



# MOTU 1

## Rapport

### Site « Diablos Bleus » à Nice (06)

### Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires



#### Annexe du Plan de Gestion

Projet suivi par Guillaume FALEWEE – 06 70 49 77 43 – [guillaume.falewee@anteagroup.fr](mailto:guillaume.falewee@anteagroup.fr)

[www.anteagroup.fr/fr](http://www.anteagroup.fr/fr)

# Fiche signalétique

## Site « Diabes Bleus » à Nice (06) Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires

CLIENT	SITE
MOTU 1	MOTU 1
32 rue de Monceau 75008 PARIS	Ensemble immobilier 10,16 et 18 route de Turin 8bis avenue des Diabes Bleus Nice
Mme CLERAUX Aurélie Directrice – Project Management Tél. 01 56 90 24 99 Mail. aurelie.cleraux@arkea-re.com	

RAPPORT D'ANTEA GROUP	
Responsable du projet	FALEWEE Guillaume
Interlocuteur commercial	PUJOL Cyril
Implantation chargée du suivi du projet	Implantation d'Aubagne 04.42.08.70.70
Responsable du projet	Secretariat.marseille@anteagroup.fr

Rapport n°	118266
Version n°	C
Votre commande et date	date : 04/03/2022
Projet n°	IDFP210875
Codes prestation selon NF X31-620	A320

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Florence HERVE	Ingénieur d'étude	Novembre 2022	
Vérification	Guillaume FALEWEE	Chef de projet	Décembre 2022	
Approbation	Martin JUNQUET	Superviseur Etudes de Risque Sanitaire		

## Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
<b>A</b>	06/12/22	50	7	Etablissement du rapport

# Sommaire

Résumé non technique .....	7
1. Abréviations	9
2. Contexte et objectif de l'étude.....	10
3. Méthodologie générale .....	11
3.1. Textes de références .....	11
3.2. Description de la mission .....	11
4. Présentation de la zone d'étude .....	13
4.1. Localisation.....	13
4.2. Rapports environnementaux à disposition .....	15
4.3. Projet d'aménagement envisagé .....	15
5. Caractérisation de l'exposition .....	19
5.1. Caractérisation des sources de pollution identifiées sur le site.....	19
5.2. Identification des voies d'exposition.....	22
5.2.1. Contact direct avec les sols en place.....	22
5.2.2. Contact direct et/ou indirect avec les eaux souterraines .....	22
5.2.3. Contact direct et/ou indirect avec les eaux superficielles .....	22
5.2.4. Inhalation de substances volatiles présentes dans les sols et/ou les eaux souterraines.....	22
5.2.5. Ingestion de végétaux autoproduits .....	22
5.2.6. Ingestion d'eau potable issue des réseaux souterrains .....	22
5.2.7. Résumé.....	23
5.3. Cibles retenues.....	23
5.4. Sélection des substances et concentrations associées .....	24
5.5. Schéma conceptuel .....	29
5.6. Quantification de l'exposition .....	29
5.6.1. Choix du modèle d'exposition.....	29
5.6.2. Calcul de la dose journalière ou concentration d'exposition.....	32
5.6.3. Paramètres d'exposition .....	33
6. Evaluation de la relation dose réponse .....	34
6.1. Synthèse des données toxicologiques.....	34
6.2. Valeurs toxicologiques de référence retenues.....	34
6.3. Valeurs de gestion de l'air intérieur .....	37
7. Quantification des risques sanitaires .....	38

8.	Interprétation des résultats.....	40
8.1.	Hiérarchisation des risques .....	40
8.2.	Comparaison aux valeurs de gestion.....	40
8.3.	Evaluation des incertitudes .....	41
8.3.1.	Analyse qualitative .....	41
8.3.2.	Analyse quantitative .....	44
9.	Conclusions et recommandations .....	46
9.1.	Conclusion .....	46
9.2.	Synthèse des dispositions d'aménagement .....	47

## Table des figures

Figure 1 :	Localisation de la zone d'étude .....	13
Figure 2 :	Plan parcellaire .....	14
Figure 3 :	Plan du projet d'aménagement (FEVRIERCARRE architecte – 24/11/2022) .....	16
Figure 4 :	Plan du projet d'aménagement du R-2 (DBLE, 24/11/22).....	17
Figure 5 :	Schéma conceptuel .....	29
Figure 6 :	Modélisation du transfert des substances volatiles.....	32

## Table des tableaux

Tableau 1 :	Dispositions d'aménagement .....	8
Tableau 2 :	Codification des prestations selon la norme NFX31-620-2 .....	11
Tableau 3 :	Références cadastrales de la zone d'étude .....	14
Tableau 4 :	Sondages, piézomètres et piézairs par zone d'étude .....	21
Tableau 5 :	Résumé des voies d'exposition.....	23
Tableau 6 :	Milieux d'échantillonnage retenus selon les substances _Espaces extérieurs .....	25
Tableau 7 :	Milieux d'échantillonnage retenus selon les substances _Espaces intérieurs .....	25
Tableau 8 :	Substances et concentrations retenues dans les gaz du sol.....	27
Tableau 9 :	Substance et teneur retenues dans les sols .....	27
Tableau 10 :	Substance et concentration retenues dans les eaux souterraines.....	27
Tableau 11 :	Substances et concentrations retenues dans les gaz de nappe .....	28
Tableau 12 :	Substances et concentrations retenues dans les eaux souterraines.....	28
Tableau 13 :	Paramètres d'exposition retenus dans l'étude .....	33
Tableau 14 :	Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation .....	35
Tableau 15 :	Risques sanitaires pour les futurs employés du site.....	39
Tableau 16 :	Risques sanitaires pour les futurs résidents du site .....	39
Tableau 17 :	Comparaison des concentrations modélisées avec les valeurs de gestion .....	40
Tableau 18 :	Résultats de l'analyse des incertitudes sur l'exposition cumulée .....	44
Tableau 19 :	Résultats de l'analyse des incertitudes sur la ventilation-Futurs résidents .....	44
Tableau 20 :	Résultats de l'analyse des incertitudes sur la fissuration de la dalle .....	45
Tableau 21 :	Dispositions d'aménagement .....	47

## Table des annexes

Annexe I :	Méthodologie Générale
Annexe II :	Textes réglementaires et bibliographiques
Annexe III :	Intrusion de substances organiques dans les réseaux souterrains d'eau potable
Annexe IV :	Synthèse des données physico-chimiques
Annexe V :	Présentation et paramétrage du logiciel Modul'ERS
Annexe VI :	Synthèse des données toxicologiques
Annexe VII :	Calculs de Risques Sanitaires

## Résumé non technique

Dans le cadre du réaménagement d'un site actuellement occupé par des bâtiments de bureaux et d'activité par ENEDIS et GRDF au 10, 16 et 18 route de Turin et 8bis avenue des Diabes Bleus à Nice (06), la société MOTU 1 a mandaté Antea Group pour la réalisation d'une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS), dans l'objectif d'étudier la compatibilité de l'aménagement envisagé (projet immobilier résidentiel, EPHAD, auditorium, bureaux) avec la contamination observée au droit du site.

Cette étude fait suite aux différentes campagnes d'investigations réalisées depuis 2005.

Les investigations ont mis en évidence des sources potentielles de pollution telles que :

- les métaux, hydrocarbures (CAV, HAP et HCT), solvants chlorés (COHV) et Polychlorobiphényles (PCB) dans les sols ;
- les hydrocarbures (CAV, HAP et HCT) et les cyanures dans les eaux souterraines ;
- les hydrocarbures (HCT, naphtalène et CAV) et les solvants chlorés (COHV) dans les gaz du sol ;
- les hydrocarbures (HCT et CAV) et les solvants chlorés (COHV) dans les gaz de nappe.

La voie d'exposition étudiée est l'inhalation de substances volatiles présentes dans les sols, les eaux souterraines, les gaz de nappe et les gaz du sol, au droit des espaces intérieurs et extérieurs.

Au regard de l'aménagement envisagé, les cibles étudiées sont :

- les résidents (logements et EPHAD) ;
- les employés.

**Cette Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires indique que les niveaux de risque sont inférieurs aux seuils de risque recommandés dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (rédigée par le Ministère chargé de l'Environnement, avril 2017) ainsi qu'aux valeurs de gestion considérées.**

L'état environnemental du site est donc compatible avec son usage envisagé.

Cette conclusion est établie en tenant compte des dispositions d'aménagement suivantes :

Tableau 1 : Dispositions d'aménagement

ZONES CONCERNEES	DISPOSITIONS D'AMENAGEMENT
Bâtiment	<p>Respect des plans d'aménagement datés du 24/11/2022 identiques à aux derniers plans du 02/12/2022 notamment concernant les emprises et affectations des sous-sols et du RDC.</p> <p>Les terres excavées issues des travaux de terrassement ne sont pas réutilisées. Elles seront évacuées hors site en filières agréées.</p> <p>Absence de voie préférentielle d'intrusion des gaz du sol et/ou de la nappe vers les sous-sols, en particulier via des événements ou dispositifs équivalents. Le cas échéant, la présence de tels dispositifs devra faire l'objet d'un calcul de risque spécifique.</p>
Espaces extérieurs	<p>Absence de contact direct avec les terres en place : les superficies non bâties sont recouvertes de remblais sains en surface<sup>1</sup> ou minéralisées (asphalte ou autre type de revêtement). Dans le cas contraire, le contact direct avec les terres à nu devra faire l'objet d'investigations complémentaires adaptées à cette voie et d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007.</p> <p>Absence de jardins potagers et d'arbres fruitiers. Dans le cas contraire, l'ingestion de fruits et légumes autoproduits au droit du site devra faire l'objet d'investigations complémentaires adaptées à cette voie et d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007. A défaut, toute culture végétale à visée alimentaire devra être réalisée dans des terres d'apport saines<sup>2</sup>.</p> <p>Absence de puits permettant l'utilisation des eaux souterraines de la nappe superficielle. Dans le cas contraire, les usages de l'eau issue de la nappe superficielle devront faire l'objet d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007.</p> <p>Passage de canalisations souterraines d'eau potable, notamment celles en polyéthylène, hors des zones d'impact résiduel. Dans le cas contraire, les canalisations souterraines situées au droit des zones d'impact résiduel devront circuler dans des remblais d'apport sains ou devront être de nature imperméable aux substances organiques (acier, fonte, matériau multicouches adapté).</p>

Il faut noter que tout changement concernant : les caractéristiques environnementales du site (découverte d'une nouvelle source), le projet d'aménagement ou les scénarios d'exposition pris en considération, est susceptible de modifier les résultats de l'étude.

<sup>1</sup> Pour les espaces paysagers : a minima 30 cm (après compactage) de terre saine afin de garantir la pérennité du recouvrement.

<sup>2</sup> Pour les potagers : a minima 50 cm (après compactage) et jusqu'à 1 m (selon une approche sécuritaire) de terre végétale saine avec un grillage avertisseur et un système de séparation physique placés entre les terres d'apport et les terres en place. Pour les arbres fruitiers, une fosse de terres propres, dont le volume sera adapté en fonction du système racinaire de chaque espèce, devra être réalisée. Un géotextile limitant le développement racinaire des arbres peut être envisagé.

# 1. Abréviations

AEI : Alimentation en Eau Industrielle	JE : Johnson & Ettinger
AEP : Alimentation en Eau Potable	LOAEL : Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level
ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail	LQ : Limite de quantification
AP Arrêté Préfectoral	M.E.D.A.D : Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables
ARR Analyse des Risques Résiduels	MRL Minimal Risk Level
ARS Agence Régionale de Santé	MS : Matière Sèche
As : Arsenic	NAF : Facteur d'Atténuation Naturelle
ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry	NOAEL : No-Observed-Adverse-Effect-Level
B(a)P : Benzo(a)pyrène	Ni : Nickel
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment
BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes	OMS : Organisation Mondiale de la Santé
CAV : Composés Aromatiques Volatils	P : Poids corporel
Cd : Cadmium	Pb : Plomb
cDCE : cis-1,2-dichloroéthylène	PCB : Polychlorobiphényles
Ci Concentration au point d'exposition	PCE : Tétrachloroéthylène
CE : Concentration d'Exposition	QD : Quotient de Danger
CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer	Qij Quantité de milieu i administrée par la voie j
CMA : Concentration Maximale Admissible	RAIS : Risk Assessment Information System
CN : Cyanures	RBCA : Risk-Based Corrective Action
COHV : Composés Organiques Halogénés volatils	RDC : Rez-de-chaussée
COT : Carbone Organique Total	RDJ : Rez-de-jardin
Cr : Chrome	RfC : Reference Concentration
CV : Chlorure de Vinyle	RfD Reference Dose
Cu : Cuivre	RIVM : Institut National de Santé Publique et de l'Environnement, Hollande
DJA : Dose Journalière Admissible	TCE : Trichloroéthylène
DJE : Dose Journalière d'Exposition	Tm temps moyen de prise en compte de l'apparition possible d'un effet néfaste pour la santé
EC : Equivalent Carbone	TPH : Total Petroleum Hydrocarbons
EFSA : Autorité Européenne de Sécurité des Aliments	TPHCWG : Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group
EQRS : Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires	UE : Union Européenne
ERI : Excès de Risque Individuel	US-EPA : United States - Environmental Protection Agency
ERP : Etablissement Recevant du Public	VGAI : Valeurs Guides de qualité de l'Air Intérieur
ERU : Excès de Risque Unitaire	VTR : Valeurs Toxicologiques de Référence
ETM : Eléments Traces Métalliques	Zn: Zinc
ETBE : Ethyl TertioButyl Ether	
FE : Fréquence d'Exposition annuelle	
FET : Facteur d'équivalence toxique	
Foc : Fraction de carbone organique	
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	
HAS Haute Autorité de Santé	
HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique	
HCT : Hydrocarbures Totaux	
Hg : Mercure	
IEM : Interprétation de l'Etat des Milieux	
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques	

## 2. Contexte et objectif de l'étude

Dans le cadre du réaménagement d'un site actuellement occupé par des bâtiments de bureaux et d'activité par ENEDIS et GRDF au 10, 16 et 18 route de Turin et 8bis avenue des Diabes Bleus à Nice (06), la société MOTU 1 a mandaté Antea Group pour la réalisation d'une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS), dans l'objectif d'étudier la compatibilité de l'aménagement envisagé (projet immobilier résidentiel, EPHAD, auditorium, bureaux) avec la contamination observée au droit du site.

Cette étude fait suite aux différentes campagnes d'investigations réalisées puis 2005.

L'objet d'une étude de risque est de produire une analyse quantitative des risques pour la santé humaine associés aux expositions à certaines substances chimiques, expositions définies selon l'usage actuel ou prévisible du site considéré.

Le risque est le résultat de l'existence concomitante de trois facteurs :

- **une source** de pollution constituée d'une ou plusieurs substances toxiques,
- **un vecteur** de transport et de dispersion des polluants, c'est à dire un milieu par lequel transite le polluant (eau de surface, eau souterraine, sol, air), et
- **une cible**, le récepteur du polluant (ici l'homme, en tant qu'utilisateur du site).

Les objectifs spécifiques de l'étude de risque sont :

- de quantifier les risques associés aux substances non cancérigènes (Quotient de Danger ou QD), et ceux associés aux substances cancérigènes (Excès de Risque Individuel ou ERI),
- de recommander, si nécessaire, des mesures compensatoires (dépollution, restrictions d'usage, mesures constructives, surveillance) qui pourront, le cas échéant, être intégrées à la mise en œuvre d'un plan de gestion.

## 3. Méthodologie générale

### 3.1. Textes de références

La méthodologie appliquée pour la réalisation de la mission répond :

- à la note du 19 avril 2017 et la mise à jour de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués d'avril 2017 éditée par le Ministère en charge de l'Environnement,
- aux exigences et préconisations des normes NF X31-620, révision de décembre 2021, « Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués »,
- aux exigences du référentiel de certification de service, révision 7 de février 2022, des prestataires dans le domaine des sites et sols pollués.

### 3.2. Description de la mission

La présente étude entre dans le champ d'application de la norme NF X 31-620-2 applicable aux « Prestations de service relatives aux sites et sols pollués - Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle » et codifiée (cf. Tableau 2) :

Notre prestation, conformément à la méthodologie et aux normes précitées, s'applique à la gestion des pollutions chimiques. Elle ne s'applique pas à la gestion des pollutions par des substances radioactives, par des agents pathogènes ou infectieux, par l'amiante ou par des engins pyrotechniques.

Tableau 2 : Codification des prestations selon la norme NFX31-620-2

Codification	Prestations
A320	Analyse des enjeux sanitaires

Le calcul de risque sanitaire a pour but de présenter de manière explicite, aux différentes parties, les éléments d'analyse sur lesquels la prise de décision pourra s'appuyer. A ce titre, cette étude est un outil d'analyse au service de la politique de gestion des sites et sols pollués, elle doit respecter les principes suivants :

- le principe de prudence scientifique,
- le principe de proportionnalité,
- le principe de spécificité,
- le principe de transparence.

La démarche d'évaluation des risques a été développée par l'Académie américaine des Sciences au début des années 1980 ; elle a ensuite été reprise par l'Union Européenne. Selon cette démarche, l'évaluation des risques liés aux substances chimiques se décompose en quatre étapes :

- **la caractérisation du contexte environnemental du site** (sources potentielles de contamination, vecteurs de transfert, récepteurs) ;
- **l'évaluation de l'exposition** consiste à quantifier l'exposition des populations (les concentrations ou les doses) sur la base du schéma conceptuel d'exposition établi, récapitulant l'ensemble des voies de transfert et d'exposition pour les populations cibles ;
- **l'évaluation de la toxicité** englobe l'identification du potentiel dangereux (ou détermination des effets indésirables que les substances chimiques sont intrinsèquement capables de

provoquer chez l'homme) et l'évaluation des relations dose-effet (ou estimation du rapport entre le niveau d'exposition, ou la dose, et l'incidence et la gravité des effets) ;

- **la caractérisation du risque** est la synthèse de l'évaluation des risques, et quantifie le risque lié aux substances chimiques, en présentant les résultats sous une forme exploitable, accompagnée d'une évaluation des incertitudes relevées tout au long de l'étude.

Un descriptif technique des différentes étapes mises en œuvre dans l'étude est présenté en **Annexe I**.

Les niveaux de risque acceptables sont ceux usuellement retenus au niveau international par les organismes en charge de la protection de la santé. Ils sont indiqués dans la méthodologie nationale ainsi que dans le guide « La démarche d'Analyse des Risques Résiduels » (MEDDE, 2007).

Une revue des textes réglementaire et bibliographiques utilisés dans le cadre de l'EQRS est également présentée en **Annexe II**.

## 4. Présentation de la zone d'étude

### 4.1. Localisation

La zone d'étude concernée est localisée 10, 16 et 18 route de Turin et 8bis avenue des Diabes Bleus à Nice (06) (voir Figure 1). Le site est occupé par des bâtiments de bureaux et d'activités de ENEDIS et GRDF et des zones de parking.

D'une superficie de 11 064 m<sup>2</sup>, dont près de 6 000 m<sup>2</sup> de bâti, le site est accessible depuis l'Avenue des Diabes Bleus. La localisation géographique du site et de son emprise est présentée en Figure 1 ci-dessous.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude



## 4.2. Rapports environnementaux à disposition

Le site a fait l'objet de plusieurs diagnostics de pollution depuis 2005 par ERG et BG, incluant une étude historique et des investigations sur les milieux sols, eaux souterraines, air du sol et air ambiant.

Les documents transmis par le client sont les suivants :

- Diagnostic initial ERG Etape A du 19.12.2005 (rapport 05ME177AaENVNSSG-9331) ;
- Investigations des milieux sol, air intérieur du 21.02.2017 (rapport 16MES362AaENVSftBT-40438) ;
- Synthèse environnementale - BG du 13.09.2017 (FF0109.96\_RN001/Est) ;
- Diagnostic environnemental ERG du 27 mars 2018 (16ME362BaENVEJEJ) ;
- Diagnostic complémentaire – investigation de l'air intérieur du 19.09.2018 (16ME362BbENVEJEJ-42646) ;
- Fiche de Synthèse Environnementale actualisée de ERG (30/10/2019).

La synthèse de ces études est présentée dans le corps du texte du Diagnostic pollution et Plan de Gestion n°118266/C auquel cette EQRS est annexée.

## 4.3. Projet d'aménagement envisagé

Le projet envisagé consiste en l'implantation d'un socle commun de commerces sur lequel s'élèvent à différentes hauteurs des logements (un peu plus de 50% de la surface globale du développement), un EPHAD, un équipement public type auditorium et des bureaux.

Au total 3 bâtiments seront réalisés sur un sous-sol commun et accueilleront les usages suivants (voir figure 3) :

- 1 : Auditorium ;
- 2 : Bureaux ;
- 3 : Logements ;
- 4 : EPHAD ;
- 5 : Commerces ;
- 6 : Co-living ;
- 7 : Jardins extérieurs apport de terres saines sur à minima 0,3 m d'épaisseur.

Les bâtiments seront construits sur deux niveaux de sous-sols (parkings enterrés comptant un peu plus de 400 places).

Les hauteurs des niveaux de sous-sols seront les suivant :

- R-1 : 4,35 m ;
- R-2 : 2,8 m.

