), le cas n'est pas retenu comme variante supplémentaire. Les différentes variantes sont synthétisées dans le tableau suivant.

| Désignation | Épaisseur ZNS [m] | Type ZNS | Perméabilité [m/s] | Porosité [-] | Gradient hydraulique [%] | Épaisseur de la zone saturée [m] | Hauteur sous eau des objets de type 3 [m] |
|-------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|----------------|--------------------------|----------------------------------|---|
| Scénario de base | 17,5 | loam limoneux | 4,0E-04 | 5,0E-03 | 1,1 | 75 | 0 |
| Variante a | 1,5 | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante b | <i>id.</i> | argile limoneuse | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante c | <i>id.</i> | sable | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante d | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 2,5E-05 | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante e | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 3,0E-03 | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante f | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 1,0E-04 | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante g | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 1,2E-01 | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante h | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 0,05 | <i>id.</i> | <i>id.</i> |
| Variante i | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 39 | <i>id.</i> |
| Variante j | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | <i>id.</i> | 3,77 |

id. : valeur identique à celle du scénario de base

Tableau 8 : Variantes considérées dans l'étude de sensibilité

Pour la variante i, l'épaisseur de la zone saturée n'a pas pu être considérée égale à la valeur minimale (7 m) parmi tous les scénarios considérés car pour cette valeur, étant donné le gradient hydraulique, l'extrémité aval du modèle deviendrait extérieur aux mailles aquifères. A défaut, une épaisseur de 39 m a été considérée afin de conserver un extrémité aval du modèle avec une épaisseur de zone saturée d'une dizaine de mètres.

Les facteurs d'atténuation obtenus au point d'observation à 20 m sont les suivants :

| | Facteur d'atténuation |
|-------------------------|--------------------------|
| Scénario de base | 267,0 |
| Variante a | 267,7 |
| Variante b | 268,1 |
| Variante c | 266,9 |
| Variante d | 17,9 |
| Variante e | 1968,6 |
| Variante f | 267,2 |
| Variante g | 264,8 |
| Variante h | 17,8 |
| Variante i | 232,6 |
| Variante j | 4,5 |

Tableau 9 : Facteurs d'atténuation obtenus à 20 m pour les différentes variantes de l'étude de sensibilité

Les résultats de l'étude de sensibilité montrent que :

- Les paramètres qui apparaissent les plus sensibles sont :
 - La vitesse de Darcy de la nappe (correspondant au produit de la perméabilité par le gradient hydraulique) – Variantes d, e, h et scénario de base : plus la vitesse de Darcy est élevée, plus le facteur d'atténuation est élevé. Ceci s'explique par le fait que plus la vitesse de Darcy est élevée, plus la dilution des éluats émis par les ouvrages dans les eaux souterraines est importante ;
 - La hauteur sous eau des ouvrages de type 3 – Scénario de base et scénario j : plus les ouvrages de type 3 sont immergés profondément, plus le relargage de polluants en provenance de ces ouvrages est important et moins le facteur d'atténuation est élevé ;
 - L'épaisseur de la zone saturée - Scénario de base et scénario i : plus l'épaisseur de la zone saturée est élevée est plus le facteur d'atténuation est élevé car plus la dilution des éluats émis par les ouvrages dans les eaux souterraines est importante.
- L'épaisseur et le type de zone non saturée ainsi que la porosité de la zone saturée influent peu sur le calcul du facteur d'atténuation. Ceci s'explique par le fait que ces paramètres influent essentiellement sur la vitesse de transport des polluants. Or dans le cadre des modélisations réalisées, la concentration retenue pour le calcul des facteurs d'atténuation est la concentration maximale obtenue, sans considérer le temps au bout duquel cette concentration maximale est atteinte. Par ailleurs, concernant la zone non saturée, les résultats sont en

quelque sorte nivelés par le fait que les perméabilités minimales dans la ZNS sont imposées à 10^{-8} m/s, pour des raisons de sécurité numérique (cf. 3.2.1).

Par ailleurs, les résultats obtenus à partir des 16 scénarios de base considérés montrent que :

- Les facteurs d'atténuation à 200 m sont logiquement plus élevés qu'à 20 m. En effet, plus la distance à la source d'émission est importante, plus les phénomènes d'atténuation (dilution et dispersion) sont importants ;
- Le taux d'infiltration influe peu (cela reste conforme aux modélisations de 2017¹²). Toutefois, les facteurs d'atténuation sont légèrement plus élevés pour les scénarios avec un flux de recharge de 300 mm/an au droit des ouvrages de type 2 et sur le reste du domaine (scénarios 9 à 16) que pour les scénarios avec un flux de recharge de 250 mm/an au droit des ouvrages de type 2 et sur le reste du domaine (scénarios 1 à 8). Deux phénomènes antagonistes sont liés au flux de recharge : plus le flux de recharge est élevé, plus le flux massique d'émission en provenance des ouvrages est important ; en revanche, plus la dilution en dehors de la source est également élevée. Le premier phénomène apparait prépondérant par rapport au second pour ces scénarios.

4.2. ESTIMATION DE L'EXTENSION HORIZONTALE DU PANACHE

Les précédentes simulations ayant été réalisées à l'aide d'un modèle de type « coupe verticale en 2 dimensions », la largeur du panache a été estimée pour les différents scénarios à l'aide d'un autre modèle. La solution analytique de Fried et Sauty¹³ a été utilisée à l'aide de l'outil TRAC¹⁴ pour les 8 scénarios dont le flux de recharge considéré est de 300 mm/an au droit des ouvrages de type 2 et sur le reste du domaine (scénarios 9 à 16).

Le tableau suivant (Tableau 10) résume la largeur (en m) entre l'axe du panache et la courbe d'iso-concentration 1 mg/L, à 200 m de la source.

¹² G. Boissard (2017) – Modélisation des impacts potentiels sur les eaux souterraines liés à l'utilisation de matériaux issus du BTP hors infrastructures routières. Rapport final. BRGM/RP-67265-FR, 48 p., ill., 10 fig., 10 tabl., 2 ann.

¹³ J.J. Fried -, Groundwater pollution, New York: American Elsevier, 930 p. (1975) et J.P. Sauty, Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par l'interprétation des expériences de traçage. Thèse Doct. -Ing. Grenoble (1977)

¹⁴ <https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/trac-outil-aide-interpretation-tracages-milieus>

| Scénario | Largeur [m] entre l'axe du panache et la courbe d'iso-concentration 1 mg/L, à 200 m de la source |
|----------|--|
| 4 | 1 |
| 3 | 30 |
| 7 | 60 |
| 1 | 70 |
| 2 | 95 |
| 5 | 110 |
| 6 | 110 |
| 8 | 170 |

Tableau 10 : Estimation de l'extension horizontale du panache

L'allure des panaches est présentée en Annexe 3 avec une vue de dessus pour l'ensemble des scénarios.

5. Conclusions

Les modélisations réalisées pour évaluer l'impact potentiel de l'utilisation de matériaux alternatifs issus du BTP dans des ouvrages hors infrastructures de transport sur la qualité des eaux souterraines ont permis de fournir des estimations du facteur d'atténuation¹⁵ (FA) des concentrations source pour les différents scénarios envisagés.

Parmi tous les scénarios modélisés, le facteur d'atténuation le plus faible correspond à celui des scénarios 8 et 16 du cahier des charges¹⁶, pour un point d'observation des concentrations à 20 m de la zone source. Ce facteur, identique pour les 2 scénarios, est de 1,9.

Le facteur d'atténuation le plus élevé correspond à celui du scénario 12 du cahier des charges¹⁷, pour un point d'observation des concentrations à 200 m de la zone source. Le facteur calculé est de 1 244.

Par ailleurs, les résultats ont montré que :

- Les paramètres qui apparaissent les plus sensibles sont :
 - La vitesse de Darcy de la nappe (correspondant au produit de la perméabilité par le gradient hydraulique) ;
 - La hauteur sous eau des ouvrages de type 3 (objets immergés dans la nappe) ;
 - L'épaisseur de la zone saturée.
- Le flux de recharge, l'épaisseur et le type de zone non saturée ainsi que la porosité de la zone saturée influent peu sur le calcul du facteur d'atténuation.

¹⁵ Le facteur d'atténuation est défini comme le rapport entre la concentration source (concentration d'émission des polluants) et le maximum de concentration calculé en un point situé à l'aval hydraulique de la source.

¹⁶ Scénario 8 : Flux de recharge de 250 mm/an ; Zone non saturée de 1,5 m d'épaisseur et composée de limons ; Zone saturée de 7 m d'épaisseur, avec une perméabilité de $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, une porosité de 7,5 % et un gradient de 0,25 % ; Hauteur sous eau des ouvrages de type 3 de 3,77 m.

Scénario 16 : Flux de recharge de 300 mm/an ; Zone non saturée de 1,5 m d'épaisseur et composée de limons ; Zone saturée de 7 m d'épaisseur, avec une perméabilité de $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, une porosité de 7,5 % et un gradient de 0,25 % ; Hauteur sous eau des ouvrages de type 3 de 3,77 m.

¹⁷ Scénario 12 : Flux de recharge de 300 mm/an ; Zone non saturée de 17,5 m d'épaisseur et composée de loam limoneux ; Zone saturée de 75 m d'épaisseur, avec une perméabilité de $4 \cdot 10^{-4}$ m/s, une porosité de 0,5 % et un gradient de 1,1 % ; Absence d'ouvrages de type 3.

Annexe 1

Cahier des charges

**DEFINITION DES SEUILS ENVIRONNEMENTAUX LIES A L'USAGE DES MATERIAUX
ALTERNATIFS, HORS INFRASTRUCTURES ROUTIERES,
PAR LA MODELISATION : PARAMETRAGE ET SCENARIOS**

La définition des seuils environnementaux pour l'intégration de matériaux alternatifs, repose sur le principe de la mesure du niveau admissible de polluants atteignant une cible, émis depuis une source (intégrant les matériaux relatifs), et transitant via un milieu (environnement), majoritairement transporté par l'eau ici. Cette démarche s'appuie sur plusieurs critères caractérisant ces différents éléments et les conditions qui règlent leurs comportements :

- 1- la définition préalable de la (des) source(s) d'émission de substances au milieu, définies par les types d'ouvrages, leur organisation et leur usage à l'échelle urbaine, caractérisant leur exposition aux flux et les modes d'émission des polluants;
- 2- le(s) milieu(x) de référence fixant les conditions d'entrée et de mobilisation des flux dans le système : contextes climatique et environnemental (sol et nappe)
- 3- la (ou les) cible(s) potentielle(s) exposé(es), identifié(es) par des points d'observation mesurant les concentrations admissibles, respectivement à 20 et 200 m du lieu d'émission ;

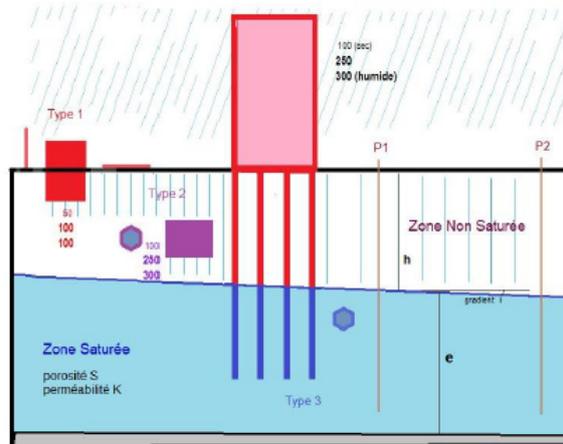
Les conditions de calculs des seuils par modélisation

Ouvrages et objets considérés

Les objets intégrant des matériaux alternatifs sont des éléments monolithiques ou des assemblages d'éléments unitaires, sous forme compacte ou granulaire. Ils se distinguent par l'importance de l'émission relative sous l'objet, quelle que soit son exposition ou leur taille initiale.

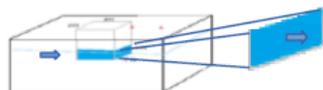
On distingue ainsi, les objets (1) à faible flux d'eau sous objet (dont les caractéristiques d'étanchéité sont recherchées), (2) à fort flux d'eau sous objet (pour lesquels la bonne capacité d'infiltration est plutôt établie), et (3) les objets à flux d'eau permanent (immergés, en présence d'eau).