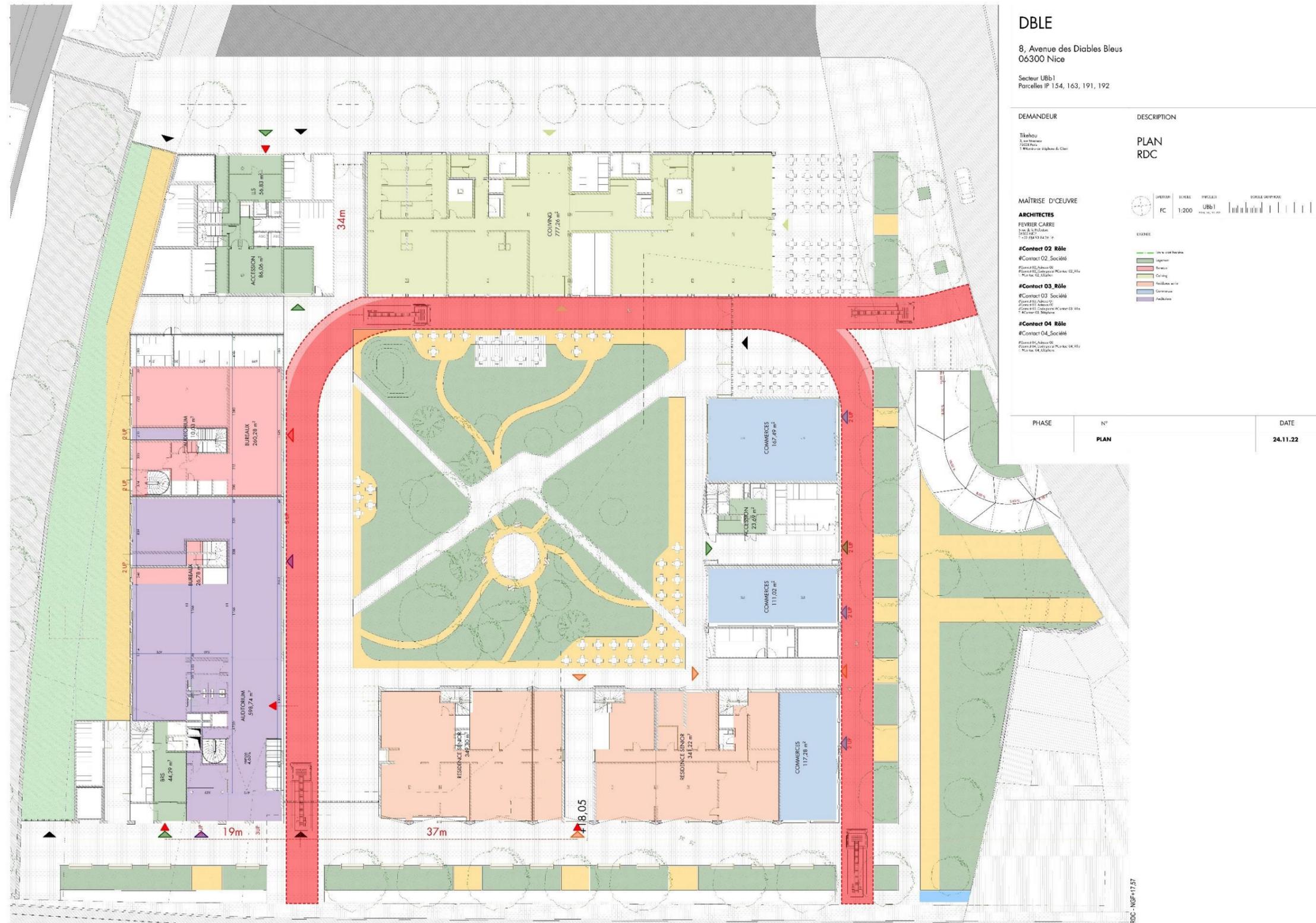


Figure 3 : Plan du projet d'aménagement (FEVRIERCARRE architecte – 24/11/2022)

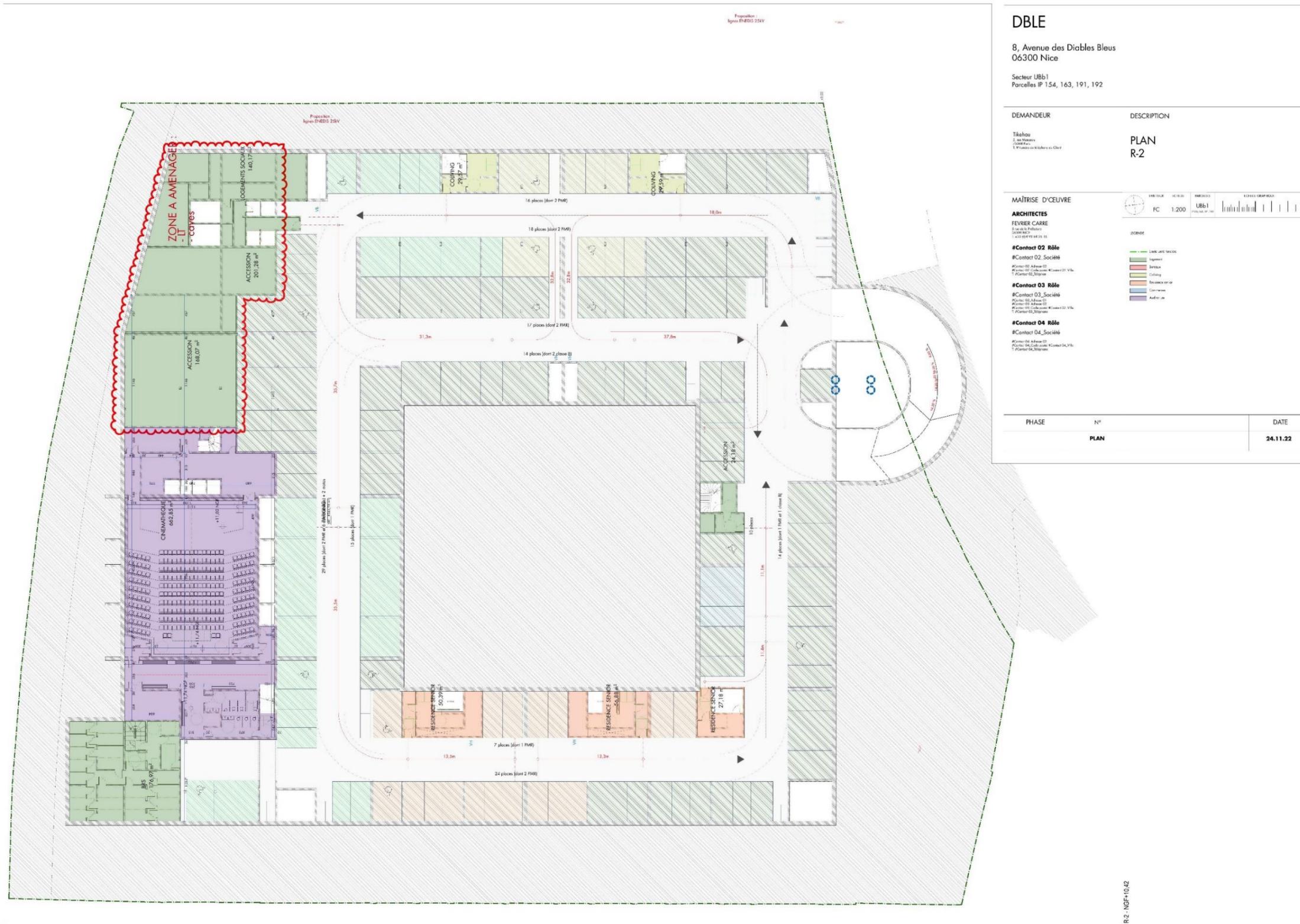


Figure 4 : Plan du projet d'aménagement du R-2 (DBLE, 24/11/22)

Dans le cadre du projet d'aménagement, un terrassement jusqu'à 7,5-8 m environ.

Il n'est pas prévu la réutilisation des terres excavées.

Compte tenu de la profondeur de la nappe (entre 4,05 et 4,43 m), le radier du bâtiment sera au contact du toit de la nappe.

## 5. Caractérisation de l'exposition

Les résultats de cette étude sont élaborés en l'état actuel des connaissances scientifiques tant du point de vue chimique, géologique que toxicologique (Novembre 2022).

La caractérisation de l'exposition s'établit en fonction des trois composantes d'un risque :

- une source de pollution,
- un transfert, c'est-à-dire un milieu par lequel transite le polluant
- une cible.

Ces trois composantes sont détaillées dans les chapitres suivants.

Enfin, un schéma conceptuel a été établi en vue de synthétiser les 3 composantes retenues dans cette étude.

### 5.1. Caractérisation des sources de pollution identifiées sur le site

#### Synthèse des données disponibles sur les sols<sup>3</sup> :

Les teneurs maximales mesurées dans les sols restant en place après le terrassement sont les suivantes :

- Hydrocarbures C5-C10 : 68 mg/kg au droit de S24 (3-4 m) ;
- Hydrocarbures C10-C40 : 4 200 mg/kg au droit de S24 (3-4 m) ;
- HAP : 659 mg/kg au droit de S25 (5-6 m)
- Trichloroéthylène : 0,11 mg/kg au droit de S24 (3-4 m) ;
- CAV : 29 mg/kg au droit de S24 (3-4 m) ;
- PCB : 0,21 mg/kg au droit de S24 (5-6 m) ;
- Cyanures fraction libre (part volatile) : 0,12 mg/kg au droit de S9 (0-1) ;
- métaux :
  - Chrome (Cr) : 32, mg/kg au droit de S8 0-1m ;
  - Nickel (Ni) : 70 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
  - Cuivre (Cu) : 220 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
  - Zinc (Zn) : 560 mg/kg au droit de S13 0-1m ;
  - Arsenic (As) : 120 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
  - Sélénium (Se) : 4 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
  - Molybdène (Mo) : 13 mg/kg au droit de S5 0-1m ;
  - Cadmium (Cd) : 1,9 mg/kg au droit de S1 3-4m ;

---

<sup>3</sup> Les concentrations observées dans les sols sont exprimées en « mg/kg MS ». Néanmoins, pour faciliter la lecture, l'unité sera indiquée sous la forme « mg/kg » dans la suite du document.

- Antimoine (Sb) : 12 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
- Baryum (Ba) : 900 mg/kg au droit de S9 5-6m ;
- Mercure (Hg) : 0,9 mg/kg au droit de S8 0-1m ;
- Plomb (Pb) : 1 600 mg/kg au droit de S13 0-1m.

#### Synthèse des données disponibles sur les eaux souterraines :

4 piézomètres ont été installés jusqu'à une profondeur maximale de 10 m et crépinés de 3 à 10 m.  
2 campagnes de prélèvements ont été réalisées en mai et juillet 2022.

Les concentrations maximales mesurées dans les eaux souterraines sont les suivantes :

- Hydrocarbures C5-C10 : 106 µg/l au droit de Pz4 ;
- Hydrocarbures C10-C40 : 0,57 µg/l au droit de Pz4 ;
- HAP : 130 µg/ au droit de Pz4 ;
- CAV : 110 µg/l au droit de Pz4 ;
- Cyanures totaux : 1,8 mg/l au droit de Pz3 (les cyanures libres n'ont pas été mesurés).

Les COHV n'ont pas été quantifiés dans les eaux souterraines.

#### Synthèse des données disponibles sur les gaz du sol :

3 piézairs ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 1,5 m.

Les concentrations maximales mesurées dans les gaz du sol sont les suivantes :

- Hydrocarbures aromatiques C6-C16 : 0,4 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair3 ;
- Hydrocarbures aliphatiques C5-C16 : 2,2 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair3 ;
- CAV : Toluène : 0,005 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair3 ;
- Naphtalène : 0,0002 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair1 ;
- COHV :
  - Trichlorométhane : 0,004 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair2 ;
  - 1,1,1-Trichloroéthane : 0,03 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair3 ;
  - Tétrachloroéthylène : 0,02 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pzair2.

#### Synthèse des données disponibles sur les gaz de nappe :

2 prélèvements au droit des ouvrages Pz2 et Pz4 ont été réalisés en juillet 2022.

Les concentrations maximales mesurées sont les suivantes :

- Hydrocarbures aromatiques C6-C16 : 0,07 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pz4 ;
- Hydrocarbures aliphatiques C5-C16 : 0,2 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pz2 ;
- CAV : 0,03 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pz4 ;
- COHV :
  - Trichlorométhane : 0,0031 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pz4 ;
  - 1,1,1-Trichloroéthane : 0,007 mg/m<sup>3</sup> au droit de Pz4.

Au vu des résultats obtenus dans les différents milieux, les principales sources résiduelles de pollution sont les suivantes :

- Métaux, CAV, HAP, COHV, PCB et HCT dans les sols ;
- CAV, HAP, cyanures et HCT dans les eaux souterraines ;
- HCT, naphtalène, CAV et COHV dans les gaz du sol ;
- HCT, CAV et COHV dans les gaz de nappe.

Au vu des sources identifiées dans les différents milieux lors des investigations et au vu du projet d'aménagement, deux zones ont été considérées sur le site :

- les espaces extérieurs où aucun terrassement n'est prévu ;
- les futurs bâtiments où un terrassement de 6 à 7,5 m est prévu.

Les sondages, piézaires et piézomètres considérés selon la zone étudiée sont présentés dans le tableau suivant.

**Tableau 4 : Sondages, piézomètres et piézaires par zone d'étude**

Zones d'étude	Sondages sol	Piézo­mètres « eau »	Pié­zaires (Gaz de sol)	Piézo­mètres « eau » (Gaz de nappe)
<b>Futurs espaces extérieurs</b>	Ensembles des sondages ERG et BG Sondages ANTEA S1, S2, S3, S5, S6, S8, S10, S12, S13, S14, S18, S19, S23, S24, et S25	PZ1 à Pz6	PzR1 à PzR3	-
<b>Futurs espaces intérieurs</b>	Aucun sondage n'a été pris en compte. L'ensemble des terres de 0 à 6/7,5 m au droit des bâtiments sera excavé et le radier des bâtiments se trouve au contact de la nappe.		-	Pz2 et Pz4

## 5.2. Identification des voies d'exposition

### 5.2.1. Contact direct avec les sols en place

D'après le projet d'aménagement, les espaces extérieurs sont recouverts de matériaux artificiels tels que de l'asphalte ou des terres d'apport saines (terre végétale pour les espaces verts). Ainsi, aucun contact direct avec les sols n'est envisagé.

### 5.2.2. Contact direct et/ou indirect avec les eaux souterraines

Considérant que les usagers du site n'auront aucun contact direct avec les eaux souterraines (absence de puits privatif sur le site), l'ingestion d'eau souterraine n'est pas retenue en tant que voie d'exposition.

### 5.2.3. Contact direct et/ou indirect avec les eaux superficielles

Considérant l'absence d'eau superficielle (ruisseau, étang, etc.), le contact direct et/ou indirect avec les eaux superficielles n'est pas retenu en tant que voie d'exposition.

### 5.2.4. Inhalation de substances volatiles présentes dans les sols et/ou les eaux souterraines

Considérant la possibilité de volatilisation de substances chimiques présentes dans les sols et des eaux souterraines vers l'air intérieur du bâtiment et vers l'air extérieur, l'exposition des futurs usagers du site par inhalation de ces substances volatiles est retenue.

Des mesures de gaz du sol (pour les espaces extérieurs) et de gaz de nappe (pour les espaces intérieurs) ont donc été réalisées afin de caractériser, de façon plus représentative, le dégazage des substances présentes dans les sols et les eaux souterraines.

### 5.2.5. Ingestion de végétaux autoproduits

Considérant la nature paysagère des espaces extérieurs, et donc l'absence de jardins potagers et d'arbres fruitiers au droit des futurs espaces verts communs, l'ingestion de végétaux autoproduits n'est pas une voie d'exposition retenue sur cette zone.

### 5.2.6. Ingestion d'eau potable issue des réseaux souterrains

Sous l'hypothèse de l'implantation des réseaux souterrains d'eau potable dans des zones non impactées, la voie d'exposition liée à l'éventuelle perméation de substances chimiques présentes dans les sols à travers les parois des canalisations souterraines n'a pas été prise en compte.

A titre informatif, les valeurs limites au-dessus desquelles il est recommandé d'apporter une attention particulière à la sélection du matériau constituant la canalisation sont présentées en **Annexe III**<sup>4</sup>.

### 5.2.7. Résumé

Le tableau suivant synthétise les voies d'exposition évaluées dans cette étude de risque sanitaire.

Tableau 5 : Résumé des voies d'exposition

Voies d'exposition potentielles	Pris en compte, ou non, dans l'étude	Commentaires
Ingestion de particules de sol	non	Les espaces extérieurs sont recouverts de matériaux artificiels tels que de l'asphalte, ou des terres d'apport saines (terre végétale).
Inhalation de poussières sur site	non	
Contact cutané avec les sols	non	
<b>Inhalation de substances volatiles à partir des sols, eaux souterraines et des gaz du sol</b>	<b>oui</b>	Les mesures réalisées dans les gaz du sol permettent d'estimer de façon plus réaliste, d'une part, le dégazage des substances volatiles à partir des sols, et potentiellement des eaux souterraines, et d'autre part, l'exposition des usagers.
Ingestion d'eau souterraine contaminée par infiltration à travers les sols	non	Absence de puits au droit du site.
Contact direct ou indirect avec les eaux superficielles	non	Absence d'eau superficielle.
Ingestion de végétaux autoproduits sur site	non	Absence de jardin potager ou arbre fruitier au droit du site.
Ingestion d'eau potable issue des réseaux souterrains	non	Implantation des réseaux souterrains dans des zones non impactées. Dans le cas contraire, les canalisations souterraines situées au droit des zones polluées devront circuler dans des remblais d'apport sains ou devront être de nature imperméable aux substances organiques (acier, fonte, matériau multicouches adapté).

### 5.3. Cibles retenues

L'aménagement projeté sur le site est la construction d'un ensemble immobilier à usage mixte (tertiaire, équipement public, logements, EHPAD), incluant 2 niveaux de parking.

Au regard du futur aménagement, les cibles étudiées sont les suivantes :

- Employés au RDC et dans les étages du bâtiment ;
- Employés au R-2 (auditorium) ;
- Résidents (logements et EPHAD).

<sup>4</sup> Recommandations issues du guide BRGM/RP-63675-FR d'août 2014, « Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des sites et sols pollués ».

A noter que deux scénarios distincts ont été retenus pour les employés :

- Employés travaillant dans les commerces et bureaux en RDC et étages, et utilisant les parkings en sous-sol :
- Employés de l'auditorium travaillant dans le R-2, et utilisant les parkings en sous-sol.

Ces cibles sont les plus sensibles en termes d'exposition et donc de risque sanitaire. L'étude couvre ainsi les autres cibles qui pourraient être présentes sur le site mais qui sont moins exposées, du fait d'une durée d'exposition plus faible.

A titre informatif, des cibles présentant des expositions cumulées sont présentées en analyse des incertitudes : les employés résidant dans les logements du site ou résidents fréquentant plus tard une EPHAD (cf. chapitre 8.4.2).

## 5.4. Sélection des substances et concentrations associées

Les limites de quantification analytiques ont été choisies de manière pertinente au regard des objectifs de l'étude, ainsi, l'ensemble des substances quantifiées par le laboratoire d'analyse a été sélectionné.

D'une façon générale, les substances retenues pour l'évaluation quantitative des risques répondent à certains critères<sup>5</sup> :

- toute substance dont les données disponibles (notamment physico-chimiques et toxicologiques) sont d'une qualité suffisante pour être exploitées en analyse des risques (critères définis par la circulaire DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014) ;
- toute substance dont la concentration est supérieure à la limite de quantification dans les sols, les eaux souterraines et/ou les gaz du sol, selon les voies d'exposition étudiées ;
- pour l'inhalation de substances volatiles, dans une démarche sécuritaire, toute substance présentant des données physico-chimiques relatives à sa volatilité (pression de vapeur, constante de Henry). Ainsi, l'ensemble des substances organiques est retenu, incluant les HAP possédant jusqu' à 4 cycles aromatiques. En revanche, parmi les ETM, seul le mercure est considéré comme volatil.

Dans chaque milieu retenu et pour chaque composé, Antea Group a retenu la concentration maximale observée parmi les données disponibles sur les sols restant en place ou réutilisés après aménagement.

---

<sup>5</sup> Cf. Annexe « Méthodologie Générale » du présent rapport, 3-Sélection des substances.

Tableau 6 : Milieux d'échantillonnage retenus selon les substances \_Espaces extérieurs

Famille de substances	Résultats des analyses			Milieu retenu
	SOLS	EAUX SOUTERRAINES	GAZ DU SOL	
<b>HAP</b>	>LQ	>LQ	<LQ	<b>Gaz du sols (LQ)</b>
<b>HCT</b>	>LQ	>LQ	<LQ	<b>Gaz du sols (LQ)</b>
<b>BTEX</b>	>LQ	>LQ	<LQ	<b>Gaz du sols (LQ)</b>
<b>COHV</b>	>LQ	<LQ	>LQ	<b>Gaz du sols</b>
<b>Mercure</b>	>LQ	<LQ	<LQ	<b>Gaz du sols (LQ)</b>
<b>Cyanures</b>	X	X	na	<b>Sols et eaux souterraines</b>

en gras : milieu retenu  
na : substance non analysée  
< LQ : substance non quantifiée  
> LQ : substance quantifiée

Tableau 7 : Milieux d'échantillonnage retenus selon les substances \_Espaces intérieurs

Famille de substances	Résultats des analyses		Milieu retenu
	EAUX SOUTERRAINES	GAZ DES EAUX	
<b>HAP</b>	X	na	<b>Eaux souterraines</b>
<b>HCT</b>	>LQ	X	<b>Gaz des eaux</b>
<b>BTEX</b>	>LQ	X	<b>Gaz des eaux</b>
<b>COHV</b>	<LQ	X	<b>Gaz des eaux</b>
<b>Mercure</b>	<LQ	na	<b>non retenu</b>
<b>Cyanures</b>	X	na	<b>Eaux souterraines</b>

en gras : milieu retenu  
na : substance non analysée  
< LQ : substance non quantifiée  
> LQ : substance quantifiée

Les éléments suivants ont, par ailleurs, été pris en compte :

Pour les hydrocarbures totaux :

Un élément important pour la réalisation de calculs de risque dans le cas d'une pollution par des hydrocarbures (HCT) est l'identification du type de produit pétrolier en présence, et la détermination de la répartition des fractions hydrocarbonées aromatiques et aliphatiques qui le composent. En effet, il n'existe pas, dans les bases de données spécialisées (US-EPA, ATSDR, OEHHA, etc.) de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) correspondant aux hydrocarbures totaux (Indice HCT).

Le groupe de travail TPHCWG<sup>6</sup> a défini, pour chaque fraction hydrocarbonée (fractions aliphatiques et aromatiques >EC<sub>6</sub>-EC<sub>8</sub>, >EC<sub>8</sub>-EC<sub>10</sub>, >EC<sub>10</sub>-EC<sub>12</sub>, >EC<sub>12</sub>-EC<sub>16</sub>...)<sup>7</sup>, une VTR et des paramètres physico-

<sup>6</sup> Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group, Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach, Volume 5, June 1999.

<sup>7</sup> EC : équivalent-carbone. Comme recommandé par le TPHCWG, les fractions sont définies par un « équivalent-carbone (EC) » et non pas par le nombre de carbones contenus dans le composé. Cet « équivalent-carbone » est calculé sur la base du point d'ébullition et du temps de rétention sur chromatographie gazeuse de chaque composé. Par exemple, l'EC du benzène (6 carbones) est 6,5 car son point d'ébullition et son temps de rétention sont approximativement situés entre ceux du n-hexane (6 carbones) et du n-heptane (7 carbones).

chimiques spécifiques. Pour une exposition par inhalation, seuls les hydrocarbures présentant un nombre d'équivalents-carbone inférieur à 16 ont été pris en compte, car ce sont les seuls considérés volatils et bénéficiant d'une VTR pour la voie respiratoire.

Dans les échantillons de gaz du sol et de nappe, les concentrations en hydrocarbures totaux ont été analysées selon le découpage suivant : >EC<sub>6</sub>-EC<sub>8</sub>, >EC<sub>8</sub>-EC<sub>10</sub>, >EC<sub>10</sub>-EC<sub>12</sub>, >EC<sub>12</sub>-EC<sub>16</sub> avec distinction entre les hydrocarbures aromatiques et aliphatiques. Les paramètres physico-chimiques et VTR proposés par le TPHWG sont donc appliqués aux fractions correspondantes.

Pour les BTEX :

Le benzène et le toluène correspondant respectivement aux hydrocarbures aromatiques EC<sub>6</sub>-EC<sub>7</sub> et EC<sub>7</sub>-EC<sub>8</sub>, les résultats de l'analyse TPH n'ont pas été retenus sur ces deux fractions afin d'éviter toute redondance dans les calculs de risque.

L'analyse des xylènes ne faisant pas la différenciation entre les méta- et para-xylènes, la concentration retenue pour les m,p xylènes a été appliquée aux 2 substances. L'isomère présentant l'indice de risque le plus élevé a donc été retenu pour le calcul de risque.

Pour les HAP :

Les propriétés physiques des HAP dépendent de leur masse moléculaire, de leur pression de vapeur saturante, de leur structure chimique et des conditions environnementales et climatiques (température, pression, humidité) du milieu dans lequel ils se trouvent. La répartition des HAP entre la phase gazeuse et la phase particulaire dans l'atmosphère est déterminée par la pression de vapeur saturante des composés et la température ambiante. En effet, les HAP les plus légers et dont les tensions de vapeur sont élevées, seront présents en majorité dans la phase gazeuse alors que les HAP les plus lourds, dont les pressions de vapeur saturante sont plus faibles, seront plutôt majoritairement présents dans la phase particulaire<sup>8</sup>.