- type 1-- Matériaux de construction à faible exposition initiale aux précipitations.**
(à faible flux d'eau résultant sous objet),
murs, façades, terrasse, toiture, ...
coulis de béton (sous couverture),
terrassement sous bâti, fondations hors d'eau, ...
mobilier urbain, blocs guidage de chantier, borne, tampon
- type 2-- Matériaux de constructions fortement exposés aux précipitations.**
(à fort flux d'eau résultant sous objet, en lien avec forte perméabilité),
toilette, piste cyclable sportive, terrain de sport, ...
tunnel, réseau souterrain urbain, ...
cave, sous-sol hors d'eau, ...
place-pavée, pavés, ...
fondations, canalisations hors-nappe
- type 3-- Matériaux de constructions immergés dans la nappe.**
(au contact en flux d'eau permanent),
fondations en nappe, ...
sous-sols, parkings immergés, ...
canalisations immergées



a, n

Matériaux en eau représentés par un panneau transversal perpendiculaire à l'écoulement de nappe, de dimensions $l = L$ et hauteur immergée h (eau)



Ces matériaux (source) sont soumis à la seule lixiviation par les eaux de pluie et hors d'eau de nappe (types 1 et 2) ou en eau de façon permanente (type 3). Individuellement, ces objets ont un comportement d'émission, en

fonction de leur exposition aux flux, leurs caractéristiques (taille, morphologie, composition du matériau). Dans la pratique, ces objets se côtoient et se superposent dans leur environnement. Leur impact s'apprécie par leurs émissions cumulées (combinaison d'objets divers et multiples). Ainsi, il est retenu une maille unitaire représentative, intégrant l'ensemble des objets possibles. Cet « objet élémentaire » est composé d'objets caractérisés par leur organisation et leur densité. La maille figure la somme des impacts cumulés à l'échelle d'un bloc, d'un quartier ou d'une ville (territoire homogène), en appréciant la proportion d'objets intégrant des matériaux alternatifs, au milieu d'un environnement d'objets ou espace urbain composant le reste de la maille.

Domaine d'étude : taille env. 1000 m x 4000 m
maille élémentaire (« objet » émetteur) : 200 m x 200 m (quartier urbain typiquement)
points d'observation à 20 (P1) et 200 m (P2) en aval de l'émission

Hydraulique de la maille élémentaire (zone source) : inclinaison du mur de l'aquifère = 0 %
perméabilité verticale = perméabilité horizontale / 5

Dispersion du milieu : dispersivité longitudinale : $O_x = \text{distance parcourue } L / 10$
dispersivité transversale horizontale : $O_y = 0,35 \times \text{dispersivité longitudinale } (O_x)$
dispersivité transversale verticale : $O_z = 0,05 \times \text{dispersivité longitudinale } (O_x)$

Caractéristiques du milieu : perméabilité K porosité S profondeur de nappe h puissance de nappe e

En ZNS : facteurs d'atténuation dans différents sols (grille USDA) pour Loi de Van Genuchten, selon les paramètres : θ_r (teneur en eau résiduelle) / θ_s (teneur en eau à saturation) / a ($1/h_i$) et n ($1/b_i$)

Synthèse des scénarios 2018

Le nombre maximal de simulations possible par combinaison des différents critères est de 2x8. *Un test de variantes sur l'état dégradé des matériaux pourra s'appliquer en supplément sur certains scénarios-types.*

| | |
|--|---|
| Milieu : très urbanisé, non dégradé Densité de la maille élémentaire : R1a=0,226 / R2a=0,059 traversé perpendiculairement par la nappe sur une surface Si en eau avec h(eau)=3,77 m et S1(panneau)=66 m ² pour h(ZNS)=1,5 m avec h(eau)=1,77 m et S2(panneau)=31 m ² pour h(ZNS)=3,5 m avec h(eau)=1,27 m et S3(panneau)=22 m ² pour h(ZNS)=4 m avec h(eau)=0,27 m et S4(panneau)= 5 m ² pour h(ZNS)=5 m avec h(eau)=0,24 m et S5(panneau)= 4 m ² pour h(ZNS)=6 m | Conditions météorologiques Flux de recharge (entrants sur domaine) P = 100 mm/an sur objets R1 P = 250 mm/an (France) sur objets R2 et sur reste du domaine P = 300 mm/an (GMTAC) sur objets R2 et sur le reste du domaine Flux continu sur objets immergés R3 (dans contexte avec toit de nappe < 10 m) |
|--|---|

| Type de milieu aquifère, situation | ZNS h(m) | Paramètres ZNS θ_r / θ_r a / n | Perméabilité K (m.s ⁻¹) | Porosité S | gradient I (%) | Épaisseur ZS e (m) | Flux sous objet dans maille élémentaire |
|--|-------------|--|--|--------------------|-------------------|-----------------------|---|
| (1) Aquifère monocouche poreux, à nappe libre | 4 | Sable 0,045 / 0,43 0,145 / 2,68 | 2.10 ⁻³ | 9.10 ⁻² | 0,26 | 50 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S3=22) |
| (2) Aquifère monocouche fissuré, à nappe libre | 6 | Limon 0,034 / 0,46 0,016 / 1,37 | 2,5. 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ | 0,05 | 40 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S5=4) |
| (3) Aquifère monocouche à double porosité, à nappe libre | 11 | argile sableuse 0,1 / 0,38 0,027 / 1,23 | 8.10 ⁻⁵ | 0,055 | 0,81 | 30 | R1 x 100 + R2 x 250 |
| (4) Aquifère monocouche avec discontinuités, à nappe libre | 17,5 | loam limoneux 0,067 / 0,45 0,02 / 1,41 | 4.10 ⁻⁴ | 5.10 ⁻³ | 1,1 | 75 | R1 x 100 + R2 x 250 |
| (5) Aquifère multicouche poreux (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 3,5 | sable limoneux 0,057 / 0,41 0,124 / 2,28 | 2,8.10 ⁻³ | 0,12 | 0,28 | 20 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S2=31) |
| (6) Aquifère multicouche fissuré (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 3,5 | loam argileux 0,095 / 0,41 0,019 / 1,31 | 5.10 ⁻⁵ | 10 ⁻³ | 0,05 | 5 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S2=31) |
| (7) Aquifère multicouche à double porosité (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 5 | argile limoneuse 0,07 / 0,36 0,005 / 1,09 | 2.10 ⁻³ | 0,085 | 0,14 | 15 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S4=5) |
| (8) Aquifère multicouche discontinu (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 1,5 | Limon 0,034 / 0,46 0,016 / 1,37 | 3.10 ⁻³ | 0,075 | 0,25 | 7 | R1 x 100 + R2 x 250 + R3 continu (S1=66) |
| (1) Aquifère monocouche poreux, à nappe libre | 4 | Sable 0,045 / 0,43 0,145 / 2,68 | 2.10 ⁻³ | 9.10 ⁻² | 0,26 | 50 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S3=22) |
| (2) Aquifère monocouche fissuré, à nappe libre | 6 | Limon 0,034 / 0,46 0,016 / 1,37 | 2,5. 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ | 0,05 | 40 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S5=4) |
| (3) Aquifère monocouche à double | 11 | argile sableuse 0,1 / 0,38 | 8.10 ⁻⁵ | 0,055 | 0,81 | 30 | R1 x 100 + R2 x 300 |

| | | | | | | | |
|--|------|---|---------------------|-------------------|------|----|---|
| porosité, à nappe libre | | 0,027 / 1,23 | | | | | |
| (4) Aquifère monocouche avec discontinuités, à nappe libre | 17,5 | loam limoneux 0,057 / 0,45 0,02 / 1,41 | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | 1,1 | 75 | R1 x 100 + R2 x 300 |
| (5) Aquifère multicouche poreux (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 3,5 | sable limoneux 0,057 / 0,41 0,124 / 2,28 | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | 0,12 | 0,28 | 20 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S2=31) |
| (6) Aquifère multicouche fissuré (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 3,5 | loam argileux 0,095 / 0,41 0,019 / 1,31 | $5 \cdot 10^{-5}$ | 10^{-3} | 0,05 | 5 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S2=31) |
| (7) Aquifère multicouche à double porosité (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 5 | argile limoneuse 0,07 / 0,36 0,005 / 1,09 | $2 \cdot 10^{-3}$ | 0,085 | 0,14 | 15 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S4=5) |
| (8) Aquifère multicouche discontinu (1 ^{ère} nappe), à nappe libre | 1,5 | Limon 0,034 / 0,46 0,016 / 1,37 | $3 \cdot 10^{-3}$ | 0,075 | 0,25 | 7 | R1 x 100 + R2 x 300 + R3 continu (S1=66) |

Annexe 2

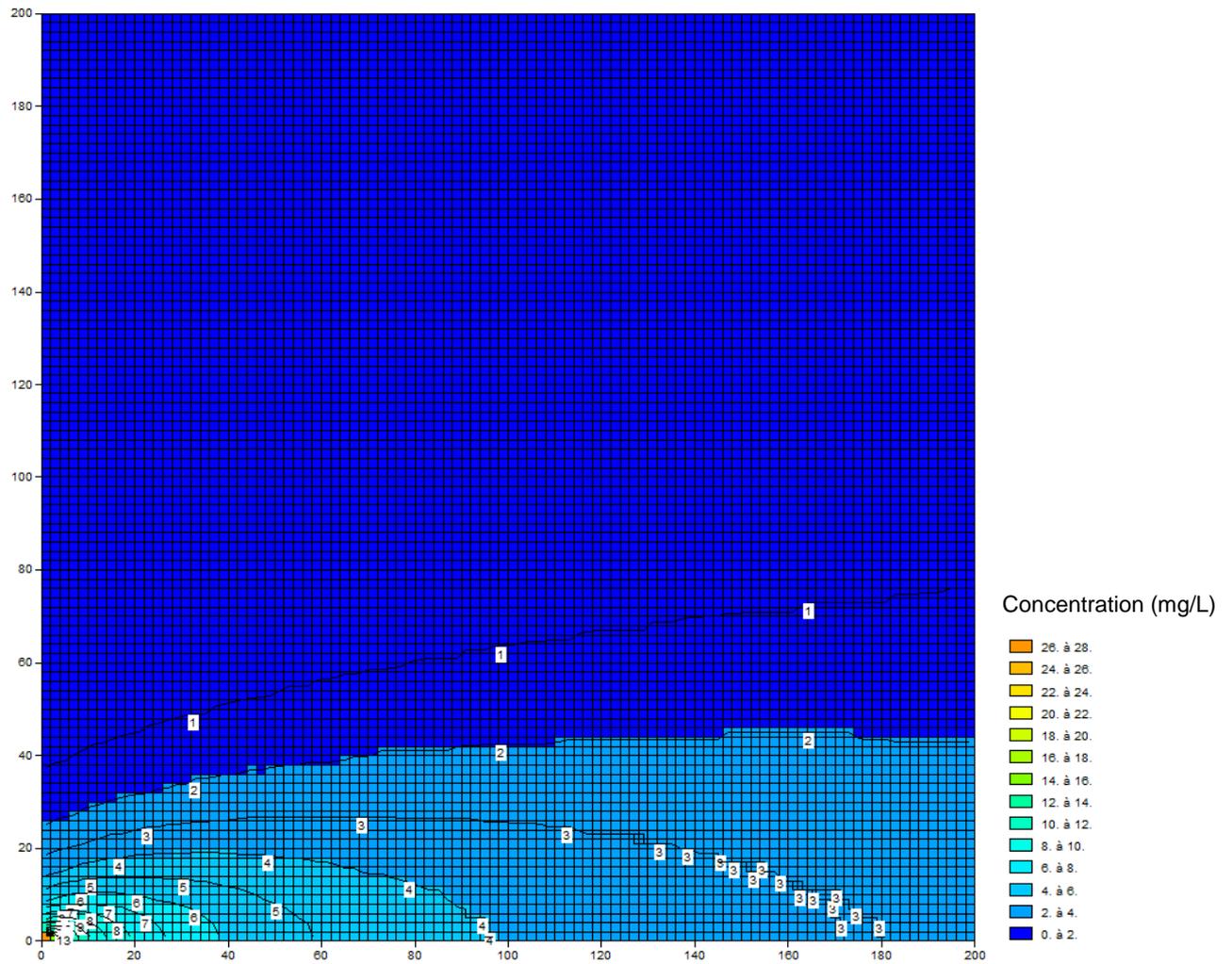
Facteurs d'atténuation calculés

| Flux de recharge | Scénario | Facteur d'atténuation au point d'observation | |
|------------------|----------|--|--------|
| | | 20 m | 200 m |
| 250 mm/an | 1 | 12,1 | 38,3 |
| | 2 | 7,7 | 15,9 |
| | 3 | 43,8 | 84,7 |
| | 4 | 267,0 | 1240,3 |
| | 5 | 8,9 | 11,3 |
| | 6 | 5,3 | 10,5 |
| | 7 | 43,3 | 49,6 |
| | 8 | 1,9 | 2,0 |
| 300 mm/an | 9 | 12,2 | 38,4 |
| | 10 | 8,9 | 18,7 |
| | 11 | 45,7 | 91,7 |
| | 12 | 268,1 | 1244,2 |
| | 13 | 8,9 | 11,3 |
| | 14 | 6,1 | 12,4 |
| | 15 | 43,4 | 51,0 |
| | 16 | 1,9 | 2,0 |