Ainsi, on considère généralement que les HAP possédant moins de 3 cycles aromatiques sont majoritairement présent sous forme gazeuse et que les HAP présentant plus de 4 cycles aromatiques sont principalement présents sous formes particulaires. Entre les deux, pour les HAP possédant 3 à 4 cycles aromatiques, la répartition de ces composés peut se faire à la fois en phase gazeuse et particulaire.

Il en découle, que les HAP pris en compte pour la voie d'inhalation de vapeurs seront uniquement ceux possédant jusqu'à 4 cycles aromatiques avec un équivalent carbone inférieur à 16, c'est-à-dire : naphthalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène et pyrène.

---

<sup>8</sup> : INERIS - Complément au guide sur la surveillance dans l'air autour des installations classées - DRC - 16 - 158882 - 10272A

Les substances et concentrations retenues dans les calculs de risque sont présentées dans les tableaux suivants :

### Milieu Extérieur

Tableau 8 : Substances et concentrations retenues dans les gaz du sol

Substances	Concentrations mesurées (mg/m <sup>3</sup> )	Echantillon de référence
Acénaphthylène	1,70E-04	LQ
Acénaphène	1,70E-04	LQ
Aliphatique C>05 C06	8,20E-02	LQ
Aliphatique C>06 C08	1,64E-01	LQ
Aliphatique C>08 C10	1,64E-01	LQ
Aliphatique C>10 C12	7,39E-01	Pzair3
Aliphatique C>12 C16	1,51E+00	Pzair3
Anthracène	1,70E-04	LQ
Aromatique C>08 C10	4,00E-03	LQ
Aromatique C>10 C12	1,30E-01	Pzair3
Aromatique C>12 C16	2,81E-01	Pzair3
Benzène	3,23E-03	LQ
Chloroforme (Trichlorométhane)	3,70E-03	Pz2
Cumène (Isopropylbenzène)	3,23E-03	LQ
Ethylbenzène	3,23E-03	LQ
Fluoranthène	1,70E-04	LQ
Flurène	1,70E-04	LQ
Mercuré	2,19E-03	LQ
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	3,23E-03	LQ
Naphtalène	2,19E-04	Pzair2
Phénanthrène	1,70E-04	LQ
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	3,23E-03	LQ
Pyrène	1,70E-04	LQ
Toluène	5,40E-03	Pzair 3
Trichloroéthane. 1.1.1-	3,46E-02	Pzair 3
Tétrachloroéthylène	2,36E-02	Pzair2
Xylène. o-	3,23E-03	LQ
Xylène. p-	3,23E-03	LQ

Tableau 9 : Substance et teneur retenues dans les sols

Substances	Concentrations mesurées (mg/kg)	Echantillon de référence
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d'hydrogène)	0,12	S9 (0-1)

Tableau 10 : Substance et concentration retenues dans les eaux souterraines

Substances	Concentrations mesurées (µg/l)	Echantillon de référence
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d'hydrogène)	1 800*	Pz3

\*la modélisation sera réalisée à partir des cyanures totaux, les cyanures libres n'ayant pas été mesurés .

## Milieu Intérieur

Tableau 11 : Substances et concentrations retenues dans les gaz de nappe

Substances	Concentrations mesurées (mg/m <sup>3</sup> )	Echantillon de référence
Aliphatique C>05 C06	0,068	Pz2
Aliphatique C>06 C08	0,099	Pz2 et Pz4
Aliphatique C>08 C10	0,010	Pz4
Aliphatique C>10 C12	0,034	Pz4
Aliphatique C>12 C16	0,001	LQ
Aromatique C>08 C10	0,022	Pz4
Aromatique C>10 C12	0,041	Pz4
Aromatique C>12 C16	0,001	LQ
Benzène	0,012	Pz2
Chloroforme (Trichlorométhane)	0,003	Pz4
Cumène (Isopropylbenzène)	0,001	LQ
Ethylbenzène	0,002	Pz4
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	0,001	Pz4
Naphtalène	0,001	LQ
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	0,004	Pz4
Toluène	0,009	Pz4
Trichloroéthane. 1.1.1-	0,007	Pz4
Xylène. o-	0,003	Pz4
Xylène. p-	0,007	Pz4

Tableau 12 : Substances et concentrations retenues dans les eaux souterraines

Substances	Concentrations mesurées (µg/l)	Echantillon de référence
Acénaphthylène	6,9	Pz2
Acénaphène	98	PZ4
Anthracène	0,6	Pz4
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d'hydrogène)	1 800*	Pz3
Fluoranthène	2,2	Pz2
Fluorène	13	PZ4
Phénanthrène	2	PZ4
Pyrène	1,7	Pz2

\*la modélisation sera réalisée à partir des cyanures totaux, les cyanures libres n'ayant pas été mesurés.

Les caractéristiques physico-chimiques des substances retenues pour l'évaluation des risques ont été recherchées et sont présentées en **Annexe IV**.

## 5.5. Schéma conceptuel

Un schéma conceptuel résumant les scénarios d'exposition retenus est présenté en Figure 5.

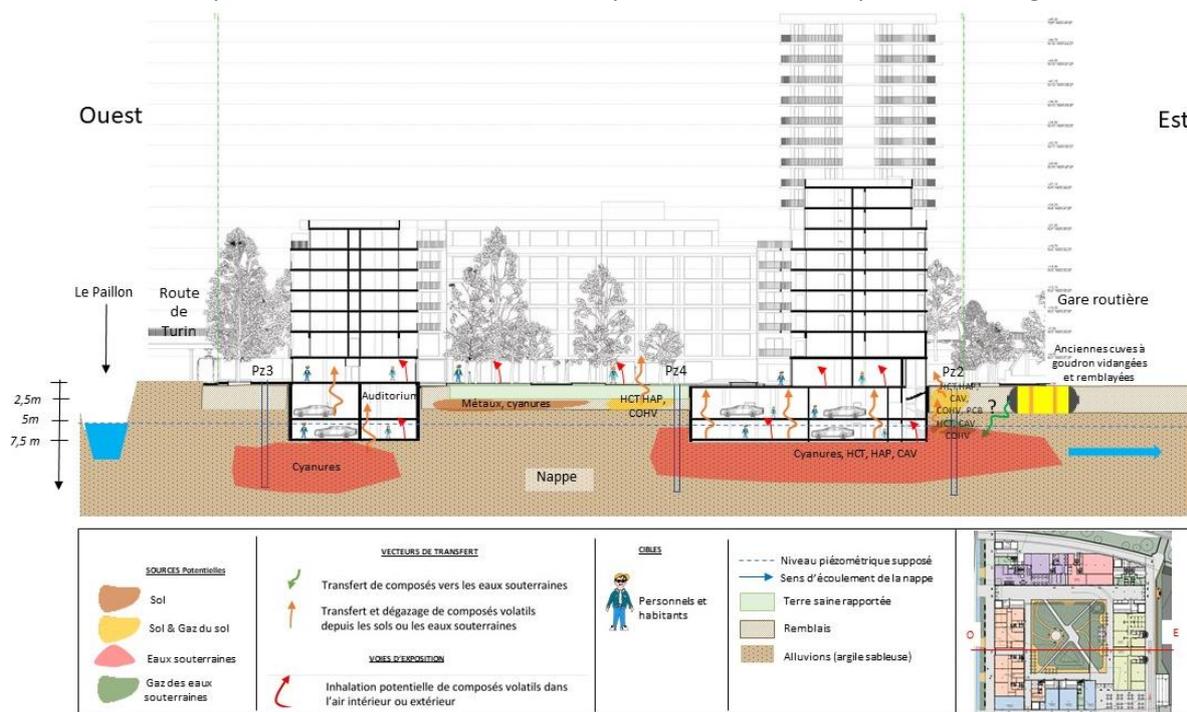


Figure 5 : Schéma conceptuel

## 5.6. Quantification de l'exposition

Cette section décrit les modèles d'exposition ainsi que les paramètres retenus pour évaluer les doses d'exposition pour les cibles considérées.

### 5.6.1. Choix du modèle d'exposition

Les calculs de risques sont réalisés à l'aide du logiciel MODUL'ERS conçu par l'INERIS. Ce logiciel, qui permet d'estimer les niveaux d'exposition des cibles étudiées et les niveaux de risque sanitaire associés, est basé sur l'ensemble des équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle fourni par l'INERIS et le guide de l'utilisateur Modul'ERS<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> INERIS, Rapport d'étude n°DRC-08-94882-16675C, 01/08/2010, « Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle »  
 INERIS, Rapport d'étude n° 14-141968-00696A, Mars 2014, Guide de l'utilisateur Modul'ERS

Dans le cadre de cette étude, le logiciel a fait appel aux modules suivants :

- module « conc gaz air intérieur Volasoil » qui est basé sur une approche dérivée du modèle Volasoil du RIVM (institut néerlandais de santé publique et de l'environnement), permettant le calcul des concentrations attendues dans l'air d'un bâtiment à partir d'une source nappe ou sol ;
- module « conc gaz air extérieur » qui permet le calcul du flux d'émission à partir d'une source nappe ou sol et l'estimation des concentrations attendues dans l'air extérieur (voir équation du document INERIS-DRC-08-94882-16675B) ;
- module « Niveaux\_Exposition\_Risque » qui permet de calculer, d'une part les niveaux d'exposition chroniques pour les différentes classes d'âge définies par l'utilisateur et d'autre part, les niveaux de risques chroniques pour des effets cancérigènes et non cancérigènes.

Le logiciel Modul'ERS utilisé est présenté en **Annexe V**.

### 5.6.1.1. Caractéristiques de la modélisation

Dans les modèles de transfert, il faut souligner que les mesures dans les gaz du sol et de la nappe permettent de s'affranchir d'une étape dans le calcul de risque, consistant à estimer les concentrations des gaz du sol à partir des concentrations mesurées dans les sols et dans les eaux souterraines et nécessitant certains paramètres d'entrée comportant des incertitudes. Cette approche permet d'évaluer de façon plus réaliste l'exposition des futurs usagers du site.

### 5.6.1.2. Paramètres d'entrée du modèle

Les équations de modélisation nécessitent l'utilisation de différents paramètres propres aux bâtiments, aux caractéristiques des sols et des matériaux sous-jacents et aux différentes substances présentes dans les sols et les eaux souterraines et/ou les gaz du sol.

L'ensemble des paramètres d'entrée du modèle est présenté en **Annexe V**.

- Air intérieur

Les transferts des substances volatiles ont été modélisés selon les principes suivants :

- la pollution a été positionnée au contact de la dalle de fond du bâtiment ;
- au vu des observations de terrain réalisées, le type de sol retenu au droit du futur bâtiment est un sol sableux ;
- en l'absence de valeurs propres au site, un taux de renouvellement d'air est usuellement fixé à 0,5 vol/h pour des bâtiments à usage résidentiel (habitations) et tertiaire ;
- pour les zones en R-2, le volume total des parkings en sous-sol a été considéré comme homogène du fait de rampes d'accès et d'une ventilation globale des parkings. Ainsi, la hauteur de l'espace modélisée a été prise égale à la hauteur sous-plafond totale des deux niveaux ;

- le taux de transfert considéré entre les parkings en sous-sols (R-2/R-1) et le rez-de-chaussée est de 68 % (taux maximal proposé par *Fast et al*)<sup>10</sup> ;
- le taux de transfert considéré entre le RDC et les étages supérieurs des bâtiments est de 100%.

- Air extérieur

Les transferts des substances volatiles ont été modélisés selon les principes suivants :

- au vu des observations de terrain réalisées, le type de sol retenu au droit des espaces extérieurs est un sol sableux ;
- modélisation d'un dégazage vers l'air extérieur, en tenant compte d'une vitesse de vents de 4 m/s<sup>11</sup> ;
- du fait d'un recouvrement des sols, une épaisseur de terres d'apport saines de 30 cm a été retenue au droit des espaces extérieurs.

La Figure 6 schématise la modélisation du transfert des substances volatiles.

---

<sup>10</sup> Fast, T.J., Kliet, en H., van de Wiel, 1987, Rapport nr.6.

Cette publication fait état d'un taux de transfert compris entre 0 et 68,5%, avec une moyenne à 10,7%, une médiane à 15,3%, un 95ième percentile à 39,4%. Cette référence est citée par C-Soil (van den Berg, 1994) et HESP qui retient un taux moyen de transfert vide sanitaire/rez-de-chaussée à 10%. Le même taux de transfert avait été retenu dans ECETOC (1990) sur la base d'une autre étude (ten Berge, 1985). ECETOC signale toutefois l'existence de valeurs jusqu'à 50%.

<sup>11</sup> Moyenne des vitesses de vents observées à la station météorologique de Nice (06), de 1991 à 2010.

Taux de transfert Sous-sol/RDC : 68%

Taux de transfert RDC/étage : 100%

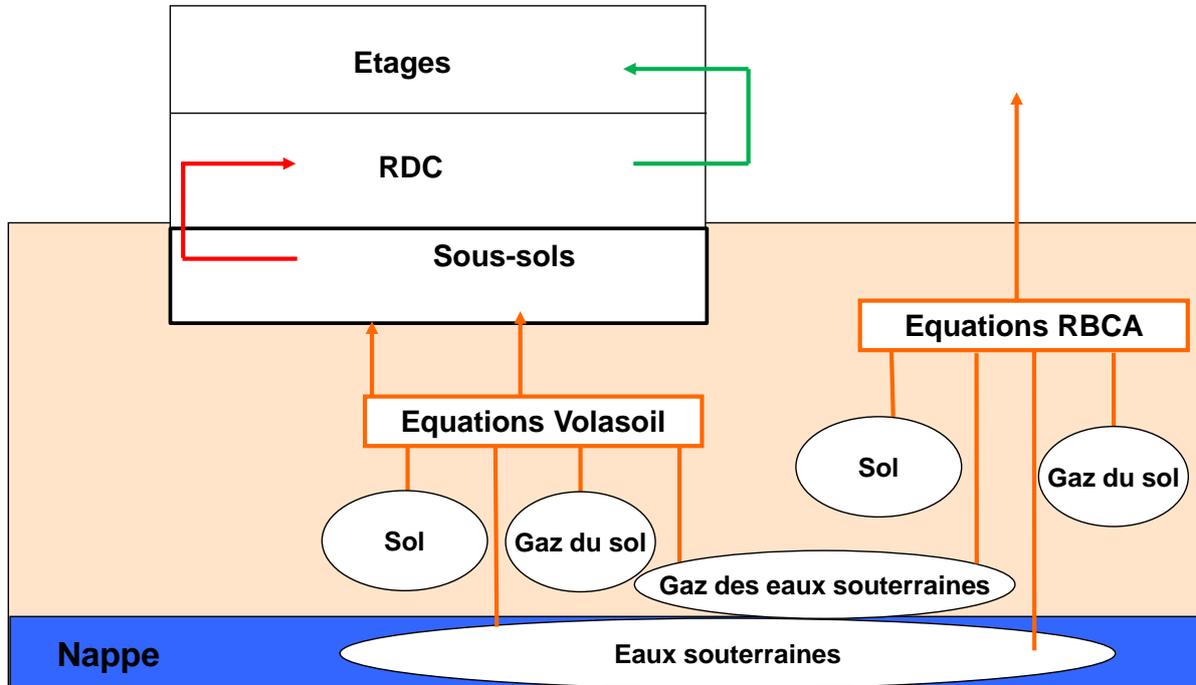


Figure 6 : Modélisation du transfert des substances volatiles

### 5.6.2. Calcul de la dose journalière ou concentration d'exposition

L'équation mathématique permettant de calculer la  $DJE_{ij}$  (exprimée en mg/(kg.j) ou la CI (exprimée en mg/m<sup>3</sup>) est la suivante :

$$DJE_{ij} = \frac{DE \cdot Q_{ij} \cdot FE}{P \cdot T_m} \cdot C_i \cdot ou \cdot CI = \frac{C_i \cdot DE \cdot FE}{T_m}$$

où :  $Q_{ij}$  est la quantité de milieu i administrée par la voie j par jour (en mg/j),

$C_i$  est la concentration au point d'exposition (en mg/m<sup>3</sup>),

FE est la fréquence d'exposition annuelle (sans unité),

DE est la durée d'exposition (en an),

P est le poids de l'individu (en kg),

$T_m$  est le temps moyen de prise en compte de l'apparition possible d'un effet néfaste sur la santé (en années).

$T_m = DE \cdot 365$  j pour les effets à seuil et  $T_m = 70$  (vie entière)  $\cdot 365$  pour les effets sans seuils.

Pour chaque substance chimique retenue dans le cadre de cette étude, la dose journalière ou concentration d'exposition est présentée, avec les calculs de risque sanitaire, en **Annexe VII**.

### 5.6.3. Paramètres d'exposition

Les paramètres généraux caractérisant l'exposition des différentes cibles ou récepteurs sont renseignés ci-après, selon les indications fournies par l'INERIS<sup>12</sup>.

Tableau 13 : Paramètres d'exposition retenus dans l'étude

Paramètres	Cibles	Valeurs retenues	Justifications et références
Durée d'exposition	Employés Résidents Résidents EPHAD	42 ans 30 ans 20 ans	US-EPA (2011) + INERIS (2017) + Durée légale du travail en France Jugement d'expert
Temps moyenné	Employés Résidents  Toutes	<i>Effets non cancérigènes (T<sub>nc</sub>) :</i> 42 ans * 365 jours/an = 15 330 jours 30 ans * 365 jours/an = 10 950 jours  <i>Effets cancérigènes (T<sub>c</sub>) :</i> T <sub>c</sub> = vie entière (70 ans) * 365 jours/an = 25 550 jours	US EPA (2011) + INERIS (2017)
Fréquence d'exposition annuelle à l'intérieur : RDC et étages	Employés Résidents  Résidents EPHAD	0,2 (8 h/j, 220 j/an) Adultes : 0,69 / Enfants : 0,61 à 0,73 selon les classes d'âge 1 (24h/jour tous les jours)	INERIS (2017)  Jugement d'expert
Fréquence d'exposition annuelle à l'intérieur : Parkings en sous-sol (R-1 et R-2)	Employés Résidents	0,0125 (0,5 h/j, 220 j/an) 0,021(0,5 h/j tous les jours)	Jugement d'expert
Fréquence d'exposition annuelle à l'intérieur : Zone auditorium (R-2)	Employés	0,2 (8 h/j, 220 j/an)	INERIS (2017) Jugement d'expert
Fréquence d'exposition annuelle à l'extérieur	Employés Résidents	0,025 (1 h/j, 220 j/an) Adultes : 0,028 / Enfants : 0,031 à 0,1 selon les classes d'âge	Jugement d'expert INERIS (2017)
Hauteur de respiration	Employés Résidents	1,55 m Adultes : 1,55 m / Enfants : 0,3 à 1,5 m selon les classes d'âge	INERIS (2017)

<sup>12</sup> INERIS, Rapport d'étude n°DRC-14-141968-11173C, 21/06/2017, « Paramètres d'exposition de l'homme du logiciel Modul'ERS »

## 6. Evaluation de la relation dose réponse

### 6.1. Synthèse des données toxicologiques

Les principaux effets toxiques engendrés par les substances retenues pour l'évaluation des risques sont présentés en **Annexe VI**.

### 6.2. Valeurs toxicologiques de référence retenues

L'ensemble des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) retenues dans le cadre de la présente étude est présenté dans le tableau ci-dessous. Pour chaque VTR retenue, la source bibliographique est indiquée.

La sélection des VTR a été établie selon les recommandations de la note d'information n°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014.

Les VTR ont fait l'objet d'une mise à jour par Antea Group en août 2022.

**Tableau 14 : Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation**

N° CAS	Substances	Voie d'exposition : inhalation								
		Durée d'exposition : chronique								
		Effets à seuil					Effets sans seuil			
VTR (mg/m <sup>3</sup> )	Effet/organe cible	Organisme	Date de construction	Expertise (organisme, date)	VTR (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Organisme	Date de construction	Expertise (organisme, date)		
<b>Composés Aromatiques Volatils (CAV)</b>										
71432	benzène	1,0E-02	Immunologique	ANSES	2008	-	2,6E-02	ANSES	2013	-
100414	éthylbenzène	1,5E+00	Ototoxique	ANSES	2016	-	-	ANSES	2016	-
108883	toluène	1.9E+01	Poids de la progéniture	ANSES	2017	-	-	-	-	-
108383	m-xylène	1,0E-01	Neurologique	US-EPA	2003	ANSES, 2020	-	-	-	-
95476	o-xylène									
106423	p-xylène									
98828	cumène	4,0E-01	Reins	US EPA	1997	-	-	-	-	-
95636	pseudocumène	6,0E-02	Neurologique	US EPA	2016	-	-	-	-	-
108678	mésitylène	6,0E-02	Neurologique	US EPA	2016	-	-	-	-	-
<b>Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)</b>										
83329	acénaphène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2018
208968	acénaphthylène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2019
120127	anthracène	-	-	-	-	-	6,0E-03	US EPA + FET	2018	INERIS 2019
206440	fluoranthène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2019
86737	fluorène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2019
91203	naphtalène	3,7E-02	Respiratoire	ANSES	2013	INERIS 2019	5,6E-03	ANSES	2013	INERIS 2019
85018	phénanthrène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2019
129000	pyrène	-	-	-	-	-	6,0E-04	US EPA + FET	2017	INERIS 2019
<b>Composés Organo-Halogénés Volatils (COHV)</b>										
71556	1,1,1-trichloroéthane	1,0E+00	Hépatique	OEHHA	2008	INERIS, 2014	-	-	-	-
67663	chloroforme	6,3E-02	Effet cancérigène à seuil : Reins	ANSES	2008	-	-	ANSES	2012	-
127184	tétrachloroéthylène	4,0E-01	Reins	ANSES	2017	-	2,6E-04	US EPA	2012	ANSES 2017
<b>Métaux</b>										
7439976	mercure	3,0E-05	Neurologique	OEHHA	2008	INERIS, 2009	-	-	-	-

N° CAS	Substances	Voie d'exposition : inhalation Durée d'exposition : chronique								
		Effets à seuil					Effets sans seuil			
		VTR (mg/m <sup>3</sup> )	Effet/organe cible	Organisme	Date de construction	Expertise (organisme, date)	VTR (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Organisme	Date de construction	Expertise (organisme, date)
<b>Hydrocarbures Totaux (HCT)</b>										
HCTal1	HCT ALIPHATIQUES EC5-EC6	1,8E+01	Foie, reins	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTal2	HCT ALIPHATIQUES EC6-EC8	1,8E+01	Foie, reins	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTal3	HCT ALIPHATIQUES EC8-EC10	1,0E+00	Foie, sang	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTal4	HCT ALIPHATIQUES EC10-EC12	1,0E+00	Foie, sang	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTal5	HCT ALIPHATIQUES EC12-EC16	1,0E+00	Foie, sang	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTar3	HCT AROMATIQUES EC8-EC10	2,0E-01	Perte de poids	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTar4	HCT AROMATIQUES EC10-EC12	2,0E-01	Perte de poids	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
HCTar5	HCT AROMATIQUES EC12-EC16	2,0E-01	Perte de poids	TPHCWG, VOL 5	1999	-	-	-	-	-
<b>Autres</b>										
57125	cyanures libres	2,5 E-02	Respiratoires, cardiovasculaire et du Système nerveux central	RIVM	2001	INERIS 2011	-	-	-	-

### 6.3. Valeurs de gestion de l'air intérieur

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, au-delà de la simple compatibilité sanitaire, les valeurs de gestion doivent être respectées pour les milieux qui en disposent. Concernant l'air intérieur, ces valeurs de gestion correspondent aux valeurs réglementaires (cas du benzène et du formaldéhyde), aux valeurs repères établies par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) ou à défaut aux valeurs de gestion de l'air intérieur (VGAI) établies par l'ANSES.