Annexe 3

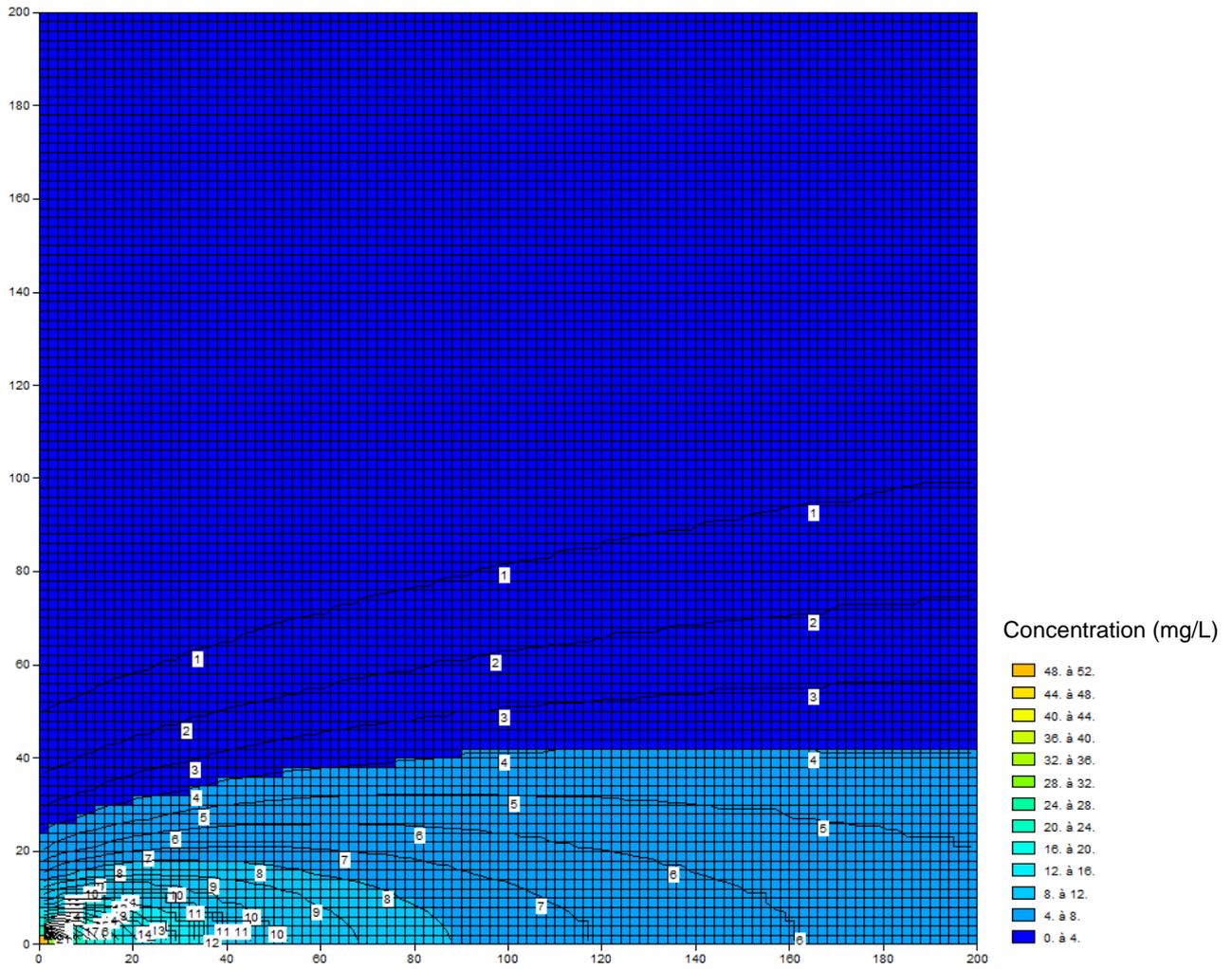
Extension horizontale des panaches

Scénario 9 :



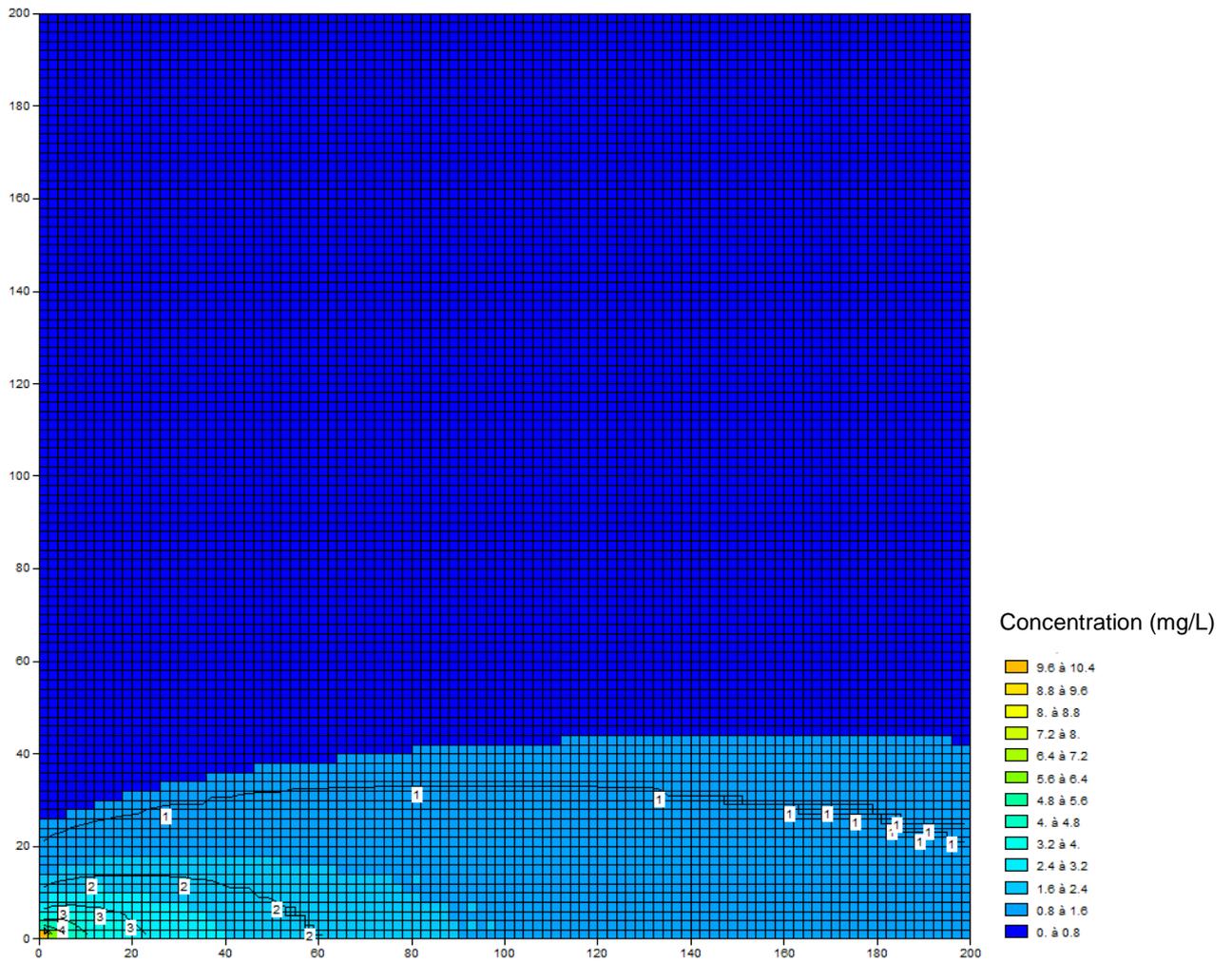
(Echelle en m)