#### Cas du benzène, du tétrachloroéthylène et du naphthalène :

Il existe pour ces substances une valeur repère de qualité d'air intérieur (non réglementaire) établie par le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP)<sup>13</sup> pour les espaces clos (immeubles d'habitation ou locaux ouverts au public). Le HCSP recommande une valeur de 2 µg/m<sup>3</sup> pour le benzène, 250 µg/m<sup>3</sup> pour les effets à seuil du tétrachloroéthylène et 10 µg/m<sup>3</sup> pour le naphthalène pour l'air intérieur des espaces clos.

#### Cas de l'éthylbenzène et du toluène :

Pour ces substances, l'ANSES a proposé une VGAI de 1 500 µg/m<sup>3</sup> pour l'éthylbenzène<sup>14</sup> et de 20 000 µg/m<sup>3</sup> pour le toluène<sup>15</sup> dans l'air intérieur des espaces clos.

Les concentrations modélisées dans l'air intérieur du bâtiment seront donc comparées aux valeurs de gestion précitées (cf. chapitre 8.2).

---

<sup>13</sup> Haut Conseil de la santé publique « Avis relatif aux valeurs repères d'aide à la gestion de la qualité de l'air pour le trichloroéthylène », juillet 2020 « Avis relatif à la fixation de valeurs repères d'aide à la gestion pour le trichloroéthylène dans l'air des espaces clos », juillet 2012, « Avis relatif à la fixation de valeurs repères d'aide à la gestion pour le tétrachloroéthylène dans l'air des espaces clos », juin 2010, « Avis relatif à la fixation de valeurs repères d'aide à la gestion pour le benzène dans l'air des espaces clos », juin 2010, « Avis relatif à la fixation de valeurs repères d'aide à la gestion pour le naphthalène dans l'air des espaces clos », janvier 2012.

<sup>14</sup> ANSES « proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur – L'éthylbenzène », Octobre 2016.

<sup>15</sup> ANSES « proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur – Le toluène », Juillet 2018.

## 7. Quantification des risques sanitaires

L'ensemble des résultats est établi en l'état actuel des connaissances (novembre 2022).

Les calculs ont été réalisés avec des paramètres propres au site quand ceux-ci étaient disponibles. En l'absence de valeurs spécifiques, des valeurs disponibles dans la littérature ou des choix d'expert ont été retenus<sup>16</sup>.

Les feuilles de calculs sont présentées en **Annexe VII**.

Il est rappelé que l'acceptabilité des risques est définie sur la base de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués d'avril 2017. Un niveau de risque est considéré comme acceptable pour les usagers du site dans les cas suivants :

- Quotient de Danger (QD) inférieur à 1,0 (risques pour les effets à seuil : effets non cancérigènes d'une part, et effets cancérigènes non génotoxiques d'autre part),
- Excès de Risque Individuel (ERI) inférieur à  $1,0 \cdot 10^{-5}$  (risques pour les effets sans seuil de dose : effets cancérigènes génotoxiques).

Selon la méthodologie nationale, l'additivité des risques liés aux différents polluants et/ou aux différentes voies d'exposition doit être réalisée selon les recommandations des instances sanitaires au niveau national. En l'état actuel, ces recommandations conduisent :

- Pour les effets à seuils, à l'addition des quotients de danger (QD) uniquement pour les substances ayant le même mécanisme d'action toxique sur le même organe cible,
- Pour les effets sans seuils, l'addition de tous les excès de risques de cancer.

Toutefois, des incertitudes demeurent sur les organes cibles et les possibilités d'effets croisés ou de synergie lorsque plusieurs substances sont présentes. Aussi, dans une démarche sécuritaire, la somme des QD, toutes voies et toutes substances confondues, est présentée ci-après.

Les niveaux de risque sanitaire, calculés sur la base des concentrations maximales attendues sur le site après terrassements, sont présentés dans les tableaux suivants.

---

<sup>16</sup> User's guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings, USEPA, February 22, 2004.

Tableau 15 : Risques sanitaires pour les futurs employés du site

	QD	ERI
<b>Employés commerces et bureaux (RDC/étages) : Niveau de risque global</b>	<b>4,8E-03</b>	<b>9,6E-08</b>
Inhalation d'air intérieur	4,7E-03	9,6E-08
Inhalation d'air extérieur	2,9E-05	3,6E-11
<b>Employés auditorium (R-2) : Niveau de risque global</b>	<b>6,8E-03</b>	<b>1,4E-07</b>
Inhalation d'air intérieur	6,8E-03	1,4E-07
Inhalation d'air extérieur	2,9E-05	3,6E-11
<i>Seuils de référence</i>	<i>1,0E+00</i>	<i>1,0E-05</i>

Tableau 16 : Risques sanitaires pour les futurs résidents du site

	QD*	ERI
<b>Résidents logements (exposition de 0 à 30 ans) : Niveau de risque global</b>	<b>1,7E-02</b>	<b>2,2E-07</b>
Inhalation d'air intérieur	1,6E-02	2,2E-07
Inhalation d'air extérieur	1,8E-04	7,3E-11
<b>Résidents EPHAD (exposition de 20 ans) : Niveau de risque global</b>	<b>2,2E-02</b>	<b>2,1E-07</b>
Inhalation d'air intérieur	2,2E-02	2,1E-07
<i>Seuils de référence</i>	<i>1,0E+00</i>	<i>1,0E-05</i>

\*Le QD présenté ici correspond à la classe d'âge la plus pénalisante. Le détail est discuté au chapitre suivant.

**Les résultats des calculs de risque, pour la voie d'exposition par inhalation de substances volatiles, indiquent des niveaux de risque sanitaires inférieurs aux seuils de référence, pour les futurs usagers du site.**

## 8. Interprétation des résultats

### 8.1. Hiérarchisation des risques

Les risques sanitaires les plus élevés sont les risques associés à une exposition des résidents de l'EPHAD aux substances présentes dans les gaz de nappe.

Les substances quantifiées contribuant majoritairement :

- au niveau de risque à seuil (QD), sont le mésitylène (47% du risque) les hydrocarbures aliphatiques volatils dans les gaz de nappe (28% du risque) ;
- au niveau de risque sans seuil (ERI), sont le benzène dans les gaz de nappe (90% du risque) ;

Les niveaux de risque les plus élevés sont observés pour les futurs résidents de l'EPHAD, du fait d'une fréquence d'exposition plus élevée que les autres cibles (pour rappel, il a été considéré une présence 24h/24h, tous les jours).

Les niveaux de risques cancérigène (ERI), les plus élevés sont observés pour les futurs résidents.

### 8.2. Comparaison aux valeurs de gestion

Au-delà des niveaux de risque sanitaires établis, les concentrations modélisées sont ici comparées aux valeurs réglementaires et valeurs guides disponibles en termes de qualité d'air intérieur.

A noter que les concentrations présentées dans ce chapitre ne sont pas issues de mesures réelles dans le milieu mais d'une modélisation. Cette modélisation est par conséquent sujette à certaines incertitudes du fait des paramètres de modélisation retenus (taux de ventilation, dimensions des bâtiments, type de sol au droit du bâti, taux de fissuration de la dalle, etc.), l'influence de certains de ces paramètres sur la concentration modélisée sera présentée en analysé des incertitudes (cf. chapitre 8.3.2).

Compte-tenu d'un impact en benzène, éthylbenzène, toluène et naphthalène au droit du site, les concentrations modélisées dans les futurs bâtiments ont été comparées, à titre informatif, à la valeur repère de qualité d'air intérieur (VR) des espaces clos du Haut Conseil de Santé Public (HCSP) ou à la VGAI proposée par l'ANSES (pour le cas de l'éthylbenzène et du toluène).

Tableau 17 : Comparaison des concentrations modélisées avec les valeurs de gestion

Substance	Concentrations modélisées dans l'air intérieur des commerces, bureaux, logements ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentrations modélisées dans l'air intérieur ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Auditorium (R-2)	Valeurs de gestion du HCSP ou de l'ANSES
Benzène	0,03	0,04	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ethylbenzène	2,51	3,7	1 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Toluène	<0,001	<0,001	20 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Naphtalène	<0,001	<0,001	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les concentrations modélisées dans l'air intérieur du futur bâtiment sont inférieures aux valeurs de gestion retenues.

## 8.3. Evaluation des incertitudes

L'évaluation des risques sanitaires se décompose en cinq grandes étapes, dont chacune fait l'objet d'incertitudes :

- la caractérisation physique du site,
- la sélection des substances,
- l'évaluation de l'exposition,
- l'évaluation de la toxicité,
- la caractérisation des risques.

### 8.3.1. Analyse qualitative

#### 8.3.1.1. Incertitudes sur les caractéristiques physiques du site

Les incertitudes concernent ici les reconnaissances effectuées sur le site. Des observations de terrain sur les sols ont été réalisées lors des sondages afin de déterminer précisément les différents paramètres spécifiques du site, et réduire ainsi l'incertitude associée à ces paramètres.

Au droit du site, les sols sont constitués de sable/argile sableuse. Le type de sol retenu, correspondant au sol le plus perméable aux substances volatiles observé lors des investigations de terrain, est un sol de type sableux. Ce choix est sécuritaire en termes de risque sanitaire.

#### 8.3.1.2. Incertitudes sur l'évaluation de l'exposition

**Les cibles** choisies sont les usagers du site les plus sensibles, c'est-à-dire ceux qui sont les plus exposés aux substances volatiles présentes dans les sols, eaux souterraines, les gaz des eaux et gaz du sol. Dans une démarche sécuritaire, les risques associés à chacun des milieux étudiés sont cumulés.

Il faut souligner ici que des cas d'exposition cumulée ont été étudiés en analyse des incertitudes (cf. chapitre 8.3.2) :

- cas d'un employé résidant également sur le site ;
- cas d'un adulte résidant pendant 30 ans puis fréquentant l'EPHAD pendant 20 ans.

Dans cette étude, **les modèles d'exposition** du logiciel Modul'ERS développé par l'INERIS ont été utilisés pour estimer les concentrations de polluants dans l'air intérieur et extérieur, à partir des concentrations mesurées dans les sols, les eaux souterraines, les gaz des eaux et les gaz du sol. L'estimation de l'exposition d'un individu, à l'aide de modèles d'exposition, n'est qu'une représentation mathématique approximative, et généralement sécuritaire, de la réalité. L'incertitude associée aux modèles est toutefois difficile à évaluer.

De nombreux paramètres, spécifiques au site ou aux récepteurs, influencent les résultats des modélisations. Les propriétés physico-chimiques et géologiques font partie des paramètres influençant la détermination des flux de remontées des substances volatiles. Les paramètres géologiques proviennent de mesures ou d'observations réalisées sur site. Les propriétés physico-chimiques des substances (provenant de bases de données fiables telles que l'INERIS, l'US-EPA, ou la littérature scientifique), et les concentrations retenues ne sont pas des sources majeures d'incertitudes. Les hauteurs de plafond, et les dimensions des bâtiments ne font pas l'objet d'incertitudes majeures du fait de l'utilisation des plans d'aménagement fournis par le client.

Une part de l'incertitude, liée à l'utilisation du modèle, provient donc de l'utilisation de paramètres par défaut du fait de l'absence de données spécifiques. En effet, pour certains paramètres, seules les valeurs standards proposées par le modèle sont connues. Dans ce cas, il est difficile d'envisager d'autres valeurs (taux de renouvellement d'air dans un bâtiment, taux de fissuration, température du sol...).

Lors d'une exposition par inhalation de substances volatiles provenant des sols et des eaux souterraines, il apparaît que trois facteurs ont une influence non négligeable sur le résultat final. Il s'agit du taux de fissuration de la dalle, de la hauteur de l'espace clos modélisé et du taux de renouvellement d'air.

Concernant la fraction surfacique occupée par les ouvertures de la dalle, en l'absence de valeurs propres au site, il a été considéré une valeur standard de  $1,0E-05$  (RIVM 1996, 2008). D'autres valeurs, correspondant à une dalle dégradée ou à une dalle neuve, sont étudiées en analyse des incertitudes (cf. chapitre 8.3.2). A noter qu'il n'a pas été tenu compte de la mise en œuvre d'une étanchéité spécifique de la dalle et des parois des sous-sols (par cristallisation par exemple).

Concernant le volume des sous-sols, et considérant les accès entre les différents niveaux, le volume total (et notamment la hauteur totale) des niveaux enterrés a été retenu sur la base des plans d'aménagement fournis. Le transfert des substances volatiles vers le rez-de-chaussée est ensuite estimé *via* un taux de transfert sécuritaire de 68%.

Concernant le taux de ventilation du parking souterrain pour les bâtiments en R-2, en l'absence de valeurs propres au site, le taux de renouvellement d'air standard (pour un usage résidentiel) du logiciel Johnson et Ettinger a été retenu soit 0,5 vol/h. A titre informatif, cela correspond à une ventilation de fonctionnant pendant 3,5 h/j, pour un nombre de places de stationnement établi à 400 (cf. plan d'aménagement). Une ventilation de 0,1 vol/h est étudiée afin de déterminer le niveau de risque en cas de ventilation du parking 1 h/j à un taux de 300 m<sup>3</sup>/h/véhicule. Ce taux de renouvellement d'air est étudié en analyse des incertitudes (cf. chapitre 8.3.2).

### 8.3.1.3. Incertitudes sur la sélection des substances et les concentrations

Les concentrations des différentes substances mesurées sur site sont soumises à des incertitudes inhérentes aux méthodes de prélèvements et d'analyses :

- Sur le terrain, des biais de prélèvements existent, liés soit à la technique de prélèvement (tarière manuelle, carottage, géoprobe, pelle mécanique ...), soit à la constitution de l'échantillon (choix de la lithologie à échantillonner, échantillon simple ou composite ...). Les protocoles de terrain font en sorte de limiter ses biais, mais il n'est pas possible de les éviter totalement.
- Au laboratoire, des incertitudes liées aux méthodes d'analyse sont également identifiées. Là encore, les protocoles permettent de limiter ces incertitudes.
- La réalisation d'un nombre d'échantillon important permet également de limiter les incertitudes.

La sélection des substances chimiques retenues pour l'étude est une source d'incertitudes. D'une part, les substances considérées sont limitées aux substances polluantes identifiées lors des investigations puis sélectionnées dans l'étude. D'autre part, les limites de quantification des laboratoires ne permettent pas d'établir une concentration pour chaque polluant analysé.

Une revue historique, un diagnostic initial, et une étude complémentaire sur les sols les eaux souterraines, les gaz des eaux et les gaz du sol ont été réalisés sur le site depuis 2005. Les analyses sur les sols ont été centrées sur les hydrocarbures : HCT, BTEX, HAP, ainsi que sur les COHV, les PCB et les métaux. Les mesures de gaz du sol et gaz de nappe ont également permis d'estimer de façon plus réaliste le dégazage des substances observées au niveau des sols et eaux souterraines.

Par précaution, les concentrations maximales mesurées sur le site, dans les milieux restant en place après terrassement, ont été retenues pour le calcul des risques dans l'air ambiant (intérieur et extérieur). Ce choix est sécuritaire en termes de risque sanitaire.

En outre, lorsque la substance n'a pas été détectée dans les gaz du sol/gaz de nappe, il a été retenu, dans une hypothèse sécuritaire, une teneur égale à la limite de quantification des laboratoires lorsque la substance considérée a été quantifiée dans les sols et/ou les eaux souterraines et/ou les gaz du sol lors de campagnes d'investigations précédentes.

#### 8.3.1.4. Incertitudes sur l'évaluation de la toxicité

Selon l'US EPA, il existe de nombreuses sources d'incertitudes associées à la détermination des valeurs de toxicité, notamment du fait :

- de l'extrapolation de la réponse dose-effet pour de faibles doses à partir de hautes doses,
- de l'extrapolation de réponse pour des expositions de courtes durées à de longues durées,
- de l'extrapolation des résultats d'expérimentations chez l'animal pour prédire des effets chez l'homme,
- de l'extrapolation de réponses à partir d'études provenant de populations animales homogènes pour prédire les effets sur une population composée d'individus avec un large spectre de sensibilité.

Les bases de données toxicologiques retenues pour l'étude sont en priorité celles de l'ANSES, l'US-EPA (base de données de l'IRIS<sup>17</sup>), de l'ATSDR, et de l'OMS, puis celles du RIVM<sup>18</sup>, de Health Canada, de l'OEHHA et de l'EFSA<sup>19</sup>.

La sélection des VTR a été établie selon les recommandations de la note d'information n°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 (cf. **Annexe I**).

#### 8.3.1.5. Incertitudes sur la caractérisation du risque

Les incertitudes inhérentes à la caractérisation du risque sont directement fonction des incertitudes précisées dans les chapitres précédents.

---

<sup>17</sup> Integrated Risk Information System.

<sup>18</sup> Institut Royal pour la Santé Publique et l'Environnement (Pays-Bas).

<sup>19</sup> Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (European Food Safety Authority).

Il convient de rappeler que cette analyse ne peut tenir compte de toutes les incertitudes liées à l'utilisation des modèles. Néanmoins, il faut souligner que, de façon générale, **les paramètres retenus pour calculer les risques ont tendance à surestimer les risques sanitaires ; ceci répond au principe de prudence scientifique qui régit l'évaluation quantitative des risques sanitaires.**

### 8.3.2. Analyse quantitative

3 paramètres sont étudiés ici :

- Exposition cumulée sur site ;
- La ventilation ;
- Le taux de fissuration de la dalle.

#### 8.3.2.1. Exposition cumulée

A titre informatif, 2 cas sont étudiés :

- le cas des employés résidant également sur le site (« employé résident »). Il a été considéré que cet employé passait 8h/jour sur son lieu de travail, et 12h/jour dans son logement, et, de fait, qu'il n'avait pas besoin de se rendre quotidiennement dans le parking ;
- le cas d'un adulte résidant pendant 30 ans (12h/jour) dans son logement et se rendant quotidiennement dans son parking puis fréquentant pendant 20 ans l'EPHAD.

Tableau 18 : Résultats de l'analyse des incertitudes sur l'exposition cumulée

	QD	ERI
Employés résident	2,3E-02	3,5E-07
Résident puis résident en EPHAD	3,8E-02	4,3E-07
<i>Seuils de référence</i>	<i>1,0E+00</i>	<i>1,0E-05</i>

Les résultats font apparaître des niveaux de risque inférieurs au seuil de référence pour les cibles à exposition cumulée.

#### 8.3.2.2. Ventilation

Une ventilation standard de 0,5 vol/h a été initialement appliquée dans le sous-sol des bâtiments R-2. A titre informatif, en considérant une ventilation mécanique de 300m<sup>3</sup>/h/véhicule dans le parking, et un nombre de places de stationnement établi à 400 (cf. plan d'aménagement), la ventilation réglementaire du parking pourrait correspondre à une ventilation de 0,1 vol/h appliquée 1h/j. Ce dernier niveau de ventilation est étudié dans cette analyse des incertitudes.

Tableau 19 : Résultats de l'analyse des incertitudes sur la ventilation-Futurs résidents

	QD	ERI
Ventilation de 0,5 vol/h	1,7E-02	2,2E-07
Ventilation de 0,1 vol/h	8,1E-02	1,1E-06
Ecart (%)	X 5	X 5
<i>Seuils de référence</i>	<i>1,0E+00</i>	<i>1,0E-05</i>

En considérant un taux de renouvellement d'air minimal réglementaire de 0,1 vol/h, les niveaux de risque sanitaire sont multipliés par 5. Les niveaux de risque sanitaire restent toutefois inférieurs aux seuils de référence quel que soit le niveau de ventilation étudié.

### 8.3.2.3. Le taux de fissuration de la dalle

Initialement, la fraction surfacique occupée par les ouvertures dans la dalle du sous-sol a été prise égale à 1,0E-05, correspondant à la valeur standard pour une dalle classique. Deux autres valeurs sont étudiées ici :

- Dalle en mauvais état : 1,0E-04 ;
- Dalle neuve ou avec traitement type résine : 1,0E-06.

Tableau 20 : Résultats de l'analyse des incertitudes sur la fissuration de la dalle

Fraction surfacique occupée par les ouvertures dans la dalle	QD	ERI
<b>Bâtiment R-2 pour des logements</b>		
<i>Fraction surfacique : 1,0E-05</i>	1,7E-02	2,2E-07
<b>Fraction surfacique : 1,0E-04</b>	<b>2,5E-02</b>	<b>3,6E-07</b>
<b>Fraction surfacique : 1,0E-06</b>	<b>5,8E-03</b>	<b>3,2E-08</b>
Ecart (%)	de +52 à -65 %	de +65 à -83 %
<i>Seuils de référence</i>	1,0E+00	1,0E-05

Le taux de fissuration de la dalle est un paramètre peu sensible. Les niveaux de risque résiduel sont inférieurs aux seuils de référence quel que soit la fissuration étudiée.

### 8.3.2.4. Bilan de l'analyse des incertitudes

**Cette analyse des incertitudes (qualitative et quantitative) met l'accent sur les éléments suivants :**

- une diminution significative des niveaux de risque :
  - en tenant compte d'une dalle avec revêtement de type résine ;
- une augmentation des niveaux de risque sans dépassement des seuils de référence :
  - en tenant compte d'une dalle en mauvaise état ;
  - en tenant compte d'un taux de ventilation de 0,1 vol/h ;
  - en tenant compte d'une exposition cumulée employés résident / résident puis résident en EPHAD.

## 9. Conclusions et recommandations

### 9.1. Conclusion

Dans le cadre du réaménagement d'un site actuellement occupé par des bâtiments de bureaux et d'activité par ENEDIS et GRDF au 10,16 et 18 route de Turin et 8bis avenue des Diabes Bleus à Nice (06), la société MOTU 1 a mandaté Antea Group pour la réalisation d'une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS), dans l'objectif d'étudier la compatibilité de l'aménagement envisagé (projet immobilier résidentiel, EPHAD, auditorium, bureaux) avec la contamination observée au droit du site.

Au regard des projets définis dans le cadre de cet aménagement, plusieurs scénarios d'exposition ont été étudiés, à savoir : l'exposition des employés et des résidents par inhalation des substances volatiles présentes dans les sols, la nappe, les gaz de nappe et les gaz du sol.

**Cette Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires indique que les niveaux de risque sont inférieurs aux seuils de risque recommandés dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (rédigée par le Ministère chargé de l'Environnement, avril 2017) ainsi qu'aux valeurs de gestion considérées.**

**L'état environnemental du site est donc compatible avec l'usage envisagé.**

Cette conclusion est établie sur la base des hypothèses suivantes :

- selon l'aménagement actuellement envisagé (en excluant tout contact direct avec les terres en place) ;
- sur la base d'un taux de ventilation standard de 0,5 vol/h dans le sous-sol des futurs bâtiments ;
- en considérant les concentrations résiduelles maximales en substances chimiques observées dans les sols, les gaz du sol et de la nappe et les eaux souterraines au droit des futurs bâtiments ;
- selon les hypothèses sécuritaires retenues ;
- selon la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E (anciennement M.E.D.A.D), V0 - février 2007 ;
- en l'état actuel des connaissances scientifiques sur les plans chimique, géologique et toxicologique (novembre 2022).

Il faut noter que tout changement concernant les caractéristiques environnementales du site (découverte d'une nouvelle source), le projet d'aménagement et les scénarios d'exposition pris en considération est susceptible de modifier les résultats de l'étude.

## 9.2. Synthèse des dispositions d'aménagement

Au regard des conclusions de cette Evaluation des Risques Sanitaires, il est recommandé au propriétaire du site de veiller à la mise en œuvre pérenne des dispositions d'aménagement suivantes.

Tableau 21 : Dispositions d'aménagement

ZONES CONCERNEES	DISPOSITIONS D'AMENAGEMENT
Bâtiment	<p>Respect des plans d'aménagement datés du 24/11/2022</p> <p>Les terres excavées issues des travaux de terrassements ne sont pas réutilisées. Elles seront évacuées hors site en filières agréées.</p> <p>Absence de voie préférentielle d'intrusion des gaz du sol et/ou de la nappe vers les sous-sols, en particulier via des événements ou dispositifs équivalents. Le cas échéant, la présence de tels dispositifs devra faire l'objet d'un calcul de risque spécifique.</p>
Espaces extérieurs	<p>Absence de contact direct avec les terres en place : les superficies non bâties sont recouvertes de remblais sains en surface<sup>20</sup> ou minéralisées (asphalte ou autre type de revêtement). Dans le cas contraire, le contact direct avec les terres à nu devra faire l'objet d'investigations complémentaires adaptées à cette voie et d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007.</p> <p>Absence de jardins potagers et d'arbres fruitiers. Dans le cas contraire, l'ingestion de fruits et légumes autoproduits au droit du site devra faire l'objet d'investigations complémentaires adaptées à cette voie et d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007. A défaut, toute culture végétale à visée alimentaire devra être réalisée dans des terres d'apport saines<sup>21</sup>.</p> <p>Absence de puits permettant l'utilisation des eaux souterraines de la nappe superficielle. Dans le cas contraire, les usages de l'eau issue de la nappe superficielle devront faire l'objet d'un nouveau calcul de risque conforme à la méthodologie décrite dans les outils de gestion des sites (potentiellement) pollués, rédigée par le M.E.D.D.E, V0 - février 2007.</p> <p>Passage de canalisations souterraines d'eau potable, notamment celles en polyéthylène, hors des zones d'impact résiduel. Dans le cas contraire, les canalisations souterraines situées au droit des zones d'impact résiduel devront circuler dans des remblais d'apport sains ou devront être de nature imperméable aux substances organiques (acier, fonte, matériau multicouches adapté).</p>

<sup>20</sup> Pour les espaces paysagers : a minima 30 cm (après compactage) de terre saine afin de garantir la pérennité du recouvrement.

<sup>21</sup> Pour les potagers : a minima 50 cm (après compactage) et jusqu'à 1 m (selon une approche sécuritaire) de terre végétale saine avec un grillage avertisseur et un système de séparation physique placés entre les terres d'apport et les terres en place. Pour les arbres fruitiers, une fosse de terres propres, dont le volume sera adapté en fonction du système racinaire de chaque espèce, devra être réalisée. Un géotextile limitant le développement racinaire des arbres peut être envisagé.

### **Observations sur l'utilisation du rapport**

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'ANTEA GROUP ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par ANTEA GROUP ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

ANTEA GROUP s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. ANTEA GROUP conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise ANTEA GROUP à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, ANTEA GROUP s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'ANTEA GROUP sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/annexes>



# ANNEXES

- Annexe I : Méthodologie Générale
- Annexe II : Textes réglementaires et bibliographiques
- Annexe III : Intrusion de substances organiques dans les réseaux souterrains d'eau potable
- Annexe IV : Synthèse des données physico-chimiques
- Annexe V : Présentation et paramétrage du logiciel Modul'ERS
- Annexe VI : Synthèse des données toxicologiques
- Annexe VII : Calculs de Risques Sanitaires

## Annexe I : Méthodologie Générale

## DESCRIPTIF TECHNIQUE DE LA METHODOLOGIE

L'évaluation des risques sanitaires se décompose en plusieurs étapes :

1. **Analyse des données** (compilation et synthèse des données issues des différentes études réalisées au droit du site),
2. **Evaluation des expositions** (définition des scénarii d'exposition, quantification des doses journalières d'exposition),
3. **Sélection des substances** (détermination des substances retenues pour l'étude et leurs concentrations associées dans les sols et/ou la nappe et/ou gaz du sol),
4. **Evaluation de la relation dose-réponse** : recueil des valeurs toxicologiques de référence disponibles au moment de la réalisation de l'étude, et choix argumenté d'une valeur toxicologique pour chaque substance retenue,
5. **Caractérisation des risques** (effets avec seuil et sans seuil),
6. **Interprétation des résultats** : hiérarchisation des risques, détermination des objectifs de réhabilitation (ou de dépollution) et/ou de servitudes à mettre en place -si nécessité-, évaluation des incertitudes,
7. Conclusion et recommandations.

### ① ANALYSE DES DONNEES

L'ensemble des données issues des investigations réalisées au droit du site est compilé et analysé.

### ② EVALUATION DES EXPOSITIONS

Cette étape se décompose en plusieurs phases :

- une identification des voies d'exposition ;
- une identification des récepteurs d'exposition (typologie de la population) ;
- une définition des scénarii d'exposition (typologie des modes d'exposition en fonction des activités) ;
- une quantification de l'exposition (doses journalières d'exposition : DJE ou, pour un gaz, concentration d'exposition : CE).

Il faut souligner ici que l'exposition des travailleurs lors de la phase chantier (travaux de terrassement/construction des bâtiments) ne fait pas l'objet de la présente étude ; leur sécurité devra néanmoins être assurée et toutes les précautions nécessaires devront être prises lors du maniement et de l'évacuation des sols. A ce titre, les mesures relatives à l'hygiène, la sécurité et la qualité sont traitées dans le Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé (PPS ou PPSPS) qui ont été remis lors de la phase d'investigations.

L'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires porte sur la santé humaine des cibles présentes sur le site. L'appréciation des risques touchant aux écosystèmes, aux végétaux d'ornement qui pourront être implantés au droit de la zone d'étude, à la ressource en eau ou aux biens matériels ne fait pas l'objet de la présente étude. De même, l'appréciation des risques liés à l'explosivité et aux nuisances olfactives ne fait pas l'objet de cette étude.

## Caractérisation du lieu d'exposition

Le lieu d'exposition est ici décrit afin d'établir les voies de transfert et les voies d'exposition potentielles, en fonction de l'aménagement envisagé au droit du site.

## Définition des scénarii d'exposition

Dans une étude de risque, **les voies d'exposition potentielles** sont les voies de contact direct (ingestion et inhalation de poussières telluriques) et indirectes (inhalation de substances chimiques volatiles, ingestion de végétaux, etc.). Le choix des voies retenues est fonction de l'aménagement prévu sur le site. Les cibles sont les futurs usagers du site.

Les scénarios d'exposition potentiels des populations comprennent les éléments suivants :

- une source ou un milieu contaminé par des polluants à risque ;
- un cheminement dans le milieu environnemental vers un point d'exposition ;
- un récepteur ;
- un mode d'exposition.

Le schéma conceptuel récapitule l'ensemble des voies de transfert et d'exposition pour les populations cibles.

## Calcul de la dose d'exposition

La **quantification des expositions** vise à calculer la dose journalière (ou concentration) d'exposition des cibles aux substances identifiées. Il est donc essentiel de déterminer :

- les paramètres d'exposition, à savoir la fréquence, la durée et l'intensité des contacts entre les polluants et les différents groupes de population susceptibles d'être exposés ;
- la concentration dans l'air ambiant intérieur et/ou extérieur à laquelle est exposé le futur usager du site à partir des milieux sources sols, eaux souterraines et/ou gaz du sol.

Les **paramètres d'exposition** reposent sur des facteurs définis dans la littérature, telle que l'*Exposure Factors Handbook* de l'US EPA (United States Environmental Protection Agency)<sup>22</sup>, et CIBLEX<sup>23</sup>, ainsi que sur l'étude des caractéristiques spécifiques du site (jugement d'expert).

Dans le cadre de l'EQRS, le transfert des polluants volatils présents dans la nappe, les sols et les gaz du sol vers l'air ambiant sera étudié à l'aide de logiciels de modélisation. **Les modèles d'exposition** utilisés permettent ainsi d'établir les concentrations en polluants dans l'air ambiant intérieur d'un bâtiment et/ou extérieur au droit du site.

**La dose d'exposition** permet la quantification de l'exposition journalière à un polluant, qui est présent dans le milieu d'exposition. La dose journalière d'exposition (DJE) est définie comme un taux par unité

---

<sup>22</sup> US EPA, Exposure Factors Handbook. Office of Research and Development. EPA/600/R-09/052F, September 2011.

<sup>23</sup> IRSN, ADEME, CIBLEX : banque de donnée de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué, version 0, Juin 2003

de poids (mg/kg.j) ou comme une concentration par unité volumique (concentration d'exposition en mg/m<sup>3</sup>).

### ③ SELECTION DES SUBSTANCES

Les substances sélectionnées pour l'étude sont celles connues pour être toxiques pour l'homme et pour lesquelles il existe des valeurs toxicologiques de référence accessibles et fiables. Les calculs de risque porteront sur ces substances, et éventuellement sur leurs produits de dégradation.

Les substances retenues pour l'évaluation quantitative des risques sanitaires répondent aux critères suivants :

- toute substance dont les données disponibles (notamment physico-chimiques et toxicologiques<sup>24</sup>) sont d'une qualité suffisante pour être exploitées en analyse des risques. Concernant les données physico-chimiques, les sources bibliographiques retenues sont les suivantes, par ordre de priorité :

Hiérarchisation	Références bibliographiques
1	Fiches de données toxicologiques de l'INERIS
2	United States Environmental Protection Agency (US-EPA) : US EPA Soil Screening Guidance, June 1996; US-EPA Screening level ecological assesement protocol ; Appendix C : Media-to-receptors BCF values, 1999. US-EPA Screening level ecological assesement protocol ; Appendix C : Media-to-receptors BCF values, 1999.
3	Hazardous Substances Data Bank (HSDB)
4	Handbook <i>Soil Vapor Extraction Technology</i> de T., A. Pedresen et J., T. Curtis (1991). (constante de Henry à 10°C) <i>Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals. Third Edition, Verschueren (1996)</i> ;
5	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR);
6	Human Health Risk Assessment Protocol (HHRAP), September 2005.
7	Volumes 3 et 4 du Total Petroleum Hydrocarbons Working Group.
8	Base de données du logiciel Csoil
9	Base de données CALTOX
10	Base de données du logiciel BP Risc
11	Base de données du logiciel RBCA (fichier)
12	Base de données du logiciel HESP
13	Superfund for Dermal Risk Assessment, 2001
14	US-EPA (United States Environmental Protection Agency) dans le document Risk Assessment, Technical Guidance Manual
15	Base de données RAIS (Risk Assessment Information System) (uniquement pour les données manquantes)

- toute substance dont la concentration est supérieure à la limite de quantification dans les sols, les eaux souterraines et/ou les gaz du sol ;
- pour l'inhalation de substances volatiles, dans une démarche sécuritaire, toute substance présentant des données physico-chimiques relatives à sa volatilité (pression de vapeur,

<sup>24</sup> Sources des paramètres toxicologiques retenus (selon la hiérarchisation de la circulaire n°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 Octobre 2014) : ANSES, INERIS ; US EPA , ATSDR, OMS ; RIVM, Health Canada, OEHHA, EFSA.

constante de Henry). Ainsi, l'ensemble des HAP et des PCB sont notamment considérés comme volatils. En revanche, parmi les ETM, seul le mercure est considéré comme volatil ;

- pour l'ingestion et l'inhalation de poussières, tout ETM dont la concentration est supérieure au bruit de fond pédogéochimique local, régional et/ou national<sup>25</sup>.

#### ④ EVALUATION DE LA RELATION DOSE-REPOSE

##### Objectifs

L'objectif de l'évaluation de la relation dose-réponse est d'identifier les effets indésirables qu'une substance est capable de provoquer chez l'homme (identification du potentiel dangereux des substances) et de définir, quand cela est possible, une relation quantitative entre la dose et l'augmentation de la probabilité d'occurrence et/ou de la gravité des effets néfastes.

Les valeurs toxicologiques de référence, utilisées pour estimer l'incidence ou le potentiel des effets néfastes sur l'homme, sont dérivées de cette relation dose-réponse.

Il existe deux grandes catégories de toxiques, les substances à effet sans seuil (telles que les substances cancérigènes) et les substances à effet à seuil.

##### Caractérisation des substances à effets sans seuil

Les composés cancérigènes génotoxiques sont des substances considérées sans valeur seuil. Ainsi, si le risque zéro est associé à une dose d'exposition égale à zéro, tous les autres niveaux d'exposition présentent un risque ; les substances cancérigènes génotoxiques sont aussi appelées substances à effet sans seuil. La réponse théorique à une dose d'exposition nécessite l'usage de modèle mathématique.

L'ERU (ou Excès de Risque Unitaire) et le CR (Cancer Risk) correspond à la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu contracte un cancer s'il est exposé pendant sa vie entière à une unité de dose de la substance cancérigène. Il s'agit généralement de la limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95% de la pente de la droite («slope factor») qui relie la probabilité de réponse à la dose toxique. Cet indice est l'inverse d'une dose et s'exprime en  $(\text{mg}/\text{kg}/\text{j})^{-1}$ .

Les différentes VTR rencontrées sont :

- pour la voie orale, l'Excès de Risque Unitaire (ERU) ou Sfo (oral Slope Factor) exprimé en  $(\text{mg}/\text{kg}/\text{j})^{-1}$  et le Drinking Water Unit Risk élaborés par l'US-EPA (exprimé en  $(\text{mg}/\text{kg}/\text{j})^{-1}$ ) ;
- pour la voie respiratoire : l'Inhalation Unit Risk (IUR) élaboré par l'US-EPA, exprimé en  $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$  ;
- quelle que soit la voie d'exposition : l'excess lifetime Cancer Risk ou CR élaboré par le RIVM et la dose ou concentration tumorigène (TD05 ou TC05) élaborée par Health Canada.

---

<sup>25</sup> Sources des données sur le fonds pédogéochimique régional et/ou national : INRA/BRGM (Fond géochimique naturel, Etat des connaissances à l'échelle nationale, juin 2000), Atlas Géochimique Européen (FOREGS).

La classification de l'US-EPA définit les classes suivantes :

*Classification US EPA :*

- Groupe A : Substance cancérigène pour l'homme.
- Groupe B1 : Substance probablement cancérigène pour l'homme avec des données disponibles limitées chez l'homme.
- Groupe B2 : Substance probablement cancérigène chez l'homme mais il existe des preuves suffisantes chez l'animal et des preuves non adéquates ou pas de preuves chez l'homme.
- Groupe C : Cancérigène possible pour l'homme.
- Groupe D : Substance non classifiable quant à la cancérogénicité pour l'homme.
- Groupe E : Substance pour laquelle il existe des preuves de non-cancérogénicité pour l'homme.

D'autres classifications existent, notamment celle du Centre International de Recherche sur le Cancer de l'Organisation Mondiale de la Santé (CIRC/IARC) décrite ci-dessous :

*Classification du CIRC / IARC :*

- Groupe 1 : L'agent (le mélange) est cancérigène pour l'homme.
- Groupe 2A : L'agent (le mélange) est probablement cancérigène pour l'homme.
- Groupe 2B : L'agent (le mélange) est peut-être cancérigène pour l'homme.
- Groupe 3 : L'agent (le mélange) est inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.
- Groupe 4 : L'agent (le mélange) n'est probablement pas cancérigène pour l'homme.

L'Union Européenne a également émis une classification réglementaire (applicable en France) quant aux effets cancérigènes, mutagènes, ou toxiques pour la reproduction des produits chimiques<sup>26</sup>. La classification des substances cancérigènes est définie ci-dessous :

- Catégorie 1 : Substances que l'on sait être cancérigènes pour l'homme.
- Catégorie 2 : Substances devant être assimilées à des substances cancérigènes pour l'homme.
- Catégorie 3 : Substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérigènes possible mais pour lesquelles les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante (preuves insuffisantes).
- Aucune classification.

---

<sup>26</sup> INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) (2002). Produits chimiques cancérogènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction - classification réglementaire. Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail. N° 187, 2<sup>ème</sup> trimestre 2002. ND 2168-187-02.

## Caractérisation des substances à effets à seuil

Il est reconnu que les effets biologiques des substances chimiques non cancérogènes ou de certaines substances cancérogènes non génotoxiques apparaissent à partir d'un certain seuil, d'où leur appellation, substances à effet à seuil. En fait, des mécanismes physiologiques réduisent les effets néfastes par des moyens pharmacocinétiques tels que l'absorption, la distribution, l'excrétion, et le métabolisme. Ainsi, certains niveaux d'exposition engendrent des effets qui peuvent être tolérés par un récepteur sans développer d'effets néfastes. La dose seuil pour un composé est estimée habituellement à partir d'une dose n'engendrant pas d'effet néfaste (NOAEL ou No-Observed-Adverse-Effect-Level) ou de la dose la plus basse engendrant un effet néfaste (LOAEL ou Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level). Ces valeurs sont déterminées à partir d'études sur les animaux, ou à partir de données humaines lorsqu'elles sont disponibles.

Différentes valeurs de référence sont disponibles et varient suivant la voie d'exposition (orale ou inhalation), l'effet critique observé et la durée d'exposition (exposition chronique, subchronique ou aiguë). Dans l'évaluation des risques sanitaires, les expositions sont essentiellement des expositions de type chronique.

Une dose chronique de référence ou *Reference dose* (RfD) est définie comme étant l'estimation de la quantité de produit à laquelle un individu peut théoriquement être exposé sans constat d'effet nuisible, sur une durée déterminée. Pour une exposition par voie orale, la RfD est exprimée en masse de substance par kilogrammes de poids corporel et par jour (mg/kg/j). Pour l'inhalation, la RfD est généralement exprimée en masse de substance par mètre cube d'air ambiant (en mg/m<sup>3</sup>) et est appelée RfC ou *Reference Concentration*.

Parmi les doses de références publiées par les divers organismes nationaux et internationaux, les plus utilisées sont les *Reference Doses (RfD)* et les *Reference Concentrations (RfC)* élaborées par l'US EPA [United States Environmental Protection Agency], les *Minimal Risk Levels (MRL)* élaborées par l'ATSDR [Agency for Toxic Substances and Disease Registry, USA], et les *Acceptable Daily Intake (ADI)* ou *Dose Journalière Admissible (DJA)* et les *Acceptable Concentrations in Air (ADI)* ou *Concentration Admissible dans l'Air (CAA)*, élaborées par l'OMS [Organisation Mondiale pour la Santé].

## Choix des Valeurs Toxicologiques de Référence

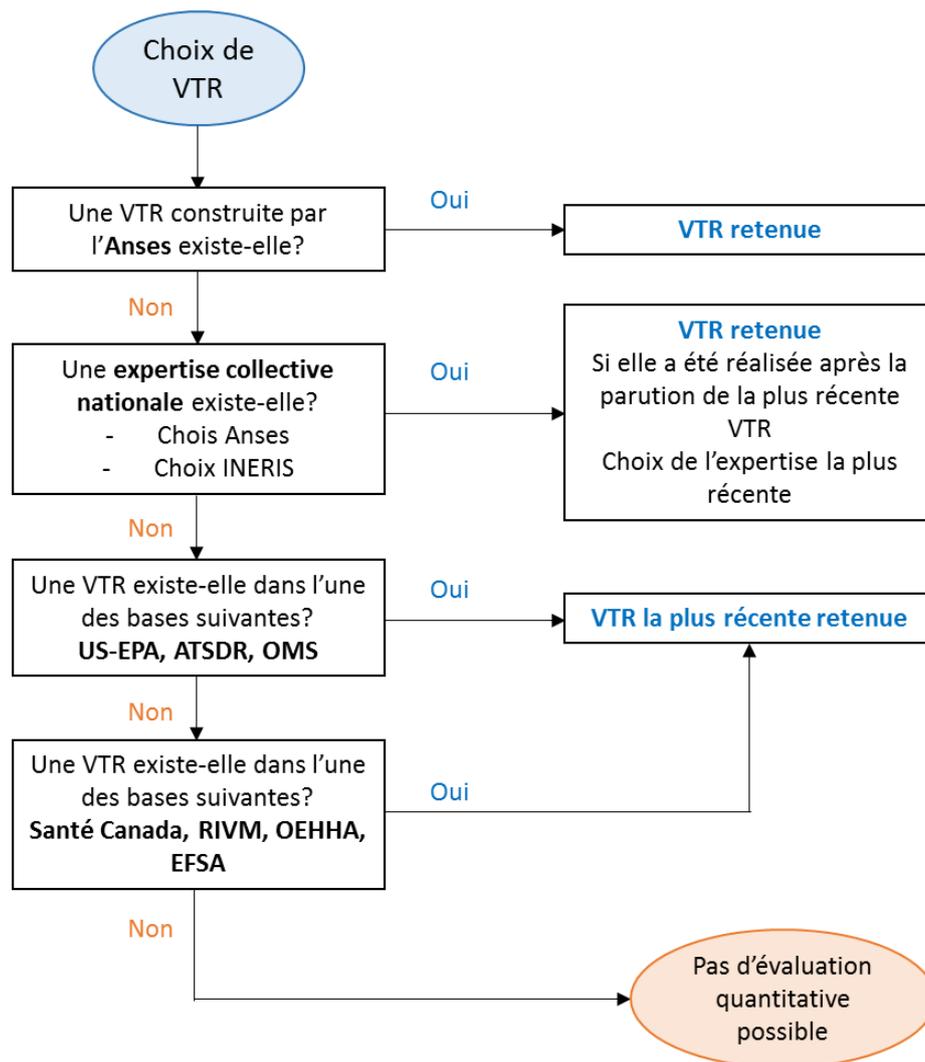
La sélection des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) est effectuée conformément aux prescriptions établies par la Circulaire n°DGS/EA1/DGPR/2014/307 en date du 31 octobre 2014, cosignée par la DGS et la DGPR, relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des VTR pour mener les évaluations de risque sanitaire dans le cadre des études d'impact et de la gestion de sites et sols pollués.

Ainsi, la sélection de la VTR est effectuée en respectant :

- la hiérarchisation suivante :
  - prise en compte en premier lieu des VTR construites par l'ANSES,
  - à défaut, si une expertise collective nationale a été menée (sélection ANSES et/ou INERIS) *a posteriori* des dates d'élaboration de l'ensemble des VTR disponibles, la VTR sélectionnée lors de cette expertise est retenue ;
  - à défaut, la VTR la plus récente dans les bases de données de l'US EPA, l'ATSDR et l'OMS est sélectionnée dans un premier temps,
  - en l'absence de VTR dans les bases précitées, c'est la VTR la plus récente dans les bases de données de Santé Canada, RIVM, OEHA ou EFSA qui est prise en compte.

- et les critères suivants :
  - les VTR provisoires ne doivent pas être retenues,
  - les VTR sélectionnées doivent correspondre à la durée et à la voie d'exposition auxquelles la population est confrontée ;
  - aucune dérivation de voie à voie n'est réalisée par Antea Group ;
  - si des VTR ont été élaborées *a posteriori* d'une expertise collective nationale (ANSES, INERIS), les recommandations de cette expertise sont suivies et mises en perspective des nouvelles VTR disponibles.

La méthodologie adoptée est schématisée ci-dessous.



## ⑤ RESULTATS : CARACTERISATION DES RISQUES

La caractérisation du risque est l'étape finale du calcul des risques sanitaires. Les informations issues de l'évaluation de l'exposition des cibles et de l'évaluation de la toxicité des substances sont synthétisées et intégrées sous la forme d'une expression qualitative et quantitative du risque. Ainsi, la caractérisation du risque consiste à mettre en relation les valeurs toxicologiques de référence retenues avec les doses d'exposition.

Il faut souligner ici que le cas le cas d'un individu adulte qui aurait séjourné sur le site pendant son enfance est systématiquement étudié, lorsque la présence d'enfants au droit du site est envisageable.

### Calcul de risque pour les effets à seuil

Les effets potentiels des substances non cancérigènes ou cancérigènes non génotoxiques sont estimés en comparant la dose calculée aux critères de toxicité. Pour ce faire, le quotient de danger de la substance  $i$  ( $QD_i$ ) est calculé comme suit :

$$QD_i = DJE_i \text{ (ou } CE_i) / RfD_i \text{ (ou } RfC_i)$$

Avec :

DJE : dose journalière d'exposition (ou CE concentration d'exposition)

RfD : dose de référence (en français il s'agit d'une dose journalière tolérable)

RfC : concentration de référence

A noter que le quotient de danger pour le scénario « enfant grandissant » correspond au quotient de danger maximal entre les phases d'exposition « enfant » et « adulte ».

Le Ministère en charge de l'Environnement recommande de considérer comme acceptable un indice de risque cumulé inférieur à 1. Un quotient de danger de 0,01 n'implique pas qu'il existe une chance sur cent de développer un effet néfaste, mais indique que la dose d'exposition estimée est cent fois plus faible que la dose de référence.

### Calcul de risque pour les effets sans seuil

L'excès de risque individuel théorique de développer un cancer du fait d'une exposition à la substance  $i$  est estimé par le produit de l'excès de risque unitaire de la substance  $i$  et la dose journalière d'exposition estimée pour cette substance et cette voie d'exposition, soit :

$$ERI_i = DJE_i \text{ (ou } CE_i) \times ERU_i$$

Avec :

$ERI_i$  = Excès de Risque Individuel de cancer (pour la substance  $i$ )

$DJE_i$  = Dose journalière d'exposition moyennée sur une vie entière (pour la substance  $i$ )

$ERU_i$  = Excès de Risque Unitaire de la substance  $i$

A noter que l'excès de risque pour le scénario « enfant grandissant » correspond à l'excès de risque moyen (pondéré) calculé sur la durée totale d'exposition, incluant une phase « enfant » et une phase « adulte ».

Le Ministère en charge de l'Environnement recommande de considérer comme acceptable un excès de risque cumulé inférieur à  $10^{-5}$ . Les sites pour lesquels le niveau de risque est supérieur à  $10^{-5}$  devront faire l'objet de travaux de réhabilitation.

### Règles de cumul des effets entre voies d'exposition et substances

Les risques sont d'abord calculés pour chaque substance. L'exposition à plusieurs substances peut induire l'additivité, la synergie (amplification des effets) ou l'antagonisme (annulation des effets). En l'absence de connaissances sur la synergie entre les substances, il a été considéré, en première approche, l'additivité des risques liés à l'exposition à plusieurs substances :

- pour les effets à seuil (effets non cancérogènes et cancérogènes non génotoxiques), l'additivité des indices de risque entre voies d'exposition et substances est retenue comme hypothèse de départ, quel que soit les effets sanitaires associés à chacune des substances considérées ;
- pour les effets sans seuil (cancérogènes génotoxiques), le cumul des ERI correspond à l'hypothèse d'une indépendance des effets cancérogènes des différentes substances.

En seconde approche, tout dépassement du seuil de référence de 1 par la somme des indices de risque, qui serait imputable à la sommation elle-même, peut conduire à un approfondissement de l'étape de quantification sur la base des règles de cumul énoncées ci-avant. La sommation est alors conditionnée par la présence, entre les différentes voies d'exposition et les différentes substances prises en compte, d'effets sanitaires communs (principaux et secondaires) parmi ceux établis dans la bibliographie spécialisée et à partir desquels les VTR ont été élaborées.

A noter que les niveaux de risque sont calculés par milieu source. Puis, les niveaux de risque associés aux substances présentes dans les sols et les eaux souterraines sont cumulés en vue d'établir un niveau de risque global. Néanmoins, pour une substance donnée, lorsque des mesures dans les gaz du sol ont été réalisées, ce milieu est privilégié si celui-ci est jugé représentatif des concentrations maximales observées dans les sols et/ou les eaux souterraines.

## ⑥ INTERPRETATION DES RESULTATS

### **Hiérarchisation des risques**

Il s'agit d'établir le scénario d'exposition générant les risques sanitaires les plus élevés, en termes de milieu et de substances (source), de voie d'exposition (transfert), et de cible.

### **Evaluation des incertitudes**

De nombreuses incertitudes sont inhérentes à une étude quantitative des risques. L'utilisation de données propres au site réduit mais n'élimine pas toutes ces incertitudes. Une analyse attentive des incertitudes constitue une phase essentielle de la démarche d'évaluation des risques. Elle doit être prise en compte dans l'évaluation des conclusions de l'étude car elle permet de donner les éléments pour valider les conclusions, en identifiant les incertitudes les plus significatives pouvant interférer dans les résultats de l'étude.

Ainsi, les incertitudes liées aux différentes étapes de la démarche, et qui auront été intégrées dans les mesures de gestion proposées, sont signalées. Les thématiques sur lesquelles portent ces incertitudes sont rappelées (toxicologie, paramètres d'exposition, transfert...).

Dans un second temps, une analyse des incertitudes est menée. Cette analyse des incertitudes consiste à faire varier la valeur initialement établie sur certains paramètres du modèle d'exposition, en vue d'évaluer le degré de sensibilité de ce paramètre dans le calcul de risque.

### **Détermination des mesures compensatoires**

Si les niveaux de risques sanitaires modélisés sont supérieurs aux niveaux de référence établis, les mesures compensatoires envisageables seraient alors présentées, en tenant compte des différentes cibles et des différents scénarii étudiés. Le rapport d'étude fera alors clairement apparaître les éventuelles mesures constructives, servitudes, restrictions d'usage, voire mesures de surveillance qui en résultent.

### **⑦ CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

Si l'étude met en évidence un risque sanitaire (détermination de niveaux de risque non acceptables), le ou les points à l'origine du risque seraient mentionnés. Selon la localisation des zones à risque, des recommandations pourraient alors être proposées au vu des différents projets d'aménagement.

Pour ce faire, la restitution des résultats doit comporter toutes les hypothèses qui conditionneraient l'acceptabilité du projet. Le rapport doit notamment identifier les éléments suivants :

- les concentrations des substances étudiées dans les milieux d'exposition résiduelle (ou les milieux sources résiduels en l'absence d'accès direct aux milieux d'exposition) ;
- les contraintes constructives passives ou actives comme le taux de ventilation, le type de fondation (radier, vide sanitaire,...) d'un bâtiment, le type d'aménagement (type de remblais en cas d'excavation, type de recouvrement des zones non bâties,...) ;
- les usages (présence/absence de puits privés,...).

## **Annexe II : Textes réglementaires et bibliographiques**

## TEXTES REGLEMENTAIRES ET BIBLIOGRAPHIQUES

Les principaux textes réglementaires et bibliographiques qui fondent les évaluations de risques sanitaires sont les suivants :

- ADEME, IRSN, CIBLEX Banque de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué, Version 0, Juin 2003.
- ADEME, Contamination des sols - Transfert des sols vers les animaux, Décembre 2008.
- ADEME, Contamination des sols - Transfert des sols vers les plantes, Décembre 2008.
- ADEME, Base de données des teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères (BAPPET) : présentation et notice d'utilisation, novembre 2012 – Base de données BAPPET, mise à jour en 2014.
- ADEME, Base de données sur la contamination des plantes potagères par les molécules organiques polluantes, septembre 2015.
- ANSES, <https://www.anses.fr/>
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Etats-Unis), Minimal Risks Levels (MRLs) for Hazardous Substances : <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/mrllist.asp>.
- BRGM, Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes ; Éditions BRGM - Réf. N°DOC 300 - 2008.
- BRGM, Fond géochimique naturel, Etat des connaissances à l'échelle nationale, BRGM/RP-50158-FR - Juin 2000.
- Circulaire du 08/02/2007 relative aux Installations Classées. Prévention de la pollution des sols. Gestion des sols pollués.
- Circulaire du 08/02/2007 relative à l'implantation sur des sols pollués d'établissements accueillant des populations sensibles.
- Code de l'Environnement, notamment ses articles L. 511-1, L. 512-6-1 et L. 512-39-1 à L. 512-39-4.
- Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène du 4 décembre 2011.
- Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public.
- Décret n° 2015-1926 du 30 décembre 2015 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public.
- Décret n°77-1133 du 21/09/1977 pour application de la loi du 19/07/1976 relative aux ICPE, modifié par le décret n°2005-1170 du 13/09/2005 et le décret 2006-567 du 17/05/2006.
- Groundwater Services Inc., ASTM E2081-00 (reapproved in 2004) (American Society for Testing and Materials), RBCA 1.3a (Risk Based Corrective Action) Tool Kit for Chemical Releases, 2000.
- HCSP : Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos – Le benzène, rapport du 16/06/2010.
- HCSP : Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos – Le tétrachloroéthylène, rapport du 16/06/2010.
- HCSP : Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos – Le naphthalène, rapport du 05/01/2012.
- HCSP : Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos – Le trichloroéthylène, rapport du 09/07/2020.

- Health Canada, L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie II : Valeurs toxicologiques de référence (VTR) de Santé Canada et paramètres de substances chimiques sélectionnées, version 2.0, Septembre 2010.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), Classification du CIRC/IARC. Disponible sur le site internet de l'IARC : <http://monographs.iarc.fr/htdig/search.html>.
- INERIS, Méthodologie d'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires relatifs aux substances chimiques, Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration, convention 03 75 C 0093 et 06 75 C 0071 ADEME / SYPREA / SPDE / INERIS, version 1 du 15 octobre 2007, 40 pages.
- INERIS, Portail Substances Chimiques. Disponibles sur le site internet de l'INERIS : <http://www.ineris.fr/substances/fr/>.
- INERIS, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs), Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérogènes et non cancérogènes ; Rapport final, Décembre 2003.
- INERIS, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs), Choix de valeurs toxicologiques de référence, Rapport DRC-20-180728-00256A, Janvier 2020.
- INERIS, Inventaire des données de bruit de fond dans l'air ambiant, l'air intérieur, les eaux de surface, et les produits destinés à l'alimentation humaine en France, Rapport d'étude n°DRC-08-94882-15772A, 10 avril 2009.
- INERIS, Rapport d'étude n°DRC-08-94882-16675C, « Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle », 1er août 2010.
- INERIS, Rapport d'étude n°DRC-14-1419688-00696A, Guide de l'utilisateur Modul'ERS, Mars 2014.
- INERIS, Synthèse des Valeurs Réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, l'air et les denrées alimentaires en France au 30 juin 2020, Rapport d'étude n° INERIS-20-200358-2190502-v 3.0, Mai 2021.
- INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) (2020), Liste des substances chimiques classées CMR – Classification réglementaire des cancérogènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction - fichier excel disponible sur le site internet de l'INRS.
- Loi n° 76-663 du 19/07/1976 relative aux ICPE.
- Note d'information N° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués.
- Note du Ministère de l'Environnement N° DEVP1708766N du 19 avril 2017 relative aux sites et sols pollués - Mise à jour des textes méthodologiques de gestion des sites et sols pollués de 2007 et Méthodologie Nationale de gestion des sites et sols pollués d'avril 2017 associée.
- OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment), Air Toxics Hot Spots Program Risk Assessment Guidelines, Part II, Technical Support Document for Describing Available Cancer Potency Factors, July 2009, updated 2011.
- OMS (Organisation Mondiale pour la Santé), WHO Air Quality Guidelines; 2nd Edition Regional Office for Europe, 2000.
- OMS (Organisation Mondiale pour la Santé), WHO Drinking Water Quality Guidelines; 4th Edition, incorporating the 1st addendum, 2017.
- OQAI, Campagne Nationale Logements, Etat de la Qualité de l'air dans les logements français, Rapport final, Mai 2007.
- RIVM (Institut National de Santé Publique et d'Environnement, Pays-Bas), Risc-Human 3.1, Van Hall Instituut, 2000.

- RIVM (Institut National de Santé Publique et d'Environnement, Pays-Bas), Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels, March 2001, updated 2009.
- Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group, Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach, Volume 1 à 5, May 1998 - June 1999.
- US EPA, Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I - Human Health Evaluation Manual (Part A, Baseline Risk Assessment), Interim Final, December, 1989.
- US EPA, User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into buildings, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., February 22, 2004.
- US EPA, Exposure Factors Handbook. Office of Research and Development. EPA/600/R-09/052F, September 2011.

## **Annexe III : Intrusion de substances organiques dans les réseaux souterrains d'eau potable**

## PERMEATION DES SUBSTANCES ORGANIQUES VOLATILES DANS LES RESEAUX D'EAU POTABLE<sup>27</sup>

Les canalisations souterraines d'eau potable peuvent être sujettes à la perméation (phénomène qui consiste en un transfert des polluants volatils contenus dans les sols et les gaz de sol vers l'intérieur des canalisations). La perméation est généralement associée aux canalisations souterraines non métalliques (de type PE – Polyéthylène, ou PB – Polybutylène), et aux substances organiques.

En France, aucune valeur limite dans les sols n'est définie pour l'installation d'une canalisation souterraine d'eau potable. Cependant, des valeurs limites, au-dessus desquelles il est recommandé d'apporter une attention particulière à la sélection du matériau constituant la canalisation, existent au Royaume-Uni et aux Pays-Bas. Celles relatives aux polluants identifiés sur le site sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Valeurs limites dans les sols – Royaume Uni

Substance	Valeur limite dans les sols (mg/kg)
HCT	50
HAP	50
1,3,5 Triméthylbenzène	25
Benzène	0,5
Toluène	50
Xylènes	2,5

Les valeurs limites existant aux Pays-Bas font une distinction entre les canalisations en PE et les canalisations en PVC. Ces dernières sont présentées dans le tableau ci-après.

---

<sup>27</sup> Recommandations issues du guide BRGM/RP-63675-FR d'Août 2014, « Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des sites et sols pollués ».

Tableau 2 : Valeurs limites dans les sols – Pays Bas

Substance	Valeur limite dans les sols Tuyau en PE (mg/kg)	Valeur limite dans les sols Tuyau en PVC (mg/kg)
1,1,1-trichloroéthane	0,5	30 000
1,3,5 Triméthylbenzène	0,1	3 000
Benzène	0,1	2 000
Toluène	0,25	2 000
Ethylbenzène	0,5	2 000
Xylènes	0,1	3 000

*Nota* : il existe également des valeurs dans les eaux environnant les canalisations souterraines.

Si le risque sanitaire, associé à une éventuelle perméation de substances chimiques présentes dans les sols à travers les parois des canalisations souterraines, ne peut être écarté, des recommandations seront émises afin de s'assurer de la maîtrise du risque associé à l'ingestion d'eau du robinet.

## **Annexe IV : Synthèse des données physico-chimiques**

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Acénaphène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000421	m <sup>2</sup> / s
Acénaphène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,69E-10	m <sup>2</sup> / s
Acénaphène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	15,4686909	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Acénaphène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	4578	l/kg
Acénaphène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,92	cm <sup>3</sup> /g
Acénaphène	M	Masse molaire	154,21	g/mol
Acénaphène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,356	Pa
Acénaphène	S	Solubilité	3700	mg/m <sup>3</sup>
Acénaphène	Tm	Température de fusion	368,15	K
Acénaphylène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000044	m <sup>2</sup> / s
Acénaphylène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,53E-10	m <sup>2</sup> / s
Acénaphylène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	9,667931813	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Acénaphylène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	2770	l/kg
Acénaphylène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4	cm <sup>3</sup> /g
Acénaphylène	M	Masse molaire	152,19	g/mol
Acénaphylène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,12159	Pa
Acénaphylène	S	Solubilité	16100	mg/m <sup>3</sup>
Acénaphylène	Tm	Température de fusion	362,55	K
Aliphatique C>05 C06	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>05 C06	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>05 C06	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	81805,57688	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Aliphatique C>05 C06	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	794,3282	l/kg
Aliphatique C>05 C06	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,3	cm <sup>3</sup> /g
Aliphatique C>05 C06	M	Masse molaire	81	g/mol
Aliphatique C>05 C06	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	35463,75	Pa
Aliphatique C>05 C06	S	Solubilité	36000	mg/m <sup>3</sup>
Aliphatique C>05 C06	Tm	Température de fusion	143,15	K
Aliphatique C>06 C08	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>06 C08	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>06 C08	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	123947,8438	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Aliphatique C>06 C08	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	3981,072	l/kg
Aliphatique C>06 C08	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4	cm <sup>3</sup> /g
Aliphatique C>06 C08	M	Masse molaire	100	g/mol
Aliphatique C>06 C08	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	6383,475	Pa
Aliphatique C>06 C08	S	Solubilité	5400	mg/m <sup>3</sup>
Aliphatique C>06 C08	Tm	Température de fusion	182,601	K
Aliphatique C>08 C10	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>08 C10	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>08 C10	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	198316,55	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Aliphatique C>08 C10	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	31622,78	l/kg
Aliphatique C>08 C10	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4,8	cm <sup>3</sup> /g
Aliphatique C>08 C10	M	Masse molaire	130	g/mol
Aliphatique C>08 C10	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	638,3475	Pa
Aliphatique C>08 C10	S	Solubilité	430	mg/m <sup>3</sup>
Aliphatique C>08 C10	Tm	Température de fusion	219,68	K
Aliphatique C>10 C12	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>10 C12	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> / s
Aliphatique C>10 C12	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	297474,825	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Aliphatique C>10 C12	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	251188,6	l/kg
Aliphatique C>10 C12	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	5,6	cm <sup>3</sup> /g
Aliphatique C>10 C12	M	Masse molaire	160	g/mol
Aliphatique C>10 C12	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	63,83475	Pa

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Aliphatique C>10 C12	S	Solubilité	34	mg/m3
Aliphatique C>10 C12	Tm	Température de fusion	247,55	K
Aliphatique C>12 C16	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m2 /s
Aliphatique C>12 C16	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m2 /s
Aliphatique C>12 C16	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1289057,575	Pa.m3/mol
Aliphatique C>12 C16	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	5011873	l/kg
Aliphatique C>12 C16	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	6,8	cm3/g
Aliphatique C>12 C16	M	Masse molaire	200	g/mol
Aliphatique C>12 C16	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	4,8636	Pa
Aliphatique C>12 C16	S	Solubilité	0,7	mg/m3
Aliphatique C>12 C16	Tm	Température de fusion	267,85	K
Anthracène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000428	m2 /s
Anthracène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	6,72E-10	m2 /s
Anthracène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	5,304967713	Pa.m3/mol
Anthracène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	25700	l/kg
Anthracène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4,45	cm3/g
Anthracène	M	Masse molaire	178,2292	g/mol
Anthracène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,11	Pa
Anthracène	S	Solubilité	1290	mg/m3
Anthracène	Tm	Température de fusion	491,15	K
Aroclor 1254	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000156	m2 /s
Aroclor 1254	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	5E-10	m2 /s
Aroclor 1254	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	19,21191578	Pa.m3/mol
Aroclor 1254	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	431308	l/kg
Aroclor 1254	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	6,03	cm3/g
Aroclor 1254	M	Masse molaire	327,5	g/mol
Aroclor 1254	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,01	Pa
Aroclor 1254	S	Solubilité	12	mg/m3
Aroclor 1254	Tm	Température de fusion	331	K
Aromatique C>08 C10	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m2 /s
Aromatique C>08 C10	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m2 /s
Aromatique C>08 C10	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1189,8993	Pa.m3/mol
Aromatique C>08 C10	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	1585	l/kg
Aromatique C>08 C10	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,1	cm3/g
Aromatique C>08 C10	M	Masse molaire	120	g/mol
Aromatique C>08 C10	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	638,3475	Pa
Aromatique C>08 C10	S	Solubilité	650	mg/m3
Aromatique C>08 C10	Tm	Température de fusion	178,2	K
Aromatique C>10 C12	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m2 /s
Aromatique C>10 C12	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m2 /s
Aromatique C>10 C12	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	347,0539625	Pa.m3/mol
Aromatique C>10 C12	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	2511	l/kg
Aromatique C>10 C12	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,5	cm3/g
Aromatique C>10 C12	M	Masse molaire	130	g/mol
Aromatique C>10 C12	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	63,83475	Pa
Aromatique C>10 C12	S	Solubilité	25000	mg/m3
Aromatique C>10 C12	Tm	Température de fusion	353,15	K
Aromatique C>12 C16	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00001	m2 /s
Aromatique C>12 C16	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m2 /s
Aromatique C>12 C16	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	131,3847144	Pa.m3/mol
Aromatique C>12 C16	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	5012	l/kg
Aromatique C>12 C16	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,9	cm3/g

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Aromatique C>12 C16	M	Masse molaire	150	g/mol
Aromatique C>12 C16	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	4,8636	Pa
Aromatique C>12 C16	S	Solubilité	5800	mg/m3
Aromatique C>12 C16	Tm	Température de fusion	362,55	K
Benzène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000895	m2 /s
Benzène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	1,03E-09	m2 /s
Benzène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	562	Pa.m3/mol
Benzène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	39,5	l/kg
Benzène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	2,13	cm3/g
Benzène	M	Masse molaire	78,06	g/mol
Benzène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	12637	Pa
Benzène	S	Solubilité	1830000	mg/m3
Chloroforme (Trichlorométhane)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000104	m2 /s
Chloroforme (Trichlorométhane)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m2 /s
Chloroforme (Trichlorométhane)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	183,4428088	Pa.m3/mol
Chloroforme (Trichlorométhane)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	60	l/kg
Chloroforme (Trichlorométhane)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	1,97	cm3/g
Chloroforme (Trichlorométhane)	M	Masse molaire	119,38	g/mol
Chloroforme (Trichlorométhane)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	26264	Pa
Chloroforme (Trichlorométhane)	S	Solubilité	8200000	mg/m3
Chloroforme (Trichlorométhane)	Tm	Température de fusion	209,65	K
Cumène (Isopropylbenzène)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000065	m2 /s
Cumène (Isopropylbenzène)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,1E-10	m2 /s
Cumène (Isopropylbenzène)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1467,54247	Pa.m3/mol
Cumène (Isopropylbenzène)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	1380	l/kg
Cumène (Isopropylbenzène)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,66	cm3/g
Cumène (Isopropylbenzène)	M	Masse molaire	120,19	g/mol
Cumène (Isopropylbenzène)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	599,950656	Pa
Cumène (Isopropylbenzène)	S	Solubilité	50000	mg/m3
Cumène (Isopropylbenzène)	Tm	Température de fusion	177,15	K
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000211	m2 /s
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	2,46E-09	m2 /s
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	0,000133	Pa.m3/mol
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	1000	l/kg
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	-0,25	cm3/g
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	M	Masse molaire	27,03	g/mol
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	83000	Pa
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	S	Solubilité	1000000000	mg/m3
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	Tm	Température de fusion	259,75	K