Scénario 10 :



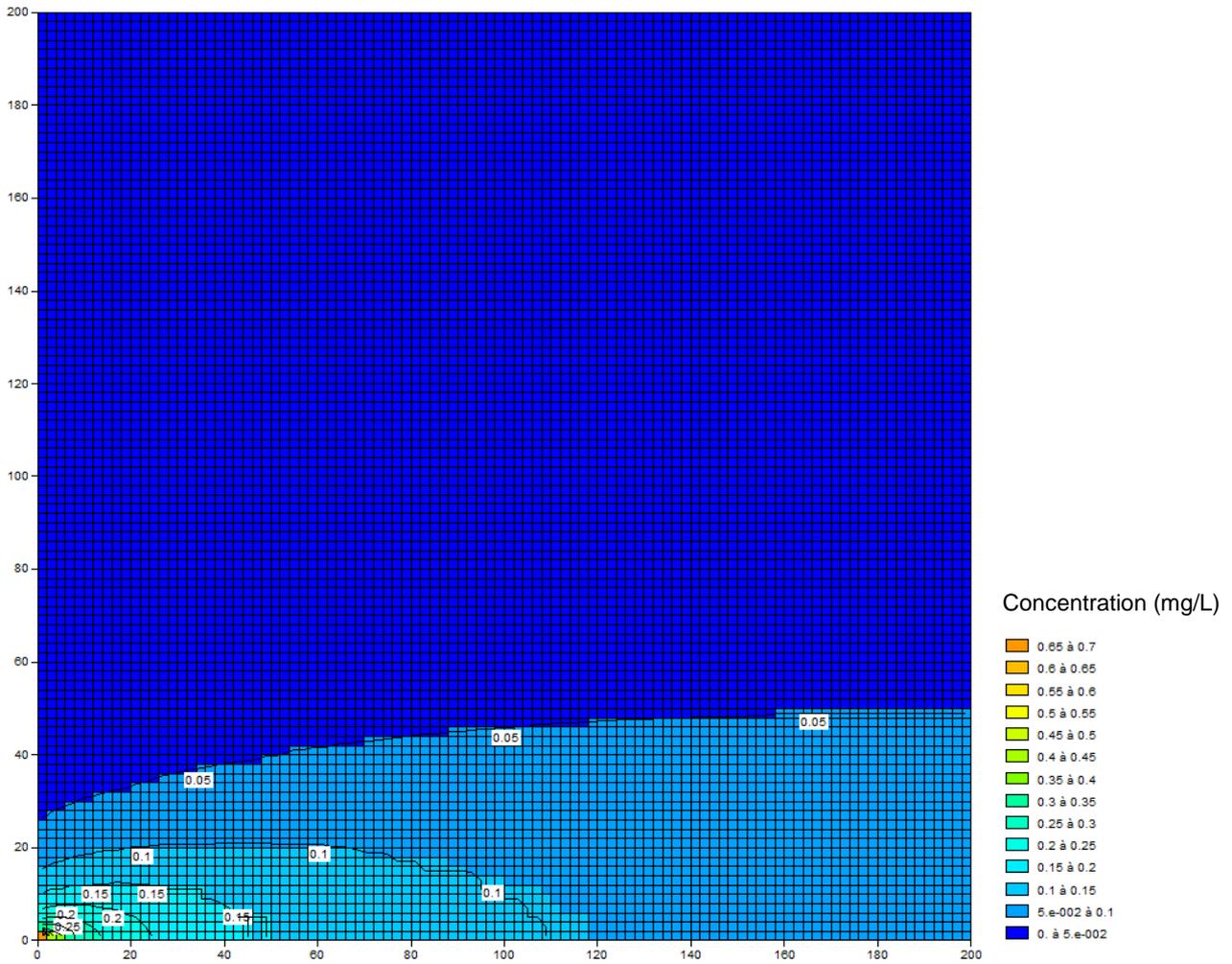
(Echelle en m)

Scénario 11 :



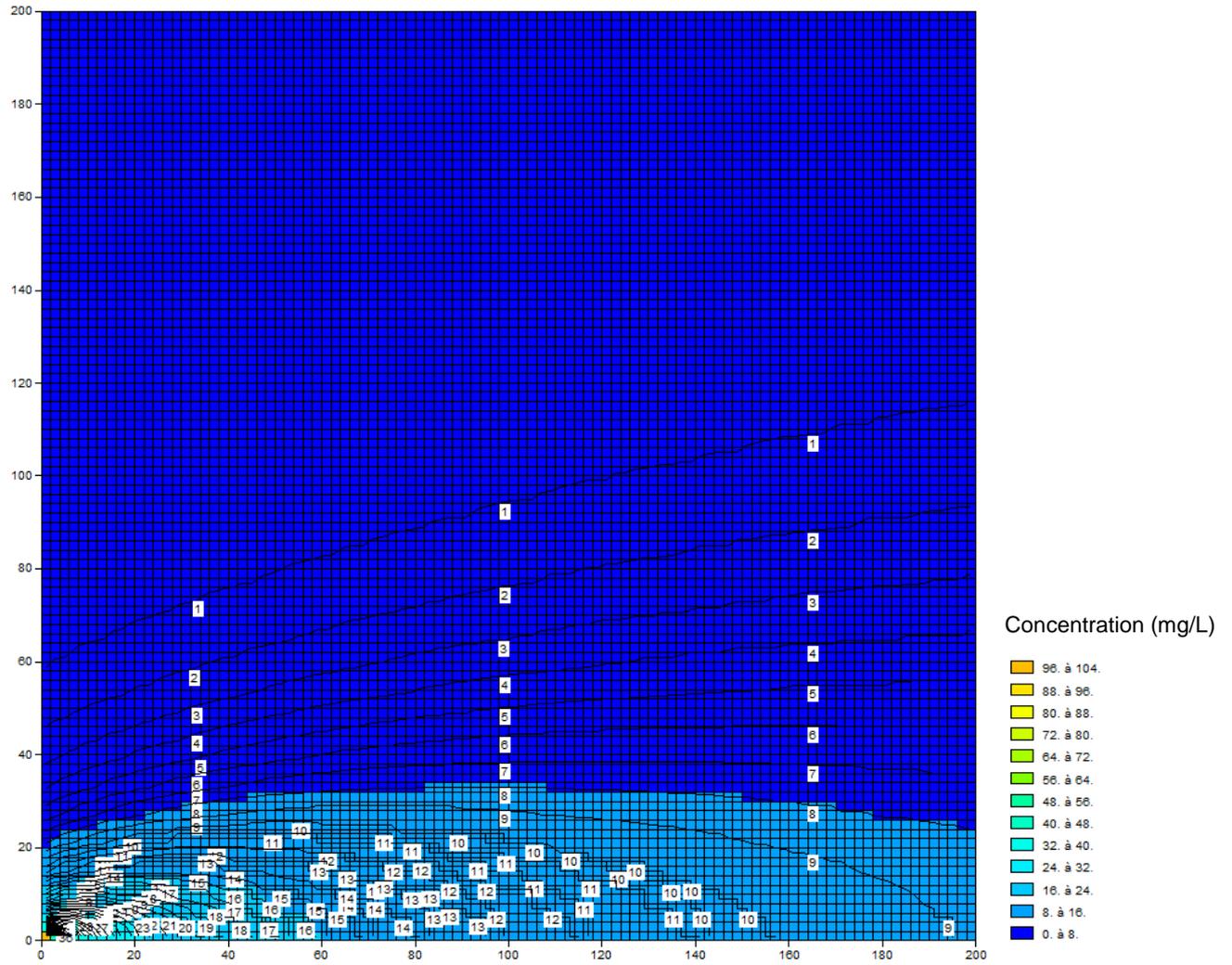
(Echelle en m)