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Default	lambda_w	Facteur de perte par action du vent et de la pluie (voire photodégradation)	18	an-1
Dichloroéthène.1.2-trans-	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000707	m2 /s
Dichloroéthène.1.2-trans-	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	1,19E-09	m2 /s
Dichloroéthène.1.2-trans-	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	629,4071506	Pa.m3/mol
Dichloroéthène.1.2-trans-	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	38	l/kg
Dichloroéthène.1.2-trans-	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	2,06	cm3/g
Dichloroéthène.1.2-trans-	M	Masse molaire	96,94	g/mol
Dichloroéthène.1.2-trans-	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	41000	Pa
Dichloroéthène.1.2-trans-	S	Solubilité	600000	mg/m3
Dichloroéthène.1.2-trans-	Tm	Température de fusion	223,35	K
Ethylbenzène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000075	m2 /s
Ethylbenzène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,8E-10	m2 /s
Ethylbenzène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	820	Pa.m3/mol
Ethylbenzène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	241,9	l/kg
Ethylbenzène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,15	cm3/g
Ethylbenzène	M	Masse molaire	106,16	g/mol
Ethylbenzène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	1273	Pa
Ethylbenzène	S	Solubilité	155000	mg/m3
Ethylbenzène	Tm	Température de fusion	178,2	K
Ethyl t-Butyl Ether	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	8,60E-06	m2 /s
Ethyl t-Butyl Ether	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	8,60E-10	m2 /s
Ethyl t-Butyl Ether	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1,64E-03	Pa.m3/mol
Ethyl t-Butyl Ether	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	21,07	l/kg
Ethyl t-Butyl Ether	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	1,92	cm3/g
Ethyl t-Butyl Ether	M	Masse molaire	102,74	g/mol
Ethyl t-Butyl Ether	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	16531	Pa
Ethyl t-Butyl Ether	S	Solubilité	1,20E+07	mg/m3
Ethyl t-Butyl Ether	Tm	Température de fusion	179	K
Fluoranthène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000041	m2 /s
Fluoranthène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	6,8E-10	m2 /s
Fluoranthène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	0,9	Pa.m3/mol
Fluoranthène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	52400	l/kg
Fluoranthène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	5,1	cm3/g
Fluoranthène	M	Masse molaire	202,26	g/mol
Fluoranthène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,00123	Pa
Fluoranthène	S	Solubilité	260	mg/m3
Fluorène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000456	m2 /s
Fluorène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	6,79E-10	m2 /s
Fluorène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	9,692721382	Pa.m3/mol
Fluorène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	7707	l/kg
Fluorène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4,18	cm3/g
Fluorène	M	Masse molaire	166,21	g/mol
Fluorène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,09	Pa
Fluorène	S	Solubilité	1980	mg/m3
Fluorène	Tm	Température de fusion	387,91	K
Mercure	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000045	m2 /s
Mercure	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	5,3E-10	m2 /s
Mercure	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	719,4075	Pa.m3/mol
Mercure	Kd_source_sol_E	Coefficient de partition particules du sol-eau du sol pour la couche de sol contenant la source sol	1000	l/kg

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Mercure	Kd_source_sol_E	Coefficient de partition particules du sol-eau du sol pour la couche de sol contenant la source sol	1000	l/kg
Mercure	Kd_source_sol_E	Coefficient de partition particules du sol-eau du sol pour la couche de sol contenant la source sol	1000	l/kg
Mercure	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	-1	l/kg
Mercure	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	0,6232	cm3/g
Mercure	M	Masse molaire	200,59	g/mol
Mercure	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,266644	Pa
Mercure	S	Solubilité	56,7	mg/m3
Mercure	Tm	Température de fusion	550	K
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000628	m2 /s
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,85E-10	m2 /s
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	888,62	Pa.m3/mol
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	602	l/kg
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,42	cm3/g
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	M	Masse molaire	120,19	g/mol
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	330,64	Pa
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	S	Solubilité	48200	mg/m3
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	Tm	Température de fusion	228,35	K
Méthyl t-Butyl Ether	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000071	m2 /s
Méthyl t-Butyl Ether	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	9E-10	m2 /s
Méthyl t-Butyl Ether	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	46,10859788	Pa.m3/mol
Méthyl t-Butyl Ether	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	9,1	l/kg
Méthyl t-Butyl Ether	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	1,1	cm3/g
Méthyl t-Butyl Ether	M	Masse molaire	88,15	g/mol
Méthyl t-Butyl Ether	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	33330,592	Pa
Méthyl t-Butyl Ether	S	Solubilité	41600000	mg/m3
Méthyl t-Butyl Ether	Tm	Température de fusion	165,15	K
Naphtalène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000067	m2 /s
Naphtalène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	8,2E-10	m2 /s
Naphtalène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	46,76	Pa.m3/mol
Naphtalène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	1789	l/kg
Naphtalène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,4	cm3/g
Naphtalène	M	Masse molaire	128,18	g/mol
Naphtalène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	11,3	Pa
Naphtalène	S	Solubilité	31800	mg/m3
Phénanthrène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000054	m2 /s
Phénanthrène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	5,7E-10	m2 /s
Phénanthrène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	3,049116956	Pa.m3/mol
Phénanthrène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	2291	l/kg
Phénanthrène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	4,57	cm3/g
Phénanthrène	M	Masse molaire	178,23	g/mol
Phénanthrène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	0,091	Pa
Phénanthrène	S	Solubilité	1200	mg/m3

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Phénanthrène	Tm	Température de fusion	372,65	K
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000604	m <sup>2</sup> /s
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,85E-10	m <sup>2</sup> /s
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	614,162	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	614	l/kg
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,63	cm <sup>3</sup> /g
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	M	Masse molaire	120,191	g/mol
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	279,98	Pa
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	S	Solubilité	57000	mg/m <sup>3</sup>
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	Tm	Température de fusion	229,45	K
Pyrène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000272	m <sup>2</sup> /s
Pyrène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,24E-10	m <sup>2</sup> /s
Pyrène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	0,919693001	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Pyrène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	67992	l/kg
Pyrène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	5,32	cm <sup>3</sup> /g
Pyrène	M	Masse molaire	202,26	g/mol
Pyrène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	6	Pa
Pyrène	S	Solubilité	130	mg/m <sup>3</sup>
Pyrène	Tm	Température de fusion	429,15	K
Toluène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000087	m <sup>2</sup> /s
Toluène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	8,6E-10	m <sup>2</sup> /s
Toluène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	406,4745588	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Toluène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	100	l/kg
Toluène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	2,69	cm <sup>3</sup> /g
Toluène	M	Masse molaire	92,14	g/mol
Toluène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	3769	Pa
Toluène	S	Solubilité	515000	mg/m <sup>3</sup>
Toluène	Tm	Température de fusion	178,15	K
Xylène. m-	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,00000695	m <sup>2</sup> /s
Xylène. m-	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	7,8E-10	m <sup>2</sup> /s
Xylène. m-	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	438,5026816	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Xylène. m-	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	157	l/kg
Xylène. m-	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,21	cm <sup>3</sup> /g
Xylène. m-	M	Masse molaire	106,16	g/mol
Xylène. m-	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	1100	Pa
Xylène. m-	S	Solubilité	151000	mg/m <sup>3</sup>
Xylène. m-	Tm	Température de fusion	225,25	K
Xylène. o-	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000084	m <sup>2</sup> /s
Xylène. o-	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> /s
Xylène. o-	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	304,0688503	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Xylène. o-	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	234	l/kg
Xylène. o-	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,01	cm <sup>3</sup> /g
Xylène. o-	M	Masse molaire	106,16	g/mol
Xylène. o-	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	880	Pa
Xylène. o-	S	Solubilité	178000	mg/m <sup>3</sup>
Xylène. o-	Tm	Température de fusion	247,95	K

Materials	Name	Nom	Value	Unité
Xylène. p-	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000072	m <sup>2</sup> /s
Xylène. p-	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	8,44E-10	m <sup>2</sup> /s
Xylène. p-	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	448,0962447	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Xylène. p-	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	317	l/kg
Xylène. p-	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	3,15	cm <sup>3</sup> /g
Xylène. p-	M	Masse molaire	106,16	g/mol
Xylène. p-	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	1172	Pa
Xylène. p-	S	Solubilité	177000	mg/m <sup>3</sup>
Xylène. p-	Tm	Température de fusion	286,45	K
Tétrachloroéthylène	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000072	m <sup>2</sup> /s
Tétrachloroéthylène	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	8,2E-10	m <sup>2</sup> /s
Tétrachloroéthylène	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1860	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Tétrachloroéthylène	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	247	l/kg
Tétrachloroéthylène	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	2,67	cm <sup>3</sup> /g
Tétrachloroéthylène	M	Masse molaire	165,82	g/mol
Tétrachloroéthylène	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	2470	Pa
Tétrachloroéthylène	S	Solubilité	150000	mg/m <sup>3</sup>
Trichloroéthane. 1.1.1-	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000078	m <sup>2</sup> /s
Trichloroéthane. 1.1.1-	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> /s
Trichloroéthane. 1.1.1-	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	1029,560369	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Trichloroéthane. 1.1.1-	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	110	l/kg
Trichloroéthane. 1.1.1-	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	2,49	cm <sup>3</sup> /g
Trichloroéthane. 1.1.1-	M	Masse molaire	133,4	g/mol
Trichloroéthane. 1.1.1-	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	16531,97363	Pa
Trichloroéthane. 1.1.1-	S	Solubilité	4400000	mg/m <sup>3</sup>
Trichloroéthane. 1.1.1-	Tm	Température de fusion	242,75	K
Chloroforme (Trichlorométhane)	Da	Coefficient de diffusion dans l'air	0,0000104	m <sup>2</sup> /s
Chloroforme (Trichlorométhane)	De	Coefficient de diffusion dans l'eau	0,000000001	m <sup>2</sup> /s
Chloroforme (Trichlorométhane)	H_Ts	Constante de Henry à température du sol	183,4428088	Pa.m <sup>3</sup> /mol
Chloroforme (Trichlorométhane)	Koc	Coefficient de partage carbone organique-eau	60	l/kg
Chloroforme (Trichlorométhane)	logKow_E	Log du coefficient de partage octanol-eau	1,97	cm <sup>3</sup> /g
Chloroforme (Trichlorométhane)	M	Masse molaire	119,38	g/mol
Chloroforme (Trichlorométhane)	Pvap_Ts	Pression de vapeur à température du sol	26264	Pa
Chloroforme (Trichlorométhane)	S	Solubilité	8200000	mg/m <sup>3</sup>
Chloroforme (Trichlorométhane)	Tm	Température de fusion	209,65	K

## **Annexe V :           Présentation et paramétrage du logiciel Modul'ERS**

## PRESENTATION DES MODULES DE CALCUL MODUL'ERS DE L'INERIS (Extrait guide de l'utilisateur)

Chaque module de calcul, à l'exception du module *Niveaux\_Exposition\_Risque*, correspond à un milieu et **permet de calculer la concentration de polluants dans ce milieu** (concentration attribuable à la source (ou aux) sources étudiée(s) et concentration totale, intégrant le bruit de fond) et **le niveau d'exposition correspondant pour les cibles humaines en fonction du temps. Les niveaux d'exposition sont calculés par classe d'âge en fonction du temps<sup>28</sup> et pour un profil d'individus dont l'utilisateur définit l'âge en début d'exposition et la date de début d'exposition<sup>29</sup>.**

**Les fonctions de chaque module sont décrites dans le logiciel.** Pour savoir ce que chaque module permet de calculer, il est conseillé de lire sa description dans la fenêtre *Information*, en cliquant une fois sur sa représentation dans la matrice.

Comme indiqué précédemment toutes les équations sont accessibles et l'utilisateur peut également se reporter au document « Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle » (DRC-08—94882-16675C).

Les modalités de calcul des concentrations par chacun des modules sont résumées ci-dessous et les termes sources de pollution pouvant être utilisés sont listés.

- Le module **Sol** sert au calcul de la concentration dans une couche de sol en surface, en tenant compte ou non des apports atmosphériques, des apports par irrigation et des mécanismes de perte (dégradation, lixiviation, érosion, ruissellement).  
➔ Expression possible du terme source de pollution : dépôts atmosphériques, concentration dans l'eau.
  
- Le module **Nouveau\_végétal** permet de calculer les concentrations dans les végétaux liées aux dépôts atmosphériques directs, à l'absorption gazeuse (polluants organiques), aux dépôts de particules du sol remises en suspension à partir du sol de surface, à l'irrigation par aspersion, au prélèvement direct à partir du sol racinaire. Les concentrations sont recalculées chaque année et données au moment de la récolte et de récolte en récolte.  
➔ Expression possible du terme source de pollution : dépôts atmosphériques, concentration dans l'eau, concentration dans l'air, concentration dans le sol.
  
- Le module **Eaux\_superficielles** donne les concentrations dans les eaux superficielles et les sédiments à l'état stationnaire. La concentration dans les eaux peut être calculée au point x en aval d'un rejet ponctuel (approche applicable à un cours d'eau) ou comme une concentration homogène dans un volume d'eau Vol\_e\_sup (approche applicable notamment à une étendue

---

<sup>28</sup> Pour une simulation sur 30 années, les niveaux d'exposition calculés par classe d'âge correspondent au cours du temps à des individus différents. Ainsi, la classe d'âge des enfants de 1 à 3 ans correspond à des individus différents à la date t=0 et à t=30.

<sup>29</sup> Les niveaux d'exposition calculés pour un profil d'individus durant une simulation sur 30 ans se rapportent aux mêmes individus durant toute la simulation. Les valeurs des paramètres d'exposition de ces individus évoluent en fonction de leur âge, qui lui-même dépend de l'âge défini par l'utilisateur en début d'exposition et du temps t.

d'eau). Ce calcul peut être fait en tenant compte de rejets diffus (apports atmosphériques, par ruissellement sur les zones imperméables, par ruissellement sur les zones perméables, par érosion) et des pertes par dégradation, volatilisation et sédimentation.

- ➔ Expression possible du terme source de pollution : dépôts atmosphériques, concentration dans le sol, concentration dans le cours d'eau au point  $x=0$ .
  
- Le module **Eaux\_souterraines** donne la concentration de polluants en phase dissoute aux points de coordonnées  $x, y, z$  à l'instant  $t$ , pour une source surfacique de polluants dans la zone saturée, perpendiculaire à l'écoulement et de concentration constante (à partir de la solution de Domenico). Le module permet également de calculer cette concentration à partir d'une concentration constante dans le sol au bas de la zone non saturée.
  - ➔ Expression possible du terme source de pollution : concentration dans le sol en bas de la zone insaturée, concentration dans la nappe au point  $x=0$ .
  
- Le module **Animaux\_aquatiques** permet de calculer les concentrations dans l'animal selon une approche stationnaire ou dynamique à partir de la concentration dans le milieu d'exposition. Dans le dernier cas, la concentration dans le tissu animal est estimée pour un animal en fin de vie.
  - ➔ Expression possible du terme source de pollution : concentration dans l'eau, concentration dans les sédiments.
  
- Le module **Nouvel\_animal** donne les concentrations dans l'animal (tissu 1 : viande, matières grasses) et dans les produits excrétés par l'animal (tissu 2 : œufs, lait ou matières grasses de ces produits). Ces concentrations peuvent être calculées à l'état stationnaire ou avec une approche dynamique. Dans ce cas, les concentrations dans les tissus animaux sont estimées pour un animal en fin de vie. La dose d'exposition de l'animal est estimée à partir de son ingestion de sol, d'eau et/ou de végétaux contaminés. L'utilisateur peut tenir compte des concentrations de trois sols différents, de trois ressources en eau différentes et de cinq végétaux différents.
  - ➔ Expression possible du terme source de pollution : concentration dans l'eau, concentration dans le sol, concentration dans les végétaux.

Les cinq modules suivants permettent de calculer les concentrations dans l'air.

- Le module **Conc\_gaz\_air\_exterieur** permet le calcul du flux d'émission à partir d'une source sol (source sol supposée infinie ou supposée finie à la surface du sol) ou d'une source nappe et l'estimation des concentrations dans l'air à hauteur de respiration des cibles et/ou à une hauteur  $H_b$  définie par l'utilisateur.
  
- Le module **Conc\_gaz\_air\_interieur\_Volasoil** donne le flux d'émission à partir d'une source sol ou d'une source nappe et l'estimation des concentrations dans un bâtiment (endroit où a lieu l'émission : vide sanitaire, sous-sol ou pièces à vivre selon les cas) et dans le lieu de vie, si le bâtiment comporte un vide-sanitaire ou un sous-sol. Les calculs sont réalisés selon une approche dérivée du modèle Volasoil du RIVM (institut néerlandais de santé publique et de l'environnement).
  
- Le module **Conc\_gaz\_air\_interieur\_JE**, basé sur les équations du modèle de Johnson et Ettinger (US EPA, 2004; Johnson et al., 1991), permet le calcul des concentrations gazeuses dans l'air d'un bâtiment à partir d'une source sol ou d'une source nappe. Ce module est conçu pour un bâtiment construit sur une dalle. Dans le cas d'une source sol, la concentration

attendue dans le bâtiment peut être estimée en utilisant la solution pour une source infinie ou la solution pour une source finie, proposée par l'US EPA. La solution en source finie implémentée suppose nécessairement que la dalle du bâtiment se situe au niveau du sol (pas de sous-sol enterré).

- Pour ces trois modules, l'utilisateur peut définir les caractéristiques de deux couches de sol différentes au-dessus de la source, tenir compte du mélange de substances présentes dans le sol en appliquant la loi de Raoult et de la diffusion dans la nappe dans le cas d'une source nappe.
  - Expression possible du terme source de pollution pour ces trois modules : concentration dans l'eau de la nappe, concentration dans l'air du sol, concentration dans le sol.
- Le module **Conc\_part\_air\_extérieur** donne les concentrations inhalables de polluant sous forme particulaire dans l'air extérieur, à partir de la concentration dans le sol et de la fraction de particules issues du sol, ou du modèle de Cowherd calculant le flux moyen annuel de particules inférieures ou égales à 10 µm, dues à l'érosion éolienne.
  - Expression possible du terme source de pollution : concentration dans le sol.
- Le module **Conc\_part\_air\_intérieur** permet le calcul des concentrations inhalables à partir de la concentration particulaire inhalable dans l'air extérieur (*Cap\_e\_inh\_attrib*).
  - Expression possible du terme source de pollution : concentration dans l'air extérieur sous forme particulaire.

Les modules dédiés à l'air extérieur *Conc\_gaz\_air\_extérieur* et *Conc\_part\_air\_extérieur* permettent, en plus de la source sol ou de la source nappe du site, de tenir compte de la concentration dans l'air liée à d'autres sources de polluants issues du site.

A la différence des autres modules dédiés aux calculs des concentrations dans les milieux, les cinq modules pour la concentration dans l'air calculent les niveaux d'exposition en moyenne annuelle et le niveau d'exposition moyen sur la durée d'exposition. Ces grandeurs servent au calcul des risques chroniques.

- Enfin, le module **Niveaux\_Exposition\_Risque** est dédié au calcul des niveaux d'exposition chronique et au calcul des niveaux de risque chronique. Les doses d'exposition orales sont calculées en moyenne annuelle pour les différentes classes d'âge, afin d'estimer les risques à effet de seuil. Elles sont aussi calculées en moyenne sur toute la durée d'exposition pour un profil d'individus, dont l'utilisateur a défini l'âge en début d'exposition et la date de début d'exposition, afin d'estimer les risques sans effet de seuil. Pour les expositions par inhalation, le calcul des niveaux d'exposition moyens est fait directement dans les modules relatifs au milieu (cf. paragraphe précédent). Les niveaux de risque sont définis par substance individuelle et pour toutes les substances et peuvent aussi être définis par organe cible pour les effets à seuil.

**Paramètres d'entrée du Logiciel Modul'ERS  
 Modélisation vers l'air intérieur**

- Caractéristiques des sols :
  - Modélisation source sol et gaz du sol

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Température du sol	K	283	Valeur par défaut (10°C)
Volume de la source sol	m <sup>3</sup>	0	Source considérée comme infinie (volume non connu)
<b>Couche de sol 2 (située au contact du bâtiment)</b>			
Epaisseur de la couche de sol entre le bâtiment et la source (couche 2)	m	0,1	Epaisseur minimale du modèle
Type de sol de la couche 2	-	Sable	Spécifique au site : basé sur observations de terrain et granulométries
Densité du sol	g/cm <sup>3</sup>	1,66	Valeur standard pour ce type de sol (US-EPA)
Porosité du sol	-	0,375	Porosité totale $\theta_s$ pour ce type de sol (US-EPA)
Perméabilité intrinsèque du sol	m <sup>2</sup>	9,9E-12	Valeur calculée pour ce type de sol
Teneur en eau du sol	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,054	Valeur standard $\theta_{w,unsat}$ pour ce type de sol (US-EPA)
Teneur en carbone organique du sol (COT)	-	0,002	Valeur par défaut (US EPA)

- Modélisation source nappe

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Température du sol	K	283	Valeur par défaut (10°C)
Longueur de diffusion dans la nappe	m	0	Nappe considérée comme homogène au droit du site
<b>Frange capillaire</b>			
Epaisseur de la frange capillaire	m	0,17	Valeur standard pour ce type de sol (US-EPA)
Porosité de la frange capillaire	-	0,375	Valeur standard pour ce type de sol (US-EPA)
Teneur en eau de la frange capillaire	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,253	Valeur standard pour ce type de sol (US-EPA)
<b>Couche de sol 2 (située au contact du bâtiment)</b>			
Epaisseur de la couche de sol entre le bâtiment et la source (couche 2)	m	0,1	Epaisseur minimale du modèle
Type de sol de la couche 2	-	Sable	Spécifique au site : basé sur observations de terrain et granulométries
Densité du sol	g/cm <sup>3</sup>	1,66	Valeur standard pour ce type de sol (US-EPA)
Porosité du sol	-	0,375	Porosité totale $\theta_s$ pour ce type de sol (US-EPA)

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Perméabilité intrinsèque du sol	m <sup>2</sup>	9,9E-12	Valeur calculée pour ce type de sol
Teneur en eau du sol	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,054	Valeur standard $\theta_{w,unsat}$ pour ce type de sol (US-EPA)
Teneur en carbone organique du sol (COT)	-	0,002	Valeur par défaut (US EPA)

- Caractéristiques des bâtiments :
  - Dimensions :

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Hauteur	m	7,15	Hauteur sous faux-plafond totale des 2 niveaux de sous-sol (R-1/R-2)
Taux de transfert parkings en sous-sol/RDC	cm	68% (présence voies d'accès)	Taux de transfert sécuritaire selon Fast, T.J., Kliet, en H., van de Wiel, 1987, Rapport nr.6. Cette publication fait état d'un taux de transfert compris entre 0 et 68,5%, avec une moyenne à 10,7%, une médiane à 15,3%, un 95ième percentile à 39,4%.
Taux de transfert entre les étages	cm	100%	Hypothèse sécuritaire

- Paramètres de modélisation pour VOLASOIL :

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Fraction surfacique occupée par les ouvertures de la dalle	-	1,0E-05	Valeur par défaut (dalle normale)
Nombre d'ouverture dans la dalle par unité de surface	m <sup>-2</sup>	0,2	Valeur Modul'ERS
Epaisseur de la dalle du bâtiment	m	0,15	Valeur standard
Porosité de la dalle	-	0,02	Valeur par défaut de Modul'ERS (Hazebrouck 2005)
Teneur en eau de la dalle	-	0	Valeur par défaut de Modul'ERS (Hazebrouck 2005)
Différence de pression entre le sol et l'espace clos (DeltaP)	Pa (ou kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> )	1	Valeur par défaut pour une configuration avec sous-sol (USEPA, 2004 + RIVM, 2008)
Taux de renouvellement d'air (ER)	vol/s	1,4E-4 (=0,5 vol/h)	Valeur standard pour un usage résidentiel et tertiaire

### Modélisation vers l'air extérieur

- Caractéristiques des sols :
  - Modélisation source sol et gaz du sol

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Température du sol	K	283	Valeur par défaut (10°C)
Volume de la surface sol	m <sup>2</sup>	0	Source considérée comme infinie (volume non connu)
<b>Couche de sol 2 (sol en surface)</b>			
Epaisseur de la couche 2	m	0,3	Apport de 30 cm de remblais sain
Type de sol de la couche 2	-	Sable	Spécifique au site : basé sur observations de terrain
Porosité du sol	-	0,375	Porosité totale $\theta_s$ pour ce type de sol (US-EPA)
Teneur en eau du sol	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,054	Valeur standard $\theta_{w,unsat}$ pour ce type de sol (US EPA)
Teneur en carbone organique du sol (COT)	-	0,002	Valeur par défaut (US EPA)

- Modélisation source eaux souterraines

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Température du sol	K	283	Valeur par défaut (10°C)
Longueur de diffusion dans la nappe	m	0	Nappe considérée comme homogène au droit du site
<b>Couche de sol 2 (sol en surface)</b>			
Epaisseur de la couche 2	m	3,83	Epaisseur maxi = Profondeur nappe - frange capillaire
Type de sol de la couche 2	-	Sable	Spécifique au site : basé sur observations de terrain et granulométries
Porosité du sol	-	0,375	Porosité totale $\theta_s$ pour ce type de sol (US-EPA)
Teneur en eau du sol	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,054	Valeur standard $\theta_{w,unsat}$ pour ce type de sol (US EPA)
Teneur en carbone organique du sol (COT)	-	0,002	Valeur par défaut (US EPA)

- Caractéristiques des espaces extérieurs :

Paramètres	Unité	Valeurs	Commentaires
Vitesse de vent	m/s	4	Moyenne des vitesses de vents observées à la station météorologique de Nice (06), de 1991 à 2010.
Hauteur de mélange	m	cf. paramètres d'exposition	Hauteur de respiration des cibles
Longueur de la source parallèle au vent W	m	100	Plus grande diagonale du site (hypothèse majorante)

## **Annexe VI : Synthèse des données toxicologiques**

Substances		Effets non cancérogènes et organes cibles	Effets cancérogènes			
Dénomination	N°CAS		Classification USEPA CIRC UE			Types de cancer
<b>CAV</b>						
Benzène	71-43-2	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, système hématopoïétique/sang, foie, tractus gastro-intestinal, système nerveux central, système immunitaire, effets foetotoxiques,	CH	1	C1AM1B	Leucémies (myélocytiques, lymphoïdes, myéloïdes)
Toluène	108-88-3	Appareil respiratoire, système cardiovasculaire, système hématopoïétique/sang, système nerveux central, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, effets foetotoxiques, foie	InI	3	R2	-
Ethylbenzène	100-41-4	Système hématopoïétique/sang, reins, foie, effets foetotoxiques /développement, système endocrinien	D	2B	-	-
Xylènes	1330-20-7	Système nerveux central, sang, appareil respiratoire, peau, foie, reins, rate, effets foetotoxiques / développement	InI	3	-	-
Cumène	98-82-8	Reins	InI	2B	-	-
Pseudocumène	95-63-6	Système nerveux central, sang, appareil respiratoire	-	-	-	-
Mésitylène	108-67-8	Système nerveux central, sang, appareil respiratoire	-	-	-	-
<b>HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)</b>						
Naphtalène	91-20-3	Sang/système hématopoïétique, appareil cardiovasculaire, système nerveux central, yeux, foie, reins, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, rate, effets foetotoxiques /développement, système endocrinien, appareil respiratoire	C	2B	C2	Tumeurs bénignes pulmonaires (études chez l'animal)
Acénaphthène	83-32-9	Foie, sang/système hématopoïétique, appareil cardiovasculaire, appareil respiratoire, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, appareil reproducteur, système endocrinien	D	3	-	-

Substances		Effets non cancérogènes et organes cibles	Effets cancérogènes			
Dénomination	N°CAS		Classification			Types de cancer
			USEPA	CIRC	UE	
Acénaphthylène	206-96-8	Appareil cardiovasculaire, sang/système hématopoïétique, foie, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien, appareil respiratoire	D	-	-	-
Phénanthrène	85-01-8	Appareil respiratoire, appareil cardiovasculaire, foie, sang/système hématopoïétique, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien	D	3	-	-
Fluoranthène	206-44-0	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, sang/système hématopoïétique, foie, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien, reins	D	3	-	-
Fluorène	86-73-7	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, sang/système hématopoïétique, foie, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien	D	3	-	-
Anthracène	120-12-7	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, sang/système hématopoïétique, foie, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien	D	3	C2	-
Pyrène	129-00-0	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, sang/système hématopoïétique, foie, reins, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, système endocrinien	D	3	-	-
<b>COMPOSÉS ORGANOCHLORÉS VOLATILS</b>						
Trichloréthylène	79-01-6	Système cardiovasculaire, système nerveux central, peau, foie, reins, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, effets foetotoxiques, sang	CH	1	C1BM2	Carcinomes hépatocellulaires chez l'animal
Tétrachloroéthylène	127-18-4	Système nerveux central, foie, reins, effets foetotoxiques	LH	2A	C2	Chez l'homme : leucémies lymphoïdes. Chez l'animal : carcinomes hépato-cellulaire
Cis-1,2-dichloroéthylène	156-59-2	Appareil respiratoire, système nerveux central, foie, sang	-	-	-	-
Trans-1,2-dichloroéthylène	156-60-5	Appareil respiratoire, système cardiovasculaire, système nerveux, foie	-	-	-	-

Substances		Effets non cancérogènes et organes cibles	Effets cancérogènes			
Dénomination	N°CAS		Classification			Types de cancer
		USEPA CIRC UE				
Chloroforme	67-66-3	Foie, reins, système nerveux central, tractus gastro-intestinal, effets foetotoxiques	LH	2B	C2R2	Cancers du tube digestif, de la vessie, du foie et du rein
1,1,1 trichloroéthane	71-55-6	Système nerveux central, foie	InI	3	C2	-
<b>HYDROCARBURES TPH</b>						
TPH C6-C8 aliphatiques	-	Foie, reins	-	-	-	-
TPH C8-C10 aliphatiques	-	Foie, sang	-	-	-	-
TPH C10-C12 aliphatiques	-	Foie, sang	-	-	-	-
TPH C12-C16 aliphatiques	-	Foie, sang	-	-	-	-
TPH C8-C10 aromatiques	-	Perte de poids	-	-	-	-
TPH C10-C12 aromatiques	-	Perte de poids	-	-	-	-
TPH C12-C16 aromatiques	-	Perte de poids	-	-	-	-
<b>METAUX</b>						
Mercure	7439-97-6	Appareil respiratoire, système cardio-vasculaire, système nerveux central, peau, reins, tractus gastro-intestinal, système immunitaire, effets foetotoxiques/développement	D	3	R1B	-
<b>AUTRES SUBSTANCES</b>						

## Annexe VII : Calculs de Risques Sanitaires

A partir des concentrations dans les gaz des eaux et les eaux souterraines	Inhalation d'air intérieur pour les résidents (logements sur parkings en R-2)								Concentration modélisée dans les lieux de vie en mg/m3
	QD Classe 1	QD Classe 2	QD Classe 3	QD Classe 4	QD Classe 5	QD Classe 6	QD Classe 7	ERI	
Acénaphthylène	-	-	-	-	-	-	-	7,7E-10	4,3E-06
Acénaphthène	-	-	-	-	-	-	-	1,5E-08	8,5E-05
Aliphatique C>05 C06	4,6E-03	4,6E-03	4,0E-03	4,0E-03	4,1E-03	3,8E-03	4,3E-03	-	1,1E-01
Aliphatique C>06 C08	8,6E-06	8,6E-06	7,5E-06	7,5E-06	7,7E-06	7,3E-06	8,2E-06	-	2,1E-04
Aliphatique C>08 C10	1,6E-05	1,6E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,5E-05	-	2,1E-05
Aliphatique C>10 C12	5,5E-05	5,5E-05	4,8E-05	4,8E-05	4,9E-05	4,6E-05	5,2E-05	-	7,2E-05
Aliphatique C>12 C16	1,6E-06	1,6E-06	1,4E-06	1,4E-06	1,4E-06	1,4E-06	1,5E-06	-	2,1E-06
Anthracène	-	-	-	-	-	-	-	4,3E-10	2,4E-07
Aromatique C>08 C10	1,8E-04	1,8E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,6E-04	1,5E-04	1,7E-04	-	4,7E-05
Aromatique C>10 C12	3,3E-04	3,3E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,8E-04	3,1E-04	-	8,7E-05
Aromatique C>12 C16	8,0E-06	8,0E-06	7,0E-06	7,0E-06	7,2E-06	6,8E-06	7,6E-06	-	2,1E-06
Benzène	1,9E-03	1,9E-03	1,7E-03	1,7E-03	1,7E-03	1,6E-03	1,8E-03	2,0E-07	2,5E-05
Chloroforme (Trichlorométhane)	7,7E-05	7,7E-05	6,7E-05	6,7E-05	6,8E-05	6,4E-05	7,2E-05	-	6,4E-06
Cumène (Isopropylbenzène)	4,0E-06	4,0E-06	3,5E-06	3,5E-06	3,6E-06	3,4E-06	3,8E-06	-	2,1E-06
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	6,6E-06	6,6E-06	5,8E-06	5,8E-06	5,9E-06	5,6E-06	6,3E-06	-	2,2E-07
Ethylbenzène	1,3E-03	1,3E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,2E-03	-	2,5E-03
Fluoranthène	-	-	-	-	-	-	-	7,2E-11	4,0E-07
Fluorène	-	-	-	-	-	-	-	1,5E-09	8,2E-06
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	7,7E-03	7,7E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,8E-03	6,5E-03	7,3E-03	-	6,1E-04
Naphtalène	4,3E-05	4,3E-05	3,8E-05	3,8E-05	3,9E-05	3,7E-05	4,1E-05	3,5E-09	2,1E-06
Phénanthrène	-	-	-	-	-	-	-	1,1E-10	6,1E-07
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	1,1E-04	1,1E-04	9,3E-05	9,3E-05	9,5E-05	9,0E-05	1,0E-04	-	8,5E-06
Pyrène	-	-	-	-	-	-	-	5,6E-11	3,1E-07
Toluène	7,6E-07	7,6E-07	6,6E-07	6,6E-07	6,8E-07	6,4E-07	7,2E-07	-	1,9E-05
Trichloroéthane, 1,1,1-	1,1E-05	1,1E-05	9,8E-06	9,8E-06	1,0E-05	9,5E-06	1,1E-05	-	1,5E-05
Xylène, o-	4,8E-05	4,8E-05	4,2E-05	4,2E-05	4,3E-05	4,1E-05	4,6E-05	-	6,4E-06
Xylène, p-	1,1E-04	1,1E-04	9,8E-05	9,8E-05	1,0E-04	9,5E-05	1,1E-04	-	1,5E-05
Somme	1,6E-02	1,6E-02	1,4E-02	1,4E-02	1,5E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,2E-07	

A partir des concentrations dans les gaz des eaux et les eaux souterraines	Inhalation d'air intérieur pour les résidents de l'EPHAD (bâtiment sur parking en R-2)			Inhalation d'air intérieur pour les employés (bureaux et commerces sur parking en R-2)		
	QD	ERI	Concentration modélisée dans les lieux de vie en mg/m3	QD	ERI	Concentration modélisée dans les lieux de vie en mg/m3
Acénaphthylène	-	7,5E-10	4,3E-06	-	3,4E-10	4,3E-06
Acénaphthène	-	1,5E-08	8,5E-05	-	6,7E-09	8,5E-05
Aliphatique C>05 C06	6,0E-03	-	1,1E-01	1,3E-03	-	1,1E-01
Aliphatique C>06 C08	1,1E-05	-	2,1E-04	2,5E-06	-	2,1E-04
Aliphatique C>08 C10	2,1E-05	-	2,1E-05	4,6E-06	-	2,1E-05
Aliphatique C>10 C12	7,2E-05	-	7,2E-05	1,6E-05	-	7,2E-05
Aliphatique C>12 C16	2,1E-06	-	2,1E-06	4,6E-07	-	2,1E-06
Anthracène	-	4,2E-10	2,4E-07	-	1,9E-10	2,4E-07
Aromatique C>08 C10	2,3E-04	-	4,7E-05	5,1E-05	-	4,7E-05
Aromatique C>10 C12	4,4E-04	-	8,7E-05	9,5E-05	-	8,7E-05
Aromatique C>12 C16	1,1E-05	-	2,1E-06	2,3E-06	-	2,1E-06
Benzène	2,5E-03	1,9E-07	2,5E-05	5,6E-04	8,7E-08	2,5E-05
Chloroforme (Trichlorométhane)	1,0E-04	-	6,4E-06	2,2E-05	-	6,4E-06
Cumène (Isopropylbenzène)	5,3E-06	-	2,1E-06	1,2E-06	-	2,1E-06
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d'hydrogène)	8,8E-06	-	2,2E-07	1,9E-06	-	2,2E-07
Ethylbenzène	1,7E-03	-	2,5E-03	3,7E-04	-	2,5E-03
Fluoranthène	-	6,9E-11	4,0E-07	-	3,2E-11	4,0E-07
Fluorène	-	1,4E-09	8,2E-06	-	6,4E-10	8,2E-06
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	1,0E-02	-	6,1E-04	2,2E-03	-	6,1E-04
Naphtalène	5,7E-05	3,4E-09	2,1E-06	1,3E-05	1,6E-09	2,1E-06
Phénanthrène	-	1,0E-10	6,1E-07	-	4,8E-11	6,1E-07
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	1,4E-04	-	8,5E-06	3,1E-05	-	8,5E-06
Pyrène	-	5,4E-11	3,1E-07	-	2,5E-11	3,1E-07
Toluène	1,0E-06	0,00E+00	1,9E-05	2,2E-07	-	1,9E-05
Trichloroéthane, 1,1,1-	1,5E-05	0,00E+00	1,5E-05	3,2E-06	-	1,5E-05
Xylène, o-	6,37E-05	0	6,37E-06	1,39E-05	0,00E+00	6,37E-06
Xylène, p-	1,49E-04	0	1,49E-05	3,24E-05	0,00E+00	1,49E-05
Somme	2,2E-02	2,1E-07		4,7E-03	9,6E-08	

A partir des concentrations dans les gaz des eaux et les eaux souterraines	Inhalation d'air intérieur pour les employés travaillant dans le R-2 (auditorium)		
	QD	ERI	Concentration modélisée dans les lieux de vie en mg/m3
Acénaphthylène	-	4,9E-10	6,4E-06
Acénaphthène	-	9,6E-09	1,3E-04
Aliphatique C>05 C06	1,9E-03	-	1,6E-01
Aliphatique C>06 C08	3,6E-06	-	3,1E-04
Aliphatique C>08 C10	6,6E-06	-	3,1E-05
Aliphatique C>10 C12	2,3E-05	-	1,1E-04
Aliphatique C>12 C16	6,6E-07	-	3,1E-06
Anthracène	-	2,7E-10	3,6E-07
Aromatique C>08 C10	7,3E-05	-	6,9E-05
Aromatique C>10 C12	1,4E-04	-	1,3E-04
Aromatique C>12 C16	3,3E-06	-	3,1E-06
Benzène	8,0E-04	1,2E-07	3,7E-05
Chloroforme (Trichlorométhane)	3,2E-05	-	9,4E-06
Cumène (Isopropylbenzène)	1,7E-06	-	3,1E-06
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d hydrogene)	2,7E-06	-	3,2E-07
Ethylbenzène	5,2E-04	-	3,7E-03
Fluoranthène	-	4,5E-11	5,9E-07
Fluorène	-	9,2E-10	1,2E-05
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	3,2E-03	-	9,0E-04
Naphtalène	1,8E-05	2,2E-09	3,1E-06
Phénanthrène	-	6,9E-11	9,0E-07
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	4,4E-05	-	1,2E-05
Pyrène	-	3,5E-11	4,6E-07
Toluène	3,1E-07	-	2,8E-05
Trichloroéthane, 1,1,1-	4,6E-06	-	2,2E-05
Xylène, o-	1,99E-05	0,00E+00	9,36E-06
Xylène, p-	4,64E-05	0,00E+00	2,18E-05
Somme	6,8E-03	1,4E-07	

Inhalation d'air extérieur										
	QD Classe 1	QD Classe 2	QD Classe 3	QD Classe 4	QD Classe 5	QD Classe 6	QD Classe 7	ERI Résidents	QD Employés	ERI_inh
Acénaphthylène	-	-	-	-	-	-	-	4,1E-14	-	2,0E-14
Acénaphthène	-	-	-	-	-	-	-	3,9E-14	-	1,9E-14
Aliphatique C>05 C06	2,1E-08	9,2E-09	2,3E-08	1,9E-08	5,5E-09	5,0E-09	3,7E-09	-	3,3E-09	-
Aliphatique C>06 C08	4,3E-08	1,8E-08	4,6E-08	3,7E-08	1,1E-08	9,9E-09	7,4E-09	-	6,6E-09	-
Aliphatique C>08 C10	7,9E-07	3,4E-07	8,4E-07	6,9E-07	2,0E-07	1,8E-07	1,4E-07	-	1,2E-07	-
Aliphatique C>10 C12	3,6E-06	1,5E-06	3,8E-06	3,1E-06	9,1E-07	8,2E-07	6,1E-07	-	5,5E-07	-
Aliphatique C>12 C16	7,3E-06	3,1E-06	7,7E-06	6,3E-06	1,9E-06	1,7E-06	1,3E-06	-	1,1E-06	-
Anthracène	-	-	-	-	-	-	-	4,0E-13	-	2,0E-13
Aromatique C>08 C10	9,6E-08	4,1E-08	1,0E-07	8,4E-08	2,5E-08	2,2E-08	1,7E-08	-	1,5E-08	-
Aromatique C>10 C12	3,1E-06	1,3E-06	3,3E-06	2,7E-06	8,0E-07	7,2E-07	5,4E-07	-	4,8E-07	-
Aromatique C>12 C16	6,8E-06	2,9E-06	7,2E-06	5,9E-06	1,7E-06	1,6E-06	1,2E-06	-	1,0E-06	-
Benzène	1,4E-06	6,0E-07	1,5E-06	1,2E-06	3,6E-07	3,2E-07	2,4E-07	6,8E-11	2,2E-07	3,4E-11
Chloroforme (Trichlorométhane)	2,9E-07	1,3E-07	3,1E-07	2,6E-07	7,5E-08	6,8E-08	5,1E-08	-	4,5E-08	-
Cumène (Isopropylbenzène)	2,5E-08	1,1E-08	2,7E-08	2,2E-08	6,5E-09	5,8E-09	4,4E-09	-	3,9E-09	-
Cyanure (sel de cyanure et cyanure d'hydrogène)	6,4E-08	2,7E-08	6,8E-08	5,6E-08	1,6E-08	1,5E-08	1,1E-08	-	9,9E-09	-
Ethylbenzène	7,8E-09	3,3E-09	8,3E-09	6,8E-09	2,0E-09	1,8E-09	1,3E-09	-	1,2E-09	-
Fluoranthène	-	-	-	-	-	-	-	4,0E-14	-	2,0E-14
Fluorène	-	-	-	-	-	-	-	4,2E-14	-	2,1E-14
Mercure	1,6E-04	6,8E-05	1,7E-04	1,4E-04	4,1E-05	3,7E-05	2,7E-05	-	2,4E-05	-
Mésitylène (135 triméthylbenzène)	1,6E-07	7,0E-08	1,7E-07	1,4E-07	4,2E-08	3,8E-08	2,8E-08	-	2,5E-08	-
Naphtalène	1,9E-08	8,2E-09	2,0E-08	1,7E-08	4,9E-09	4,4E-09	3,3E-09	7,4E-13	3,0E-09	3,7E-13
Phénanthrène	-	-	-	-	-	-	-	5,0E-14	-	2,5E-14
Pseudocumène (124 triméthylbenzène)	1,6E-07	6,7E-08	1,7E-07	1,4E-07	4,0E-08	3,6E-08	2,7E-08	-	2,4E-08	-
Pyrène	-	-	-	-	-	-	-	2,8E-14	-	1,4E-14
Toluène	1,2E-09	5,1E-10	1,3E-09	1,0E-09	3,1E-10	2,7E-10	2,1E-10	-	1,8E-10	-
Trichloroéthane, 1,1,1-	1,3E-07	5,6E-08	1,4E-07	1,1E-07	3,3E-08	3,0E-08	2,2E-08	-	2,0E-08	-
Tétrachloroéthylène	2,0E-07	8,8E-08	2,2E-07	1,8E-07	5,2E-08	4,7E-08	3,5E-08	4,0E-12	3,2E-08	2,0E-12
Xylène, o-	1,3E-07	5,6E-08	1,4E-07	1,1E-07	3,4E-08	3,0E-08	2,3E-08	-	2,0E-08	-
Xylène, p-	1,1E-07	4,8E-08	1,2E-07	9,8E-08	2,9E-08	2,6E-08	1,9E-08	-	1,7E-08	-
Cyanure (à partir des eaux souterraines)	1,9E-06	8,25338E-07	2,1E-06	1,678E-06	4,9E-07	4,44223E-07	3,3E-07	0	3,0E-07	-
Somme	1,8E-04	7,9E-05	2,0E-04	1,6E-04	4,7E-05	4,3E-05	3,2E-05	7,3E-11	2,9E-05	3,6E-11



Acteur majeur de l'ingénierie de l'environnement  
et de la valorisation des territoires



**ENVIRONNEMENT**

*Évaluation, gestion et valorisation des sites et sols pollués, dossiers réglementaires, risques industriels, audits et conseils, clés en main et maîtrise d'œuvre de travaux de dépollution.*



**INFRASTRUCTURES**

*Géotechnique, fondations et terrassements, ouvrages et structures, démantèlement, déconstruction, désamiantage, déplombage, gestion et valorisation des matériaux et des déchets, aménagement du territoire, risques naturels.*



**EAU**

*Évaluation, exploitation, gestion de la ressource en eau, géothermie, eau potable et assainissement, traitement des eaux industrielles, aménagements hydrauliques et restauration écologique, sécurisation de la ressource eau.*



**MESURES ET GESTION  
DES DONNÉES**

*Mesures d'eau, de pollution atmosphérique, d'exposition professionnelle, d'air ambiant, d'air intérieur, modélisation, simulation numérique et spatialisation, systèmes d'information et data management, solutions pour le data management environnemental*

**Références :**



Gennevilliers

Portées  
communiquées  
sur demande