Scénario 12 :



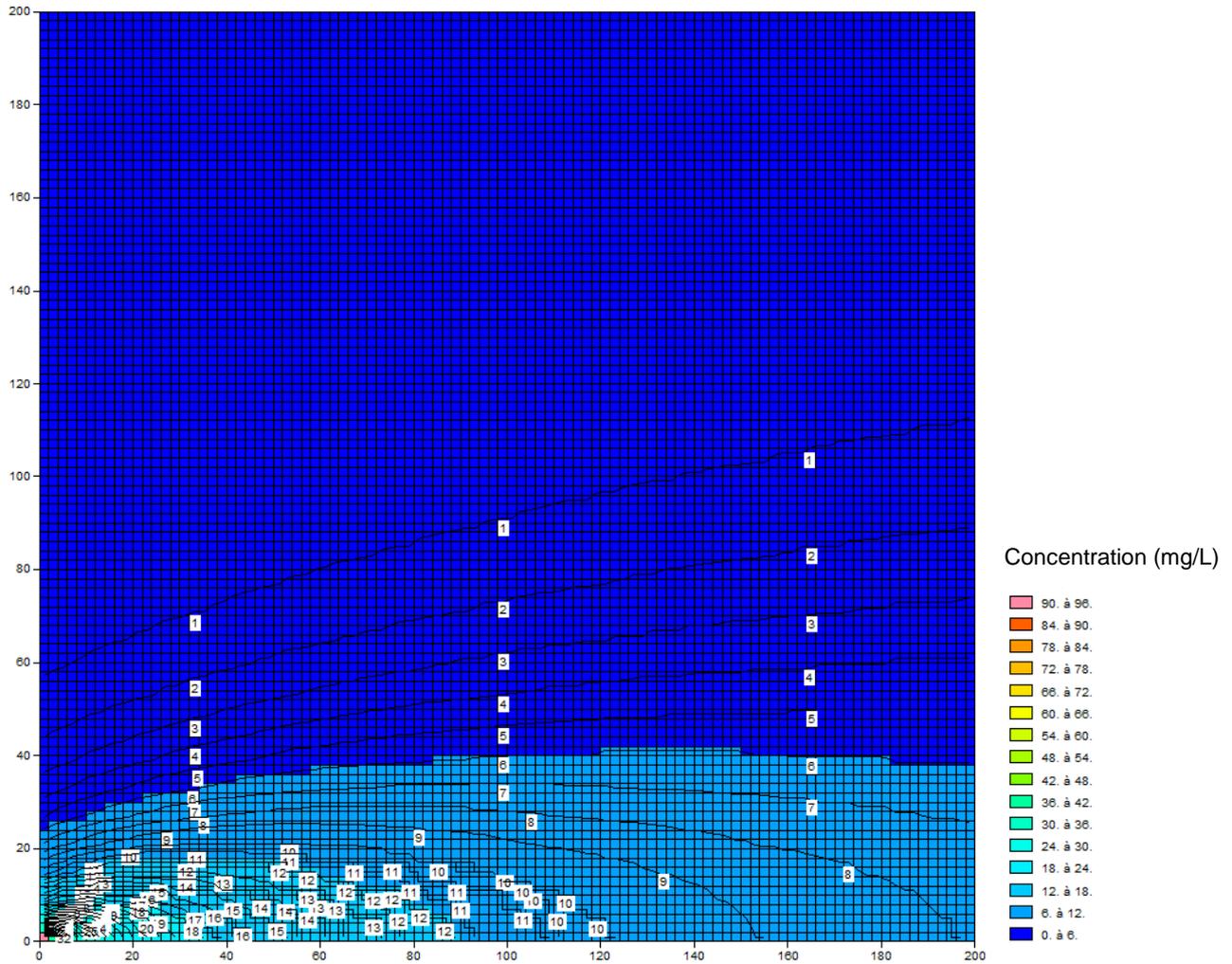
(Echelle en m)

Scénario 13 :



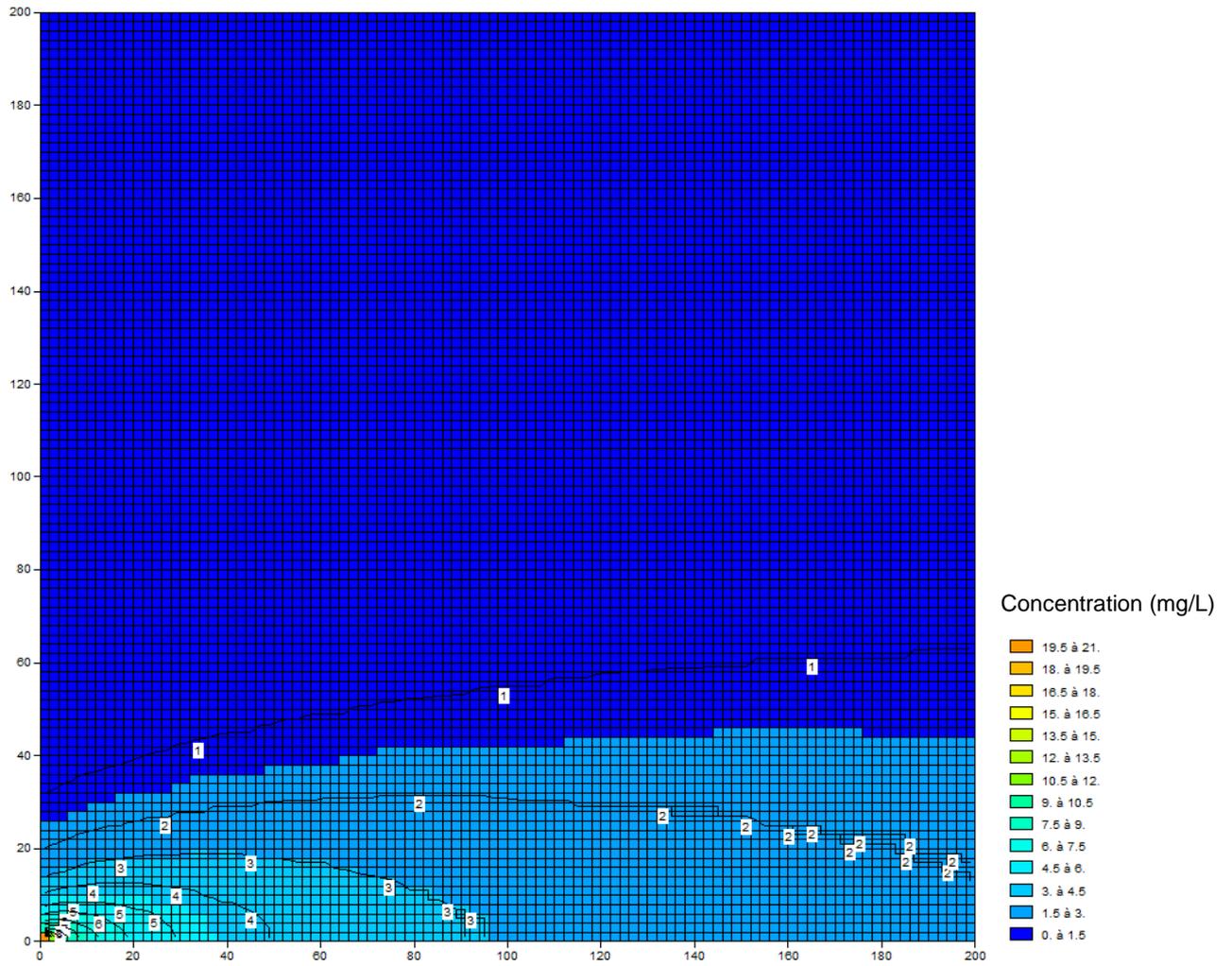
(Echelle en m)

Scénario 14 :



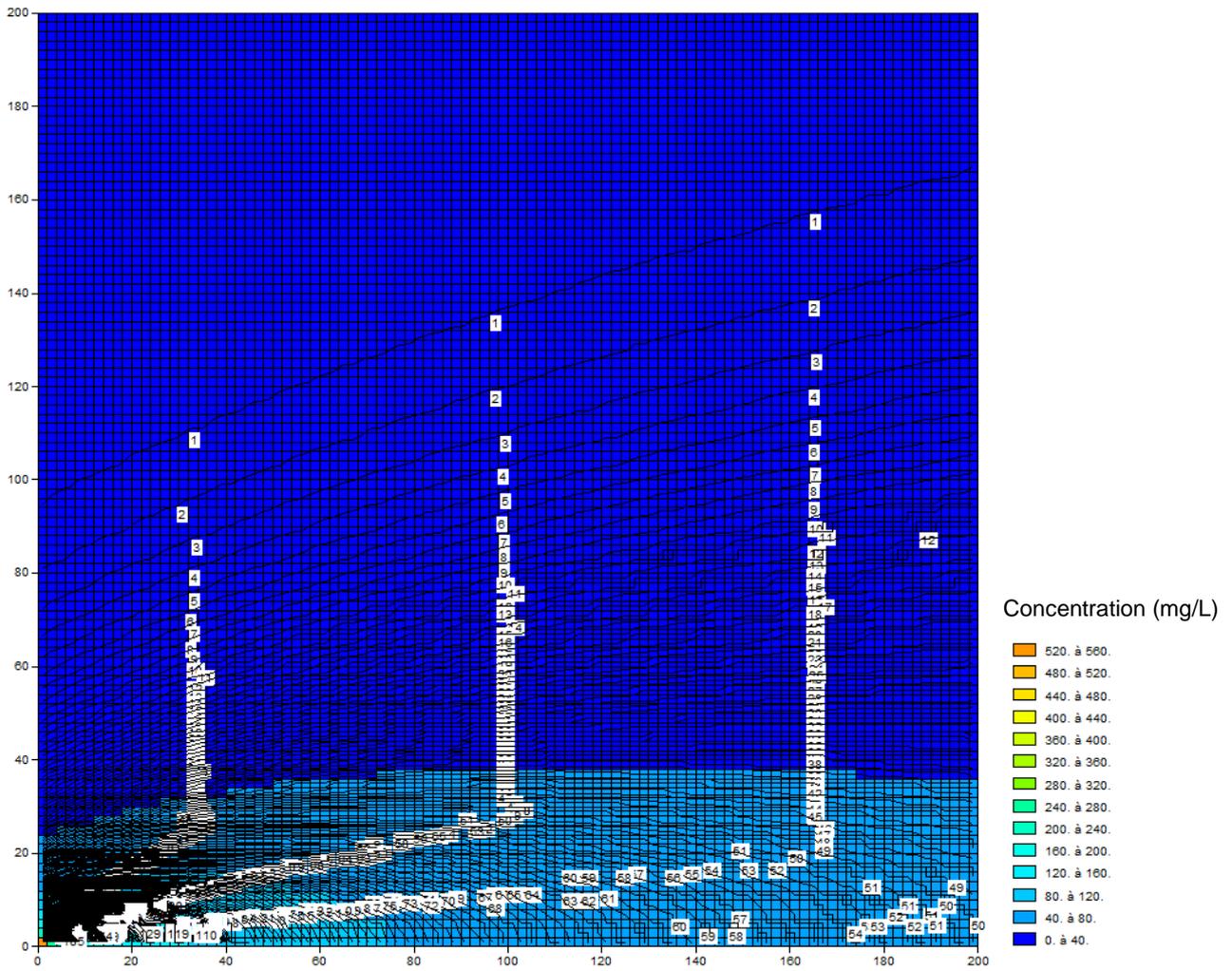
(Echelle en m)

Scénario 15 :



(Echelle en m)

Scénario 16 :



(Echelle en m)



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr