# KNDS AMMO FRANCE

Route de Villeneuve - La Chapelle-Saint-Ursin (18)

# Analyse des Risques Résiduels – zone 3 et zone 8 en lien avec la construction de nouveaux bâtiments



Rapport

Réf : SSP1.Q.0018-R02-V01

**OCO / MAL / AGE**

**15/07/2026**

GINGER GINGER BURGEAP Région Loire-Bretagne (Tours) • 8, 10, 12, rue du docteur Herpin
37000 Tours
Tél : 02 47 75 25 45 • GINGER BURGEAP.tours@groupeginger.com

# SIGNALÉTIQUE

## CLIENT

| | |
|---|---|
| **RAISON SOCIALE** | KNDS AMMO FRANCE |
| **COORDONNÉES** | 169 Route de Villeneuve, 18570 La Chapelle-Saint-Ursin |
| **INTERLOCUTEUR**<br>*(nom et coordonnées)* | Fabrice RODENBURG<br>Tel : 02 45 41 10 25<br>Fabrice.rodenburg@knds.fr |

## GINGER GINGER BURGEAP

| | |
|---|---|
| **ENTITÉ EN CHARGE DU DOSSIER** | GINGER GINGER BURGEAP Région Loire-Bretagne (Tours) • 8, 10, 12, rue du docteur Herpin 37000 • Tours<br>Tél : 02.47.75.25.45 • GINGER BURGEAP.tours@groupeginger.com |
| **CHEF DU PROJET** | Oriane COËFFÉ / Lotfi DRIDI<br>Tél : 07 85 33 49 77 / 06 32 36 60 60<br>o.coeffe@groupeginger.com / l.dridi@groupeginger.com |
| **COORDONNÉES Siège Social**<br>*SAS au capital de 1 200 000 euros / SIRET 682 008 222 003 79 / RCS Nanterre B 682 008 222/ Code APE 7112B / CB BNP Neuilly – S/S 30004 01925 00010066129 29* | Siège Social<br>143, avenue de Verdun<br>92442 ISSY LES MOULINEAUX<br>Tél : 01.46.10.25.70<br>E-mail : GINGER BURGEAP@groupeginger.com |

## RAPPORT

| | |
|---|---|
| **RÉFÉRENCE DE L'OFFRE** | SSP1.Q.0033-01 du 20/02/2026 |
| **RÉFÉRENCES DE LA COMMANDE (numéro et date)** | HI6060069 du 04/03/2026 |
| **RÉFÉRENCE DU RAPPORT** | SSP1.Q.0018-R02-V01 |
| **DOMAINE TECHNIQUE H4i** | GEOS431 |

## SIGNATAIRES

| DATE | Indice | Rédaction<br>Nom / signature | Vérification<br>Nom / signature | Supervision / validation<br>Nom / signature |
|---|---|---|---|---|
| 15/07/2026 | 01 | O. COËFFÉ  | M.LEFEBVRE  | A.GERARDIN  |

# SOMMAIRE

**Synthèse technique** ..... 5
**1. Introduction** ..... 9
**1.1 Objet de l'étude** ..... 9
**1.2 Codification des prestations** ..... 12
**1.3 Documents de référence et ressources documentaires** ..... 13
**2. Projet d'aménagement** ..... 14
**3. Etat des milieux** ..... 15
3.1.1 Historique succinct ..... 15
3.1.2 Etat des milieux avant travaux de réhabilitation ..... 15
3.1.3 Objectifs de réhabilitation zone 8 et zone 3 ..... 17
3.1.4 Etat de pollution après travaux ..... 18
3.1.5 Restriction d'usage suite aux travaux de réhabilitation ..... 18
3.1.6 Diagnostic complémentaire 2026 au droit des futurs aménagements ..... 23
**4. Conceptualisation de l'exposition** ..... 29
**4.1 Géologie et hydrogéologie** ..... 29
**4.2 Synthèse des impacts résiduels dans les différents milieux** ..... 29
**4.3 L'usage des milieux** ..... 29
4.3.1 Projet d'aménagement/usage pris en compte/environnement du site ..... 29
4.3.2 Enjeux/cibles à considérer ..... 30
**4.4 Voies de transferts depuis les milieux impactés vers les milieux d'exposition** ..... 30
4.4.1 Zone 3 ..... 30
4.4.2 Zone 8 ..... 30
**4.5 Voies d'exposition** ..... 31
**5. Analyse des Risques Résiduels (ARR)** ..... 34
**5.1 Contexte et méthodologie** ..... 34
**5.2 Composés et concentrations retenues dans les différents milieux – zone 3** 35
**5.3 Identification des dangers** ..... 36
**5.4 Caractérisation des Relation dose-réponse** ..... 36
**5.5 Estimation des expositions** ..... 38
5.5.1 Concentrations dans les milieux d'exposition ..... 38
5.5.2 Estimation des expositions ..... 42
**5.6 Quantification des risques sanitaires** ..... 43
5.6.1 Méthodologie ..... 43
5.6.2 Quantification des risques sanitaires résiduels au droit du site ..... 44
**5.7 Analyse des incertitudes – zone 3** ..... 44
**6. Synthèse et recommandations** ..... 48
**6.1 Synthèse** ..... 48
6.1.2 Conservation de la mémoire et recommandation ..... 49
**7. Limites d'utilisation d'une étude de pollution** ..... 50

# TABLEAUX

Tableau 1 : Ressources documentaires consultées ..... 13
Tableau 2 : Objectifs de réhabilitation sur les sols fixés par l'arrêté préfectoral N°2023-1725 ..... 17
Tableau 3 : Voies d'exposition retenues ..... 31
Tableau 4 : Concentrations retenues dans les différents milieux pour l'ARR ..... 35
Tableau 5 : Valeurs toxicologiques de référence retenues ..... 37
Tableau 6 : Paramètres retenus liés au sol ..... 39
Tableau 7 : Paramètres retenus liés aux scenarios d'aménagements ..... 40
Tableau 8 : Concentrations calculées dans l'air intérieur et extérieur ..... 41
Tableau 9 : Budgets espace/temps retenus ..... 42
Tableau 10 : Synthèse des QD et ERI ..... 44
Tableau 11 : Variables générant les incertitudes majeures de l'évaluation ..... 45

# FIGURES

Figure 1 : Localisation du site KNDS AMMO FRANCE (Source : IGN) ..... 10
Figure 2 : Localisation des zones d'étude (Source : Google Satellite) ..... 11
Figure 3 : Plan du projet d'aménagement (Source : Plan du projet d'aménagement fourni par KNDS AMMO FRANCE) ..... 14
Figure 4 : Prescription particulière de restrictions d'usages sur la zone 3 ..... 20
Figure 5 : Prescription particulière de restrictions d'usages sur la zone 8 ..... 22
Figure 6 : Localisation des investigations sur les sols (Source : Google Satellite et plan du projet d'aménagement fourni par le client – nouveaux bâtiments en bleu foncé) ..... 24
Figure 7 : Localisation des piézairs (Source : Google Satellite) ..... 25
Figure 8 : Cartographie des anomalies dans les sols en avril 2026(Sources : Google Satellite et Plan du projet d'aménagement fourni par le client) ..... 27
Figure 9 : Localisation des piézairs et synthèse des impacts dans les gaz des sols de la zone 3 ..... 28
Figure 10 : Schéma conceptuel sur l'usage futur de la zone 3 et de la zone 8 ..... 33
Figure 11 : Représentation schématique des différents modèles de calcul des transferts des sols vers l'air intérieur ..... 38

# ANNEXES

Annexe 1. Synthèse du diagnostic complémentaire sur les sols et les gaz du sol en zone 3 et 8 – avril 2026
Annexe 2. Photographie aériennes anciennes zone 8
Annexe 3. Synthèse des impacts au droit des zone 3 avant travaux de réhabilitation
Annexe 4. Synthèse des impacts au droit des zone 8 avant travaux de réhabilitation
Annexe 5. Données toxicologiques
Annexe 6. Relations dose-réponse
Annexe 7. Estimation des concentrations dans les milieux d'exposition
Annexe 8. Détails des calculs de dose et de risque

# Synthèse technique

| CONTEXTE | | |
|---|---|---|
| **Client** | KNDS AMMO FRANCE | |
| **Contexte de l'étude** | Projet de construction de nouveaux bâtiments de production sur les zones 3 et 8. | |
| **Projet d'aménagement** | • Construction de nouveaux bâtiments de production de plain-pied.<br>• Aménagement de voiries pour l'accès aux bâtiments | |
| **Informations sur le site lui-même** | Adresse du site | 169 Route de Villeneuve – La Chapelle-Saint-Ursin (18) |
| | Superficie totale | Zone 3 : 6 000 m² environ<br>Zone 8 : 124 000 m² environ |
| | Parcelles cadastrales | Zone 3 : une partie de la parcelle AI n°2<br>Zone 8 : une partie de la parcelle A n°189 et 403 |
| | Propriétaire | KNDS AMMO FRANCE |
| | Exploitant et usage actuel | KNDS AMMO France : Usine de fabrication d'armement<br>Zone 3 : Cette zone est en partie enherbée et en partie occupée par les bâtiments 79F et 39F.<br>Zone 8 : Cette zone est en friche essentiellement boisée, non bâtie et très peu fréquentée (personnel d'entretien des espaces verts et agents de sécurité chargés d'effectuer des rondes). |
| | Environnement proche | Zone 3 : Zone entourée par des bâtiments KNDS AMMO FRANCE et par une zone non exploitée enherbée au Sud-Ouest.<br>Zone 8 : Zone située dans le bois de KNDS AMMO FRANCE entourée par divers bâtiments KNDS AMMO FRANCE et par la route départementale D135. |
| | Historique connu | Zone 3 : la zone 3 abritait anciennement le bâtiment 75, l'ancienne chaufferie ainsi qu'un dallage bétonné de stockage de matériaux (acier notamment) et le bâtiment 37S (prototype).<br>Zone 8 : La zone 8 abritait une zone d'essai et de destruction de munitions sur une partie, le reste de la zone est essentiellement boisé. Aucun bâtiment n'est présent sur cette zone à l'exception d'un ou deux ouvrages maçonnés de petite taille et en ruines (environ 10 m²). |
| **Statut réglementaire** | Installation ICPE et régime | Le site KDNS AMMO France de la Chapelle Saint-Ursin est un site classé SEVESO seuil haut. |
| | Situation administrative | En cours d'exploitation |
| **Contexte géologique et hydrogéologique** | Géologie | Zone 3 :<br>• Remblais limoneux et plus ou moins sableux selon les zones jusqu'à 2 m de profondeur.<br>Zone 8 :<br>• Terre végétale jusqu'à 0,05 m de profondeur ;<br>• Remblais sablo-limoneux ou calcaire selon les zones jusqu'à 2 m de profondeur. |
| | Hydrogéologie | • Nappe contenue dans les calcaires lacustres du Berry et les calcaires du Jurassique entre 5 et 17 m de profondeur au droit du site. |

| | | |
|---|---|---|
| | | • Le sens d'écoulement des eaux est dirigé vers l'ouest/Nord-Ouest. |
| **Impacts connus sur le milieu souterrain** | **Études antérieures** | • Diagnostic environnemental du milieu souterrain – Zone 8 et zone 3 – SSP1.Q.0018.R01-V01 du 25/06/2026<br>• Dossier de restriction d'usage - GINGER BURGEAP LB3700027-P0011 : P0011-R1-v03 du 17/12/2025.<br>• Zone 8, 9 et 10 : note de fin de travaux LB3700027/ 25-ENI-RIC-656-02 du 06/05/2025<br>• Zone 3, 5 et 6 : note de fin de travaux LB3700027 / 1119330-02 du 04/03/2025<br>• Plan de Gestion zone 8 : rapport RESILB11136-01 du 22/07/2020<br>• Plan de gestion zone 3 : rapport RESILB10143-02 du 23/04/2020 |
| | Impacts milieu sols | • Zone 3 :<br>  ◦ Sur les sols, des traces en hydrocarbures C10-C40 (310 mg/kg MS) couplée à des traces en trichloroéthylène (0,12 mg/kg) au droit du sondage Z3-T1, équipé en piézair (LCH-BGP-PRZ58). Ces traces sont inférieures aux objectifs de réhabilitation de la zone 3.<br>  ◦ Présence d'hydrocarbures et COHV inférieurs aux objectifs de réhabilitation (COHV max = 0.59 mg/kg et HCT max = 1700 mg/kg)<br>• Zone 8 :<br>  ◦ Sur les sols, des traces en hydrocarbures C10-C40 (inférieures aux objectifs de réhabilitation – 32 mg/kg MS maximum) ont été quantifiées ;<br>  ◦ La présence d'anomalie résiduelle en TNT (22 mg/kg et RDX (1,4 mg/kg) à environ 25 m des futurs bâtiments. Teneurs conformes aux objectifs de réhabilitation.<br>  ◦ Absence de valeurs supérieures aux valeurs de comparaison pour les métaux, HAP, BTEX, COHV, composés énergétiques et PCB au droit des sondages situé dans l'emprise des futurs bâtiments ou à proximité. |
| | Impacts milieu eaux souterraines | Un suivi de la qualité des eaux souterraines est réalisé sur 43 ouvrages a minima depuis 2013.<br>• Zone 3 :<br>Des impacts en COHV (concentration maximale en ∑chloroethènes = 908 µg/L sur Pz35 en oct-25) et des anomalies en composés énergétiques (concentration maximale de 46 µg/L sur Pz10 en hexogène) sont toujours mis en évidence dans la nappe suite aux travaux de réhabilitation achevée en 2024 ;<br>• Zone 8<br>Les 3 ouvrages piézométriques présents en zone 8 sont implantés à plus de 100 m en aval des futurs bâtiments.<br>L'ouvrage le plus proche est le Pz8 et n'est pas suivi dans le cadre du suivi semestriel du site, car ce dernier est très régulièrement à sec. Un impact significatif en COHV est mesuré dans les eaux souterraines au droit de Pz8 sur les campagnes d'avril 2013 et mai 2014 (4 050 µg/L pour la somme des chloroéthènes). Cet impact n'a pas été retrouvé au sein du piézair (PzR13) implanté à moins d'un mètre du piézomètre. L'impact en COHV dans les eaux du Pz8 n'a pas été retrouvé lors des prélèvements suivants réalisés en avril 2018 et mars 2020 (COHV inférieur à la limite de quantification du laboratoire). |

| | | |
|---|---|---|
| | Impacts milieu gaz des sols | • Zone 3 (campagne avril 2026) :<br>  ◦ des dépassements des valeurs guides en COHV sont retrouvés dans les gaz du sol du piézair LCH-BGP-PRZ58. Après modélisation des concentrations en intérieur via le facteur précautionneux alpha (0,05), seuls les impacts en Trichloroéthylène (159,2 µg/m$^3$) et tétrachloroéthylène (112,05 µg/m$^3$) demeurent toujours supérieurs aux valeurs guides ;<br>  ◦ un dépassement en trichloroéthylène, supérieur à la valeur guide établie à 10 µg/m$^3$, au droit de LCH-BGP-PRZ59 (30 µg/m$^3$). Aucun dépassement n'est relevé après application du facteur alpha ;<br>  ◦ des dépassements en benzène, supérieurs à la valeur guide établie à 2 µg/m$^3$ au droit de LCH-BGP-PRZ58 (8,1 µg/m$^3$) et LCH-BGP-PRZ59 (2,5 µg/m$^3$). Aucun dépassement n'est relevé après application du facteur alpha.<br>• Zone 8 (campagne avril 2026) :<br>  ◦ Sur les gaz du sol, seuls des dépassements du bruit de fond urbain en aliphatiques C10-C12 (60 µg/m$^3$- seuil à 9,8 µg/m3) et en o-xylène (2,7 µg/m$^3$ de l'ordre de grandeur du seuil à 2,3 µg/m3) ont été repérés au droit de LCH-BGP-PRZ55. Ces teneurs sont inférieures aux autres valeurs guides (air intérieur et extérieur). |

| **MISSION** | | |
|---|---|---|
| **Intitulé et objectifs** | Analyse des risques sanitaires pour étudier la compatibilité des usages projetés avec la qualité des milieux souterrains dans l'emprise des zones 3 et 8. | |
| **Conceptualisation de l'exposition** | • **Conclusions sur les impacts** :<br>  ◦ Zone 3 : Anomalies en hydrocarbures C10-C40 et des traces de TCE dans les sols du sondage Z3-T1 équipé en piézair (PzR58). Impact en COHV (Trichloroéthylène et Tétrachloroéthylène) dans les gaz du sol de PzR58.<br>  ◦ Zone 8 : Absence d'anomalie dans les sols et les gaz du sol en 2026 associé à des concentrations résiduelles en explosif dans les sols de surface dont la compatibilité sanitaire est validée via l'ARR de 2020. (RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8)<br>• **Enjeux à protéger** : Les enjeux à considérer sur site sont les futurs usagers (travailleurs des futurs bâtiments).<br>• **Voies d'expositions :** l'inhalation de composés volatils. | |
| **CONCLUSION - RECOMMANDATIONS** | | |
| **Conclusion** | **Quantification des risques pour la zone 3** | Pour la zone 3<br>ERI = 2.4 X10$^{-7}$<br>QD =0.0010<br><br>Nota : Pour la zone 8 : L'analyse des données actuelles associées aux données prises en compte lors de l'analyse de risque réalisée en 2020 sur la zone 8, permet de conclure à la compatibilité sanitaire des concentrations résiduelles avec l'usage projeté sans mise à jour de calcul. |
| | **Conclusions** | **Compatibilité sanitaire en zone 3.** |

| | | |
|---|---|---|
| | | La construction des bâtiments, d'espaces verts et de voiries au droit de la zone 3, conformément au plan masse fourni en Figure 3, est compatible d'un point de vue sanitaire avec les concentrations résiduelles.<br><br>A noter que cette conclusion n'est valable que pour les conditions précisées ci-dessous :<br><br>• La réalisation d'une campagne complémentaire des gaz de sol, afin de vérifier les ordres de grandeur des concentrations mesurées en avril 2026 et ainsi confirmer les concentrations retenues dans le cadre de la présente analyse des enjeux sanitaires ;<br><br>• la mise en place d'une bonne qualité de dalle en limitant au maximum le percement de cette dernière pour le passage de réseau où le cas échéant, porter une attention particulière à l'étanchéité de ces singularités ;<br><br>• le maintien du recouvrement systématique des sols en place (dallage ou terre saine sur 30 m d'épaisseur) ;<br><br>• la mise en place des nouvelles canalisations AEP en matériaux anti-perméation et enfouies dans des tranchées comblées de sablon sain<br><br>L'analyse de risque devra être mise à jour en cas de modification des hypothèses d'aménagement retenues et notamment si l'emprise des bâtiments du projet est différente de celle présentée en Figure 3 (plan fourni par KNDS AMMO France).<br><br>**<u>Compatibilité sanitaire en zone 8.</u>**<br><br>Ainsi, la construction des bâtiments, d'espaces verts et de voiries au droit de la zone 8, conformément au plan masse fourni en Figure 3, est compatible d'un point de vue sanitaire avec les concentrations résiduelles dans la mesure où :<br><br>• aucun impact n'a été mis en évidence dans les sols de surface en 2026 ;<br><br>• que le maintien des anomalies mesurées historiquement dans les sols en composés énergétiques à environ 25 m des futurs bâtiments (sondage PM110) a été validé d'un point de sanitaire dans le cadre de l'analyse de risque réalisée en 2020 (analyse de risque référencé RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8) ;<br><br>• que les traces en hydrocarbures dans les gaz du sol mesurées en avril 2026 (en condition favorable de dégazage) sont en concentrations inférieures aux valeurs guide pour l'air intérieur après application du facteur alpha (facteur de transfert jugé plutôt sécuritaire) ;<br><br>• que l'historique de la zone ne met en évidence aucune activité autre que forestière au droit de l'emprise des futurs bâtiments<br><br>L'analyse de risques sanitaires devra être mise à jour en cas de modification des hypothèses d'aménagement retenues et notamment si l'emprise des bâtiments du projet est différente de celle présentée en Figure 3 (plan fourni par KNDS AMMO France). |
| **Recommandations** | | La mise à jour du dossier de restriction d'usage pourra être réalisée en lien avec les données environnementales de 2026.<br><br>GINGER BURGEAP conseille de rester vigilant en cas de construction de nouveaux bâtiments et d'évaluer au cas par cas la nécessité d'investigations environnementales pour vérifier la compatibilité des milieux avec les usages projetés. |

# 1. Introduction

## 1.1 Objet de l'étude

KNDS AMMO France exploite une usine de production d'armement sur son site de La Chapelle-Saint-Ursin situé route de Villeneuve (18).

Dans le cadre de l'augmentation des besoins de production, KNDS AMMO FRANCE envisage la construction de nouveaux bâtiments industriels dédiés à la production, dont certains sont implantés en Zone 3 et Zone 8 du site (anciennes zones ayant fait l'objet de travaux de réhabilitation). Un dossier de restriction d'usage concernant les zones réhabilitées a été réalisé par GINGER BURGEAP en juin 2026 (rapport GINGER BURGEAP référencé SSP1.Q0018-R01-V1 du 25/06/2026). Ce dossier prévoit la réalisation d'investigation complémentaire notamment dans le cas de changement d'usage ou de construction de nouveau bâtiment. Aussi, conformément aux prescriptions du dossier de restriction d'usage, des investigations complémentaires sur les sols et les gaz du sol ont été réalisées en avril 2026 au droit ou à proximité des futurs bâtiments dans l'emprise des zones 3 et 8.

Suite aux résultats du diagnostic environnemental complémentaire réalisé en 2026, une analyse des risques pour chaque zone est présentée dans le présent rapport afin de valider la compatibilité sanitaire du projet.

La localisation des zones d'étude et du site est présentée en **Figure 1 et Figure 2**.

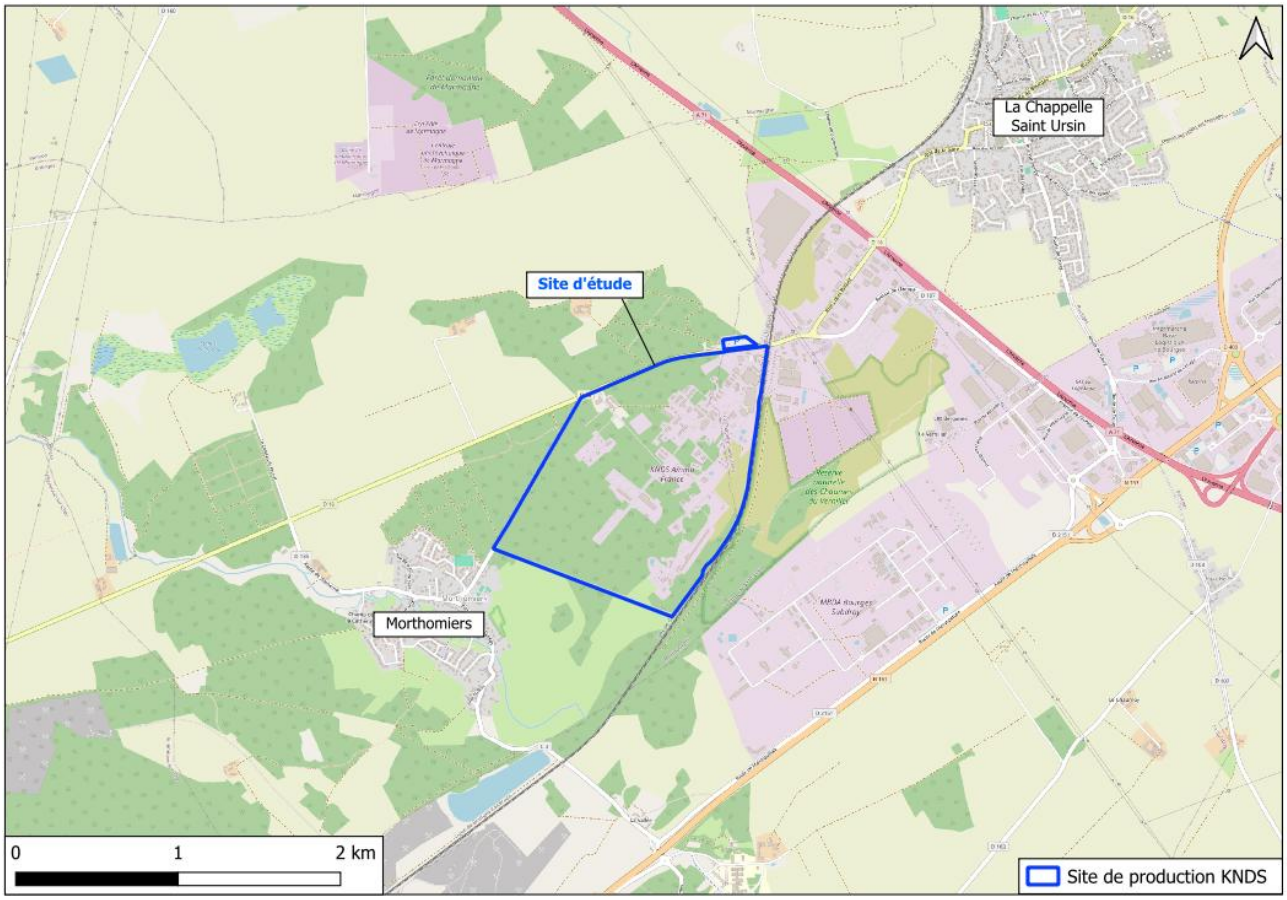



**Figure 1 : Localisation du site KNDS AMMO FRANCE (Source : IGN)**




**Figure 2 : Localisation des zones d'étude (Source : Google Satellite)**

## 1.2 Codification des prestations

La présente proposition est conforme à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués d'avril 2017 et aux exigences de la **norme AFNOR NF X 31-620 1, 2 et 5 : décembre 2021 - « Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués** », pour le domaine A : « Études, assistance et contrôle » et le domaine D : « Attestation de prise en compte des mesures de gestion de la pollution des sols et des eaux souterraines dans la conception des projets de construction ou d'aménagement ».

| Prestations élémentaires (A) concernées | | Objectifs |
|---|---|---|
| ☐ | A100 | Visite du site |
| ☐ | A110 | Études historiques, documentaires et mémorielles |
| ☐ | A120 | Étude de vulnérabilité des milieux |
| ☐ | A130 | Élaboration d'un programme prévisionnel d'investigations |
| ☐ | A200 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les sols |
| ☐ | A210 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les eaux souterraines |
| ☐ | A220 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les eaux superficielles et/ou les sédiments |
| ☐ | A230 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les gaz des sols |
| ☐ | A240 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur l'air ambiant et les poussières atmosphériques |
| ☐ | A250 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les denrées alimentaires |
| ☐ | A260 | Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les terres excavées |
| ☐ | A270 | Interprétation des résultats des investigations |
| ☐ | A300 | Analyse des enjeux sur les ressources en eaux |
| ☐ | A310 | Analyse des enjeux sur les ressources environnementales |
| ☒ | A320 | Analyse des enjeux sanitaires |
| ☐ | A330 | Identification des différentes options de gestion possibles et réalisation d'un bilan coûts/avantages |
| ☐ | A400 | Dossiers de restriction d'usage, de servitudes |

| Prestations globales (A) concernées | 1) Objectifs |
|---|---|
| ☐ AMO<br>AMO en phase études | Assister et conseiller son client pendant tout ou partie de la durée du projet, en phase études. |
| ☐ LEVE<br>Levée de doute | Le site relève-t-il de la politique nationale de gestion des sites pollués, ou bien est-il « banalisable » ? |
| ☐ INFOS | Réaliser les études historiques, documentaires et de vulnérabilité, afin d'élaborer un schéma conceptuel et, le cas échéant, un programme prévisionnel d'investigations. |
| ☐ DIAG | Investiguer des milieux (sols, eaux souterraines, eaux superficielles et sédiments, gaz des sols, air ambiant…) afin d'identifier et/ou caractériser les sources potentielles de pollution, l'environnement local témoin, les vecteurs de transfert, les milieux d'exposition des populations et identifier les opérations nécessaires pour mener à bien le projet |
| ☐ PG<br>Plan de gestion dans le cadre d'un projet de réhabilitation ou d'aménagement d'un site | Étudier, en priorité, les modalités de suppression des pollutions concentrées. Cette prestation s'attache également à maîtriser les impacts et les risques associés (y compris dans le cas où la suppression des pollutions concentrées s'avère techniquement complexe et financièrement disproportionnée) et à gérer les pollutions résiduelles et diffuses. Réalisation d'un bilan coûts-avantages (A330) qui permet un arbitrage entre les différents scénarios de gestion possibles (au moins deux), validés d'un point de vue sanitaire (A320). Préconisations sur la nécessité de réaliser, ou non, les prestations un plan de conception des travaux (PCT), un contrôle de la mise en œuvre des mesures (CONT), un suivi environnemental (SUIVI), la mise en place de restrictions d'usage et la définition des modalités de leur mise en œuvre .Précision des mécanismes de conservation de la mémoire en lien avec les scénarios de gestion proposés |
| ☐ IEM<br>Interprétation de l'État des Milieux | La prestation IEM est mise en œuvre en cas de la mise en évidence d'une pollution historique sur une zone où l'usage est fixé (installation en fonctionnement, quartier résidentiel, etc.), la mise en évidence d'une pollution hors des limites d'un site, un signal sanitaire<br>Comparable à une photographie de l'état des milieux et des usages, la prestation IEM vise à s'assurer que l'état des milieux d'exposition est compatible avec les usages existants [9]. Elle permet de distinguer les situations qui ne nécessitent aucune action particulière, peuvent faire l'objet d'actions simples de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et leurs usages constatés, nécessitent la mise en œuvre d'un plan de gestion |
| ☐ SUIVI | Suivi environnemental |
| ☐ BQ<br>Bilan quadriennal | Interpréter les résultats des données recueillies au cours des quatre dernières années de suivi<br>Mettre à jour l'analyse des enjeux concernés par le suivi sur la période sur les ressources en eau, environnementales et l'analyse des enjeux sanitaires |
| ☐ CONT<br>Contrôles | Vérifier la conformité des travaux d'investigation ou de surveillance<br>Contrôler que les mesures de gestion sont réalisées conformément aux dispositions prévues |
| ☐ XPER | Expertise dans le domaine des sites et sols pollués |
| ☐ VERIF<br>Évaluation du passif environnemental | Effectuer les vérifications en vue d'évaluer le passif environnemental lors d'un projet d'acquisition d'une entreprise |
| **Prestations globales (D) concernées** | Objectifs |
| ☐ ATTES-ALUR | Attestation à joindre aux demandes de permis de construire (PC) ou d'aménager dans les secteurs d'information sur les sols (SIS) ou au second changement d'usage (loi ALUR). |

## 1.3 Documents de référence et ressources documentaires

Les documents de référence utilisés dans le cadre de l'étude sont présentés dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1 : Ressources documentaires consultées**

| Organisme consulté | Nature des données/références |
|---|---|
| KNDS AMMO FRANCE | Plan du projet d'aménagement |
| GINGER GINGER BURGEAP | • Dossier de restriction d'usage - GINGER BURGEAP LB3700027-P0011 : P0011-R1-v03 du 17/12/2025<br>• Zone 8, 9 et 10 : note de fin de travaux LB3700027/ 25-ENI-RIC-656-02 du 06/05/2025<br>• Zone 3, 5 et 6 : note de fin de travaux LB3700027 / 1119330-02 du 04/03/2025 ;<br>• Diagnostic environnemental du milieu souterrain – Zone 8 et zone 3 – SSP1.Q.0018.R01-V01 du 25/06/2026 ;<br>• Plan de Gestion zone 8 : rapport RESILB11136-01 du 22/07/2020<br>• Plan de gestion zone 3 : rapport RESILB10143-02 du 23/04/2020 |
| IGN | Topographie, situation géographique |

## 2. Projet d'aménagement

Le projet d'aménagement prévoit notamment la construction de bâtiments industriels à usage de production en zone 3 et zone 8 (cf. bâtiment en bleu foncé sur la figure ci-après) ainsi que l'aménagement de voiries afin de raccorder ces nouveaux bâtiments au réseau existant.

Le plan du projet d'aménagement est présenté en **Figure 3**.

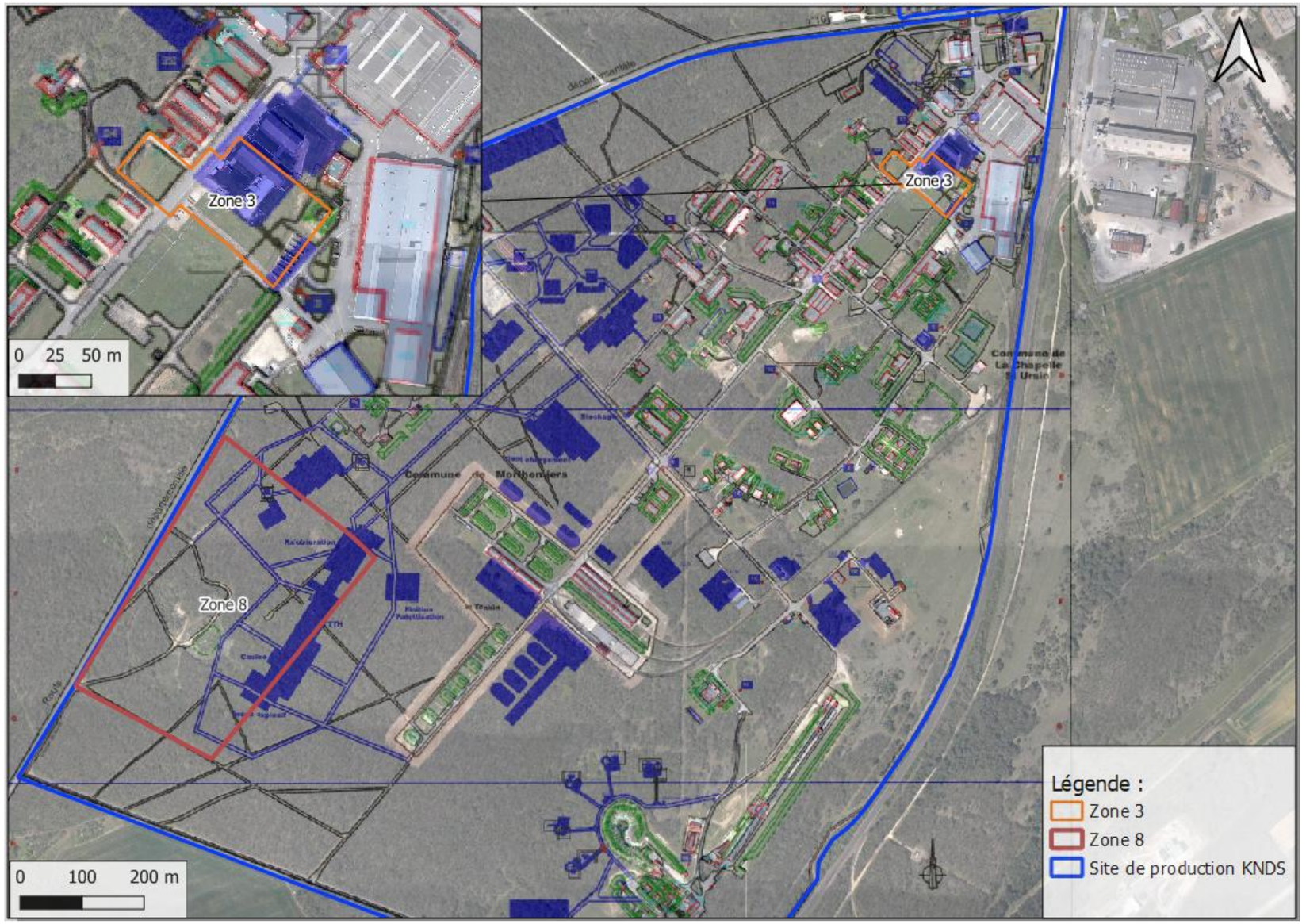



**Figure 3 : Plan du projet d'aménagement (Source : Plan du projet d'aménagement fourni par KNDS AMMO FRANCE)**

# 3. Etat des milieux

GINGER BURGEAP a été missionné par KNDS AMMO FRANCE, en 2019, pour la réalisation d'études complémentaires et de plans de gestion des impacts mis en évidence au droit du site de La Chapelle Saint-Ursin (18).

Sur la base des différentes études réalisées, les objectifs de réhabilitation dans les sols ont été fixés dans l'Arrêté Préfectoral complémentaire n°2023-1725 du 24 octobre 2023 pour chacune des zones identifiées.

Des travaux de réhabilitation ont été réalisés entre août 2022 et novembre 2024 par la société SARPI REMEDIATION. Ces travaux ont fait l'objet d'un DOE par zones de travaux rédigé par SARPI. Une note de fin de travaux a été réalisée par GINGER BURGEAP, qui a permis de valider que les concentrations résiduelles après travaux étaient compatibles pour l'usage industriel pour chaque zone.

## 3.1.1 Historique succinct

La **zone 3** est localisée en zone pyrotechnique et s'étend sur environ 6 000 m² dans la partie nord du site. Elle correspond à :

- deux anciens bâtiments (aujourd'hui démolis) d'une chaufferie (chaudière vapeur) associée à d'anciennes cuves à fioul a priori aériennes (numéro de bâtiment non connu) ;
- l'ancien atelier des moyens généraux (ancien bâtiment 75 F). D'après les témoignages recueillis par GINGER BURGEAP, il semble que 2 fosses de vidange étaient présentes au nord-ouest du bâtiment 75 F (hors emprise nouveau bâtiment) ;
- une zone de stockage de matériaux et de maintenance des anciennes locomotives, située en limite avec la zone 7, située au sud de la zone 3. L'emprise des futurs bâtiments est située au droit d'une ancienne zone de stockage et des bâtiments 79F et 39F qui seront démolis à terme.

La **zone 8** est localisée en zone pyrotechnique dans la partie sud-ouest du site. Une partie de la zone d'étude correspond à une ancienne zone d'essai et de destruction de munitions. Le reste de la zone d'étude est essentiellement boisée. Aucun bâtiment n'est présent sur cette zone à l'exception d'un ou deux bâtiments de petite taille (environ 10 m²) en ruine.

**Les nouveaux bâtiments prévus dans l'emprise de la zone 8 sont implantés en zone boisée n'ayant fait l'objet d'aucune activité notable à l'exception d'un secteur d'emprise limitée qui a fait l'objet d'un défrichage dans les années 70-80 (cf Annexe 2).**

## 3.1.2 Etat des milieux avant travaux de réhabilitation

### Au droit de la zone 3 (cf. localisation Annexe 3)

- **Sur le milieu sol**
  - une zone de pollution concentrée en hydrocarbures C10-C40 dans les sols situés au niveau de l'ancienne chaufferie et maintenance des locomotives, entre la surface et 6 m de profondeur, et plus précisément :
    - au niveau de la route d'accès de la zone pyrotechnique du site ;
    - en partie Est au droit d'une zone aujourd'hui enherbée ;
    - sous une dalle bétonnée accueillant actuellement du stockage (à proximité immédiate des futurs bâtiments) ;
  - une zone de pollution concentrée en métaux au droit du sondage LCH47 (Sb= 23 mg/kg MS et Pb= 300 mg/kg MS entre 1 et 1,7 m de profondeur) et en mercure au droit du sondage LCH43M (Hg=1,3 mg/kg MS entre 1 et 1,5 m de profondeur) - hors emprise des futurs bâtiments;

- une zone de pollution concentrée en COHV au droit du sondage LCH47 entre 0,3 et 1 m de profondeur - hors emprise des futurs bâtiments.

- **Sur le milieu gaz du sol**

Cinq piézairs étaient installés au niveau de la zone 3 (Pzr6, Pzr12, Prz16 et Pzr33 – cf localisation Figure 4 et en Annexe 3). Les résultats mettaient en évidence avant travaux :

- Des impacts en hydrocarbures de l'ordre de 1 000 à 6 000 µg/m$^3$ en juillet 2013 puis diminution des concentrations en 2014 avec des teneurs qui passent en dessous de la limite de quantification du laboratoire ;
- Des impacts en TCE sur Pzr6 (Cmax =390 µg/m$^3$) et en moindre mesure sur Pzr3 (44 µg/m3 en septembre 2014) ;
- des impacts en PCE de l'ordre de 100 µg/m$^3$ sur Pzr12 ;
- des impacts en BTEX sur Pzr33 en 2014 (Cmax = 1 129 µg/m$^3$) avec présence de benzène (environ 100 µg/m$^3$).

**A noter qu'aucun piézair n'était implanté sur les emprises des futurs bâtiments (objet du présent rapport). Une analyse d'air intérieur a été réalisée au sein d'un bâtiment qui sera démoli à l'issue du projet (bat 79 F) et se situant dans l'emprise des futurs bâtiments. Les teneurs mesurées en intérieur étaient du même ordre de grandeur que les concentrations en extérieur et inférieures aux valeurs guide.**

- **Sur le milieu eaux souterraines – Pz20**
  - présence d'anomalies en Hydrocarbures entre 300 à 600 µg/L et traces de BTEX (2 µg/L) avec présence de Benzène ;
  - fait marquant en sept 2014 : [HC] = 45 000 mg/kg et sonde grasse constatée ;
  - présence de traces de COHV avec présence de CV du même ordre de grandeur que le DCE (entre 1 et 2 µg/L) ;.

La synthèse des résultats avant travaux est présentée en **Annexe 3**.

### Au droit de la zone 8 (cf. Annexe 4)

- **Sur le milieu sol**
  - une zone de pollution concentrée en composés énergétiques (TNT et hexogène (RDX)) en PM22 et PM127. Sur ce dernier sondage, des anomalies en hydrocarbures ont également été mis en évidence ;
  - un impact ponctuel en Cuivre (2 000 mg/kg MS) et en Zinc (2 200 mg/kg MS) entre 0 et 0,35 m de profondeur sur PM28 réalisé en mai 2014. Des impacts concentrés en Chrome (16 000 mg/kg MS), Cuivre (890 mg/kg MS), Plomb (1 400 mg/kg MS), Cadmium (9,4 mg/kg MS) et Mercure (28 mg/kg MS) également mis en évidence sur les sondages réalisés en octobre 2019. Les teneurs mesurées sont supérieures de 20 à 70 fois le bruit de fond national au droit des sondages PM127, PM125, PM122, PM112 et PM28. Les impacts sont souvent relevés dès la surface.

**A noter que ces pollutions historiques (qui ont fait l'objet de travaux de réhabilitation achevés en 2024) sont situés en dehors de l'emprise des bâtiments du projet. Les sondages réalisés les plus proches des futurs bâtiments sont PM114 et PM110 (situés à 25-30 m à l'ouest). À l'exception du sondage PM110 qui présente des anomalies (inférieurs aux objectifs de réhabilitation) en TNT (22 mg/kg) et des traces en RDX (1.4 mg/kg) les restent des substances analysées (métaux, HAP, BTEX, COHV, composés énergétiques) sont non quantifiés ou inférieures aux valeurs de comparaisons.**

- **Sur le milieu eaux souterraines**

Les 3 ouvrages piézométriques présents en zone 8 sont implantés à plus de 100 m en aval des futurs bâtiments.

L'ouvrage le plus proche est le Pz8 et n'est pas suivi dans le cadre du suivi semestriel du site, car ce dernier est très régulièrement à sec (cf. localisation sur la **Figure 5**). Un impact significatif en COHV est mesuré dans les eaux souterraines au droit de Pz8 sur les campagnes d'avril 2013 et mai 2014 (4 050 µg/L pour la somme des chloroéthènes). Cet impact n'a pas été retrouvé au sein du piézair (PzR13) implanté à moins d'un mètre du piézomètre. L'impact en COHV dans les eaux du Pz8 n'a pas été retrouvé lors des prélèvements suivants réalisés en avril 2018 et mars 2020 (COHV inférieur à la limite de quantification du laboratoire).

- **Sur le milieu gaz du sol**

2 piézairs ont été prélevés sur la zone 8. Ces derniers sont implantés hors de l'emprise des futurs bâtiments et à plus de 100 m de ces derniers. Seules des traces en COHV (<56 µg/m$^3$) et en toluène (51 µg/m$^3$) avaient été mises en évidence avant les travaux de réhabilitation réalisé entre 2022 et 2024.

### 3.1.3 Objectifs de réhabilitation zone 8 et zone 3

Les objectifs de réhabilitation fixés pour les zones 8 et 3, encadrés par l'arrêté préfectoral n°2023-1725 du 24 octobre 2023 sont présentés ci-après. Ces objectifs ont été validés par une Analyse de Risque Résiduels pour les usages suivants :

- Zone 3 : usage industriel avec bâtiment sauf pour un secteur spécifique ou des études complémentaires étaient requises en cas de construction d'un bâtiment. L'analyse de risque prévoyait le recouvrement systématique des sols (cf Figure 4) ;
- Zone 8 : usage ponctuel sans poste fixe (entretiens d'espace vert, gardiennage équivalent à une fréquentation de 2h par jour) avec absence de bâtiment.

**Tableau 2 : Objectifs de réhabilitation sur les sols fixés par l'arrêté préfectoral N°2023-1725**

| Zones | Composés | Technique de réhabilitation | Objectif de réhabilitation sur les sols |
|---|---|---|---|
| Zone 3 | Hydrocarbures dans les sols | Traitement biologique sur site (biotertre) | Hydrocarbures C10-C40 = 2 500 mg/kg MS |
| | Métaux et métalloïdes dans les sols | Excavation et évacuation hors site | Antimoine : 2,4 mg/kg MS<br>Mercure : 0,1 mg/kg MS<br>Plomb : 50 mg/kg MS |
| Zone 8 | Explosifs (TNT et hexogène) dans les sols | Excavation et traitement par hydrolyse alcaline sur site | TNT : 51 mg/kg MS<br>Hexogène : 38 mg/kg MS |
| | Hydrocarbures dans les sols | Excavation et traitement par hydrolyse alcaline sur site | Hydrocarbures C10-C40 = 2 500 mg/kg MS |
| | Métaux et métalloïdes dans les sols | Confinement sur site par recouvrement | Arsenic : 15 mg/kg MS<br>Cadmium : 0,8 mg/kg MS<br>Chrome : 130 mg/kg MS<br>Cuivre : 220 mg/kg MS |

| Zones | Composés | Technique de réhabilitation | Objectif de réhabilitation sur les sols |
|---|---|---|---|
| | | | Mercure : 1,5 mg/kg MS<br>Plomb : 52 mg/kg MS<br>Zinc : 120 mg/kg MS |

À noter qu'un des objectifs fixés dans le cadre du plan de gestion de la zone 3 sur les COHV (∑COHV < 2 mg/kg) n'a pas été repris dans l'arrêté préfectoral. Il a néanmoins été maintenu comme objectif des travaux de réhabilitation.

Aucun traitement de la nappe n'a été engagé au droit du site (aucun objectif nappe). Un suivi de la qualité des eaux souterraines sur et hors site est réalisé de manière trimestrielle sur 43 ouvrages. GINGER BURGEAP précise qu'une Interprétation de l'état des milieux a été réalisée en 2019 pour valider la compatibilité sanitaire des impacts en nappe (avant travaux de réhabilitation) relevés hors site (rapport GINGER BURGEAP _ IEM eaux souterraines référencée RESILB1036-01 du 14/11/2019 et IEM au droit de la ferme des Ignoux référencée RESILB10542-01 du 05/03/2019).

### 3.1.4 Etat de pollution après travaux

**Au droit de la zone 3** : Les anomalies dans les sols supérieurs aux objectifs de réhabilitation ont été terrassés et traités sur site ou hors site. Les travaux ont été réceptionnés par le biais d'une analyse composite pour chaque bord et fond de fouille. Les concentrations en hydrocarbures C10-C40, en COHV et en métaux après travaux sont conformes aux objectifs de réhabilitation.

À noter que la concentration maximale mesurée dans les sols en COHV après travaux est de 0.54 mg/kg en TCE et la concentration maximale en hydrocarbures est de 1 700 mg/kg (répartition carbonée variable selon les zones dépolluées).

Concernant la qualité des eaux souterraines dans le secteur de la zone 3, on notera que depuis la fin des travaux de réhabilitation en 2024, les piézomètres en aval (Pz10 et Pz35 – cf. localisation sur la **Figure 4)** présentent toujours des anomalies en hexogène (concentration maximale de 46 µg/L sur Pz10 en septembre 24) et toujours des impacts en COHV (concentration maximale en ∑chloroethènes = 908 µg/L sur Pz35 en oct-25).

**Au droit de la zone 8** : Les anomalies en hydrocarbures, TNT et hexogène dans les sols supérieurs aux objectifs de réhabilitation ont été terrassés et traités sur site. Les travaux ont été réceptionnés par le biais d'une analyse composite pour chaque bord et fond de fouille. Les concentrations en composés énergétiques et en hydrocarbures après travaux sont conformes aux objectifs de réhabilitation. En outre, les anomalies en métaux supérieurs aux objectifs de réhabilitation ont été recouverts par 30 cm de terres saines et conformes aux objectifs de réhabilitation.

### 3.1.5 Restriction d'usage suite aux travaux de réhabilitation

À l'issue de la réception des travaux, un dossier de restriction d'usage a été réalisé par GINGER BURGEAP rapport : LB3700027-P0011 : P0011-R1-v03 du 17/12/2025.

Un certain nombre de prescriptions générales et particulières a été émis dans le cadre du dossier de servitude.

Les prescriptions particulières pour chaque zone sont rappelées ci-dessous.

- **Prescriptions particulières sur la zone 3**

  Prescription n°23 : Un recouvrement par au moins 30 cm de terre végétale saine ou un revêtement de type enrobé ou dalle bétonnés doit être assuré sur la totalité de l'emprise des zones 2, 3, 5, 6 et 7[ …]. Il ne devra pas être porté atteinte à cette couverture des sols. Toute intervention sur le sol ou le sous-sol ne sera, en conséquence, autorisée qu'à la condition que :

Prescription n°25 : La construction de bâtiment au droit de l'ancien PzR33 et de l'ancienne dalle bétonnée, actuellement utilisée en espace vert, devra faire l'objet d'analyses environnementales complémentaires (gaz du sol à minima). Suite à l'évolution des concentrations, le nouvel usage devra être validé d'un point de vue sanitaire par un bureau d'étude spécialisé.

La cartographie des restrictions d'usage de la zone 3 est présentée ci-après.

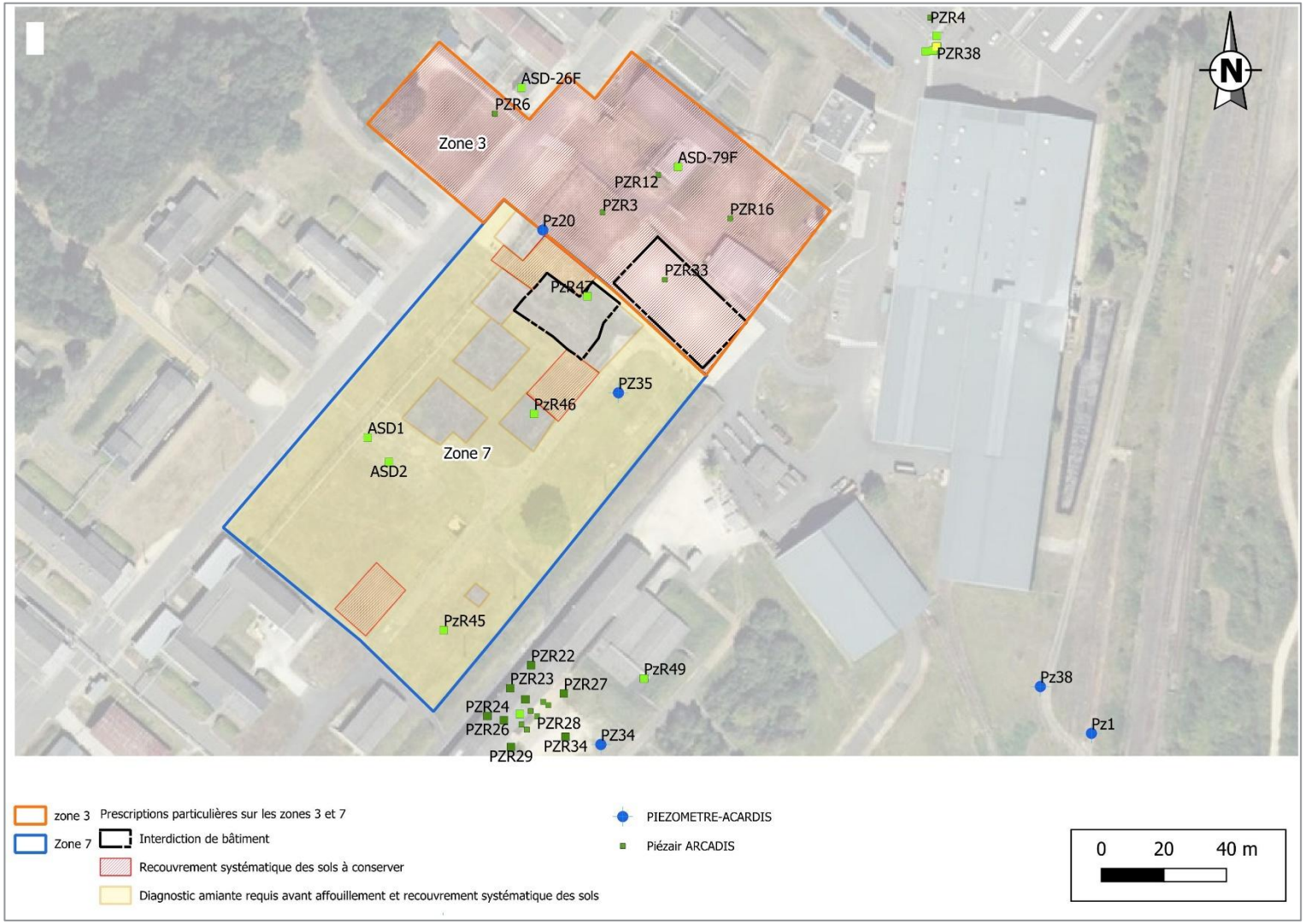



**Figure 4 : Prescription particulière de restrictions d'usages sur la zone 3**

- **Prescriptions particulières sur la zone 8**

Prescription n°30 : L'usage de cette zone doit rester occasionnel (entretien des espaces verts et personnel de sécurité).

Prescription n°31 : La construction de nouveau bâtiment est interdite sans que ce changement d'usage n'ait fait l'objet d'une validation par un bureau d'étude spécialisé. En effet, si cet usage est envisagé, il conviendra de mettre à jour l'analyse de risque, voire de réaliser des investigations environnementales complémentaires si les données connues sont jugées insuffisantes pour valider le nouvel usage.

Prescription n°32 : Un recouvrement par au moins 30 cm de matériaux sains ou un revêtement de type enrobé ou dalle bétonnée doit être assuré sur la totalité des zones ayant fait l'objet de traitement des pollutions métalliques par confinement. Il ne devra pas être porté atteinte à cette couverture des sols. Toute intervention sur le sol ou le sous-sol ne sera, en conséquence, autorisée qu'à la condition que la couverture initiale soit restaurée dans son intégralité ou qu'un recouvrement d'un niveau au moins équivalent soit mis en place (dalle bétonnée, enrobée ou recouvrement par au moins 30 cm de matériaux sains).

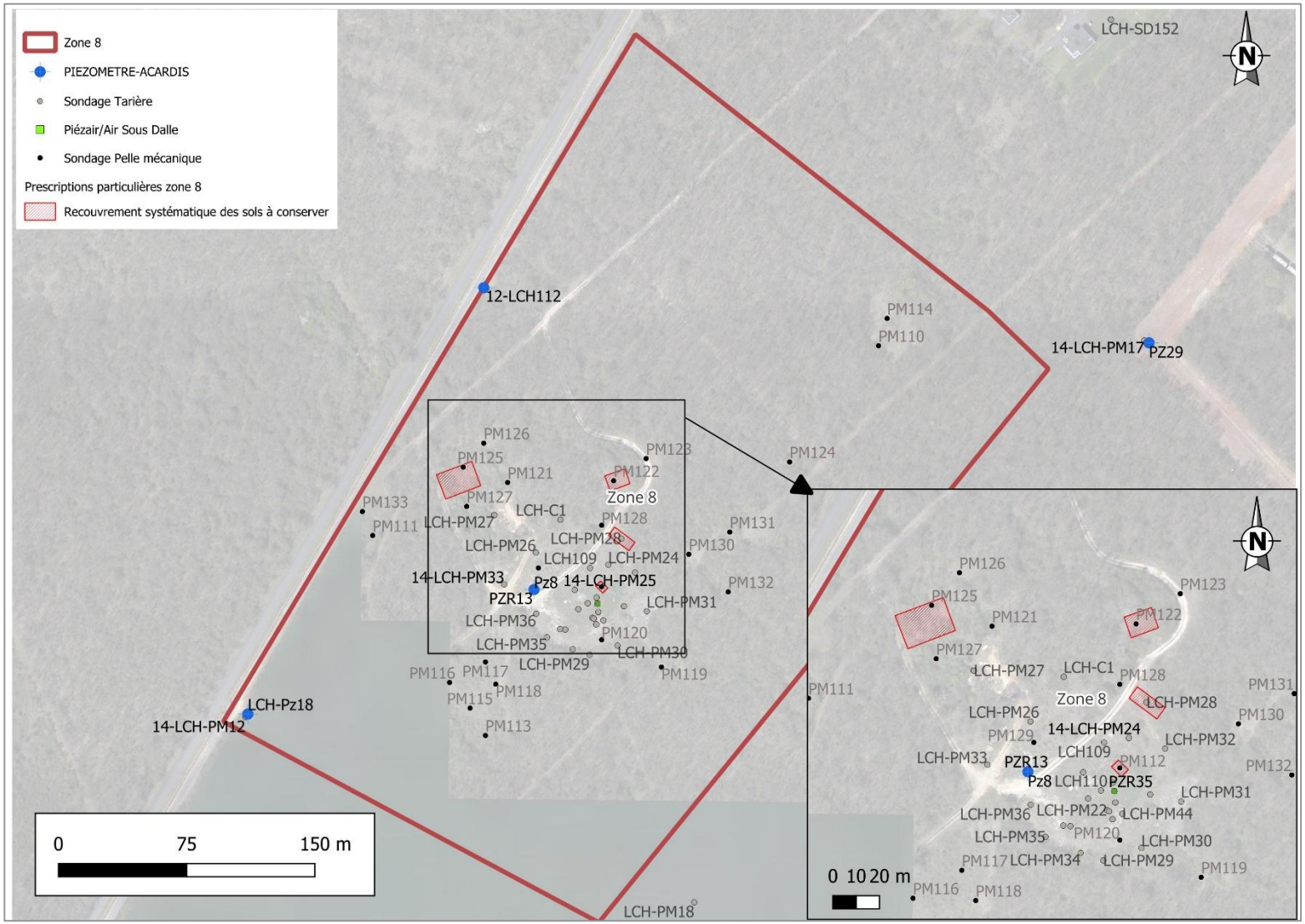



**Figure 5 : Prescription particulière de restrictions d'usages sur la zone 8**

### 3.1.6 Diagnostic complémentaire 2026 au droit des futurs aménagements

Un diagnostic complémentaire sur les sols (sondage tarière) et les gaz du sol a été réalisé par GINGER BURGEAP en avril 2026. L'objectif des investigations mises en œuvre est de vérifier la qualité des sols et des gaz du sol au droit de chaque zone afin de pouvoir évaluer la compatibilité sanitaire du changement d'usage conformément au dossier de restrictions d'usages.

7 sondages de sols à la tarière mécanique ont été réalisés jusqu'à 2 m maximum ou jusqu'au refus dont 2 sondages dans la zone 3 (tous équipés en piézair entre 1 et 1.5 m de profondeur) et 5 dans la zone 8 dont 3 équipés en piézair entre 1 et 1.5 m de profondeur. La localisation des investigations est présentée sur les **Figure 6** et **Figure 7** ci-après. Les sondages et piézairs ont été réalisés au droit ou à proximité immédiate des futurs bâtiments.

Les résultats sur les sols et sur les gaz du sol sont synthétisés en **Annexe 1** .

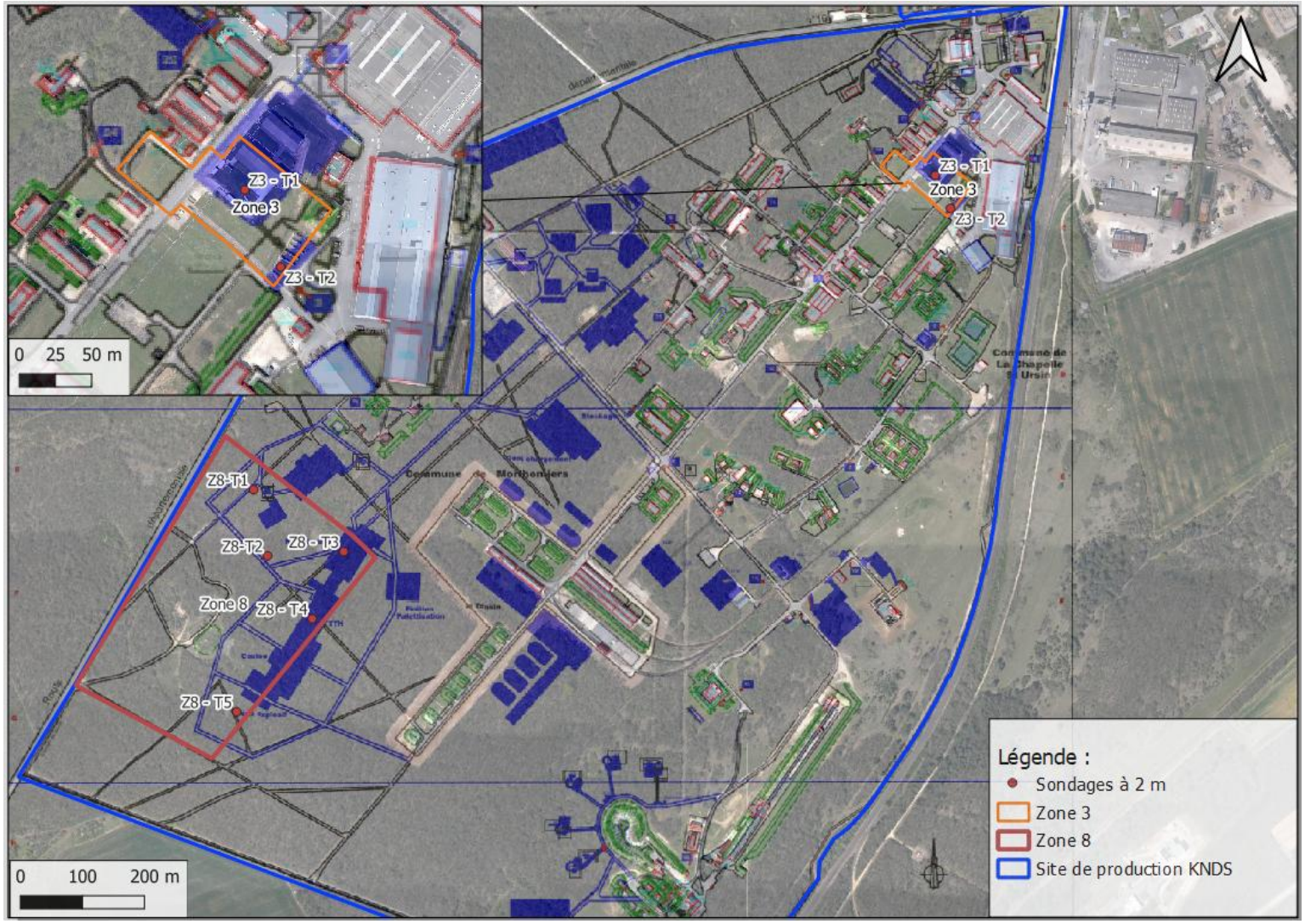



**Figure 6 : Localisation des investigations sur les sols (Source : Google Satellite et plan du projet d'aménagement fourni par le client – nouveaux bâtiments en bleu foncé)**

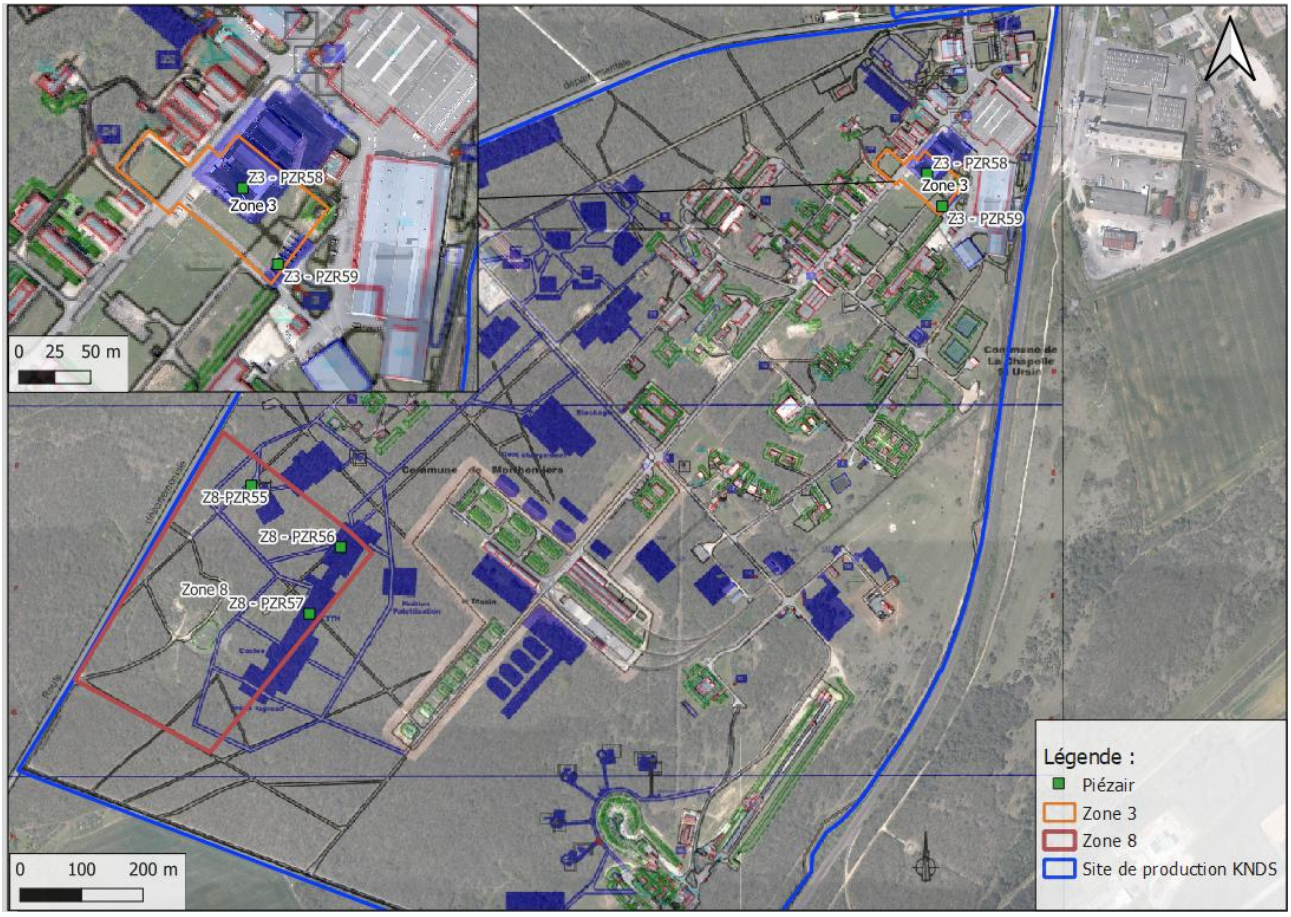



**Figure 7 : Localisation des piézairs (Source : Google Satellite)**

**<u>Au droit de la zone 3 :</u>**

Les investigations de 2026 dans l'emprise du projet mettent en évidence :

- Sur les sols, une anomalie en hydrocarbures C10-C40 (310 mg/kg MS) couplée à des traces de trichloroéthylène (0,12 mg/kg) au droit du sondage Z3-T1, équipé en piézair (LCH-BGP-PRZ58). À noter que les métaux n'ont pas été analysés compte tenu de la restriction d'usage liée au recouvrement des sols superficiels.
- Sur les gaz du sol,
  - des dépassements des valeurs guides en COHV sont retrouvés dans les gaz du sol du piézair LCH-BGP-PRZ58 (présentant des traces en TCE dans les sols). Après modélisation des concentrations en intérieur via le facteur alpha (0,05), seuls les impacts en Trichloroéthylène (159,2 µg/m$^3$) et tétrachloroéthylène (112,05 µg/m$^3$) demeurent toujours supérieurs aux valeurs guides ;
  - un dépassement en trichloroéthylène, supérieur à la valeur guide établie à 10 µg/m$^3$, au droit de LCH-BGP-PRZ59 (30 µg/m$^3$). Aucun dépassement après application du facteur alpha n'est relevé sur cet ouvrage ;
  - des dépassements en benzène, supérieurs à la valeur guide établie à 2 µg/m$^3$ au droit des 2 piézairs (8,1 µg/m$^3$ maximum). Aucun dépassement après application du facteur alpha n'est relevé.
  - des concentrations inférieures aux valeurs guides après application du facteur alpha pour le reste des composés analysés (cf. détail en **Annexe 1).**

**Au droit de la zone 8 :**

Les investigations de 2026 dans l'emprise du futur projet mettent en évidence :

- Sur les sols :
  - de faibles teneurs en hydrocarbures C10-C40 au droit du sondage T8 (inférieures aux objectifs de réhabilitation). La concentration maximale mesurée est de 31,8 mg/kg (fractions majoritaires : C10-C16). Sur le reste des échantillons, les teneurs en hydrocarbures sont inférieures aux seuils de quantification du laboratoire ;
  - absence de détection des HAP, BTEX, COHV, composés énergétiques et PCB au-delà de la limite de quantification du laboratoire ;
  - des concentrations en métaux et metalloïde inférieures au bruit de fond national ;
- Sur les gaz du sol :
  - seuls des dépassements du bruit de fond urbain en hydrocarbures aliphatiques C10-C12 (60 µg/m$^3$) et en o-xylène (2,7 µg/m$^3$) ont été quantifiés au droit de LCH-BGP-PRZ55. Ces teneurs sont inférieures aux valeurs guides (air intérieur et extérieur) après application du facteur alpha. À noter que les traces d'hydrocarbures au droit de LCH-BGP-PRZ55 sont cohérentes avec l'historique du site, car mesurées dans le seul secteur ayant historiquement fait l'objet d'un défrichage sur les photographies aériennes anciennes.

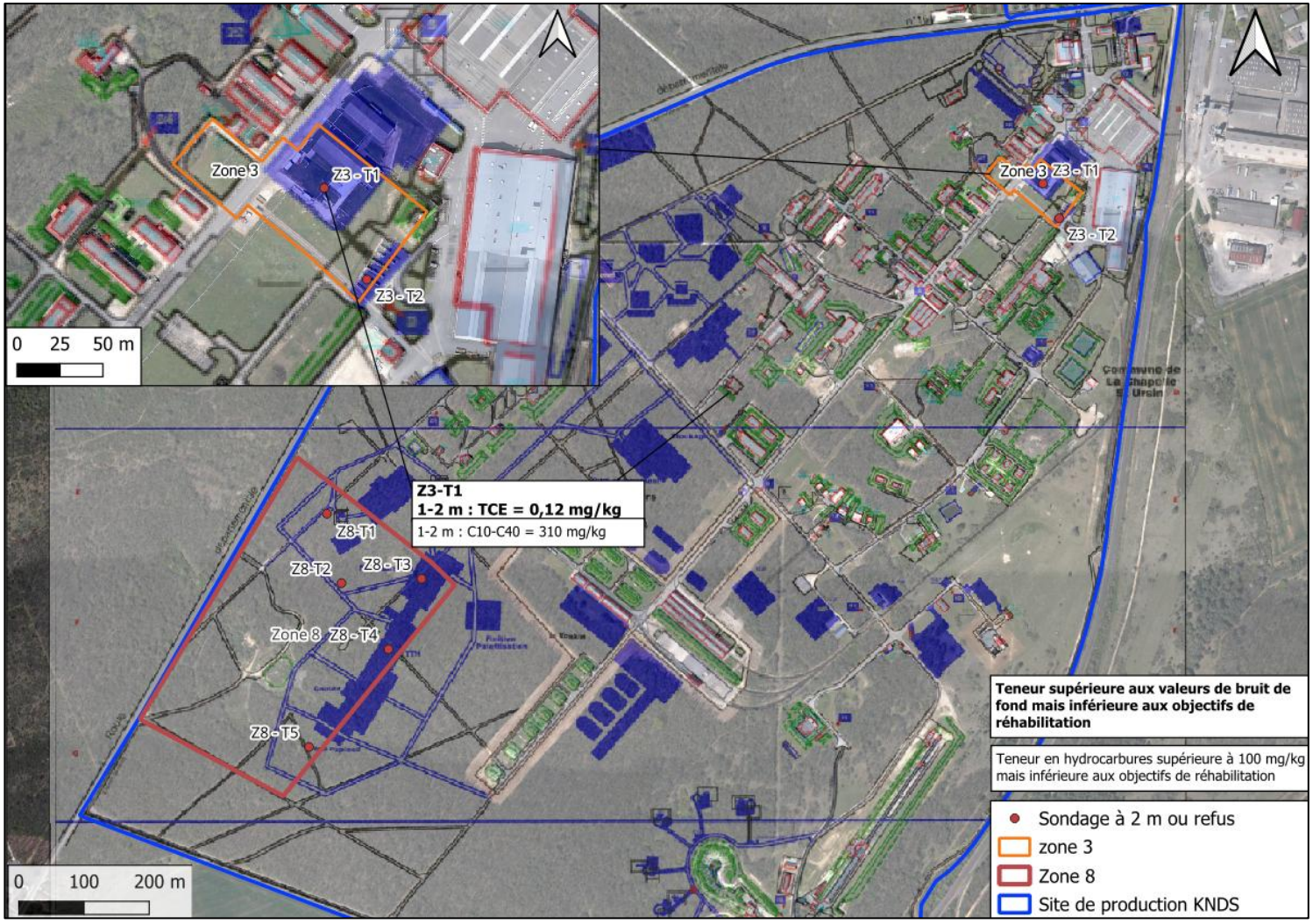



**Figure 8 : Cartographie des anomalies dans les sols en avril 2026(Sources : Google Satellite et Plan du projet d'aménagement fourni par le client)**

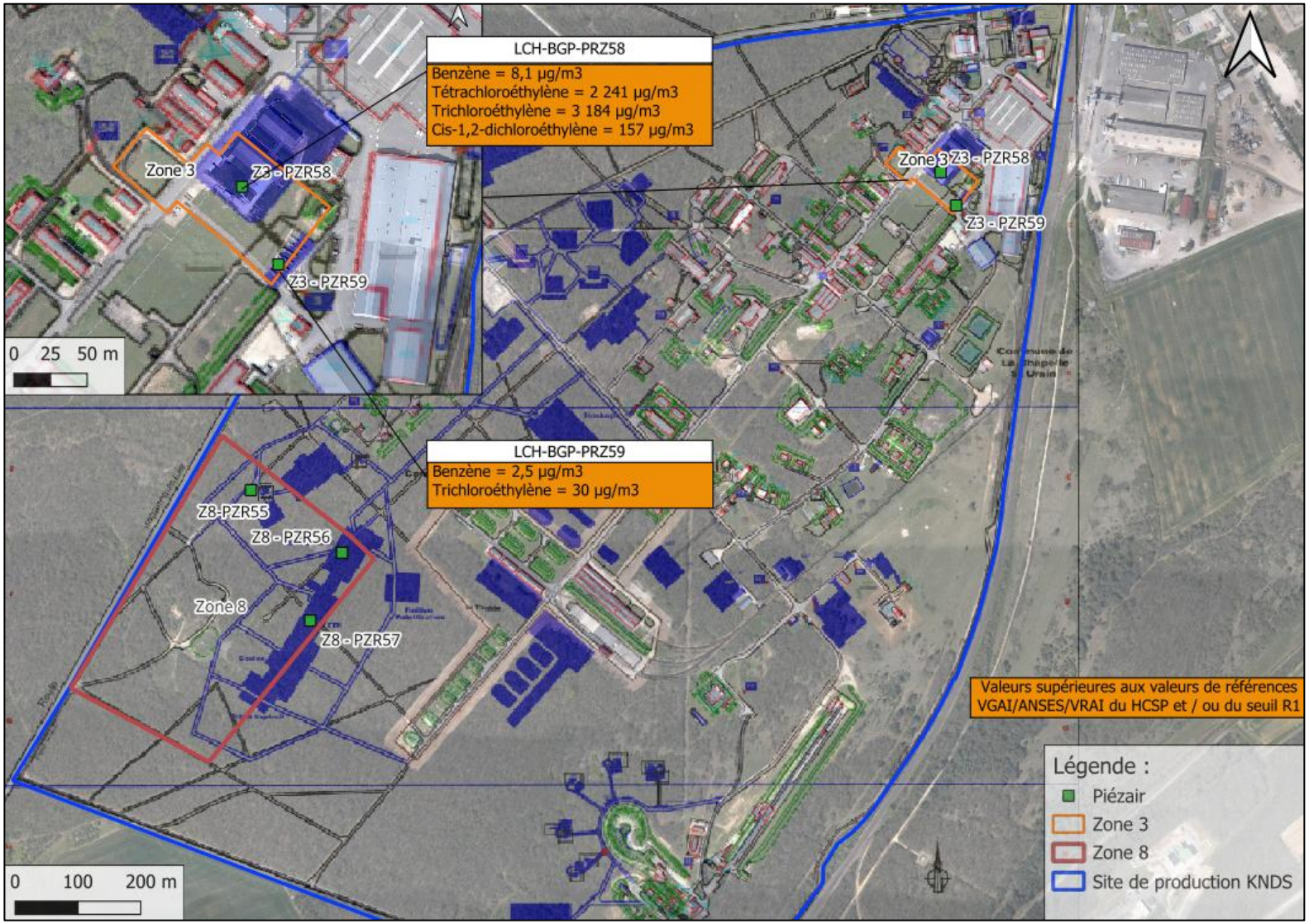



**Figure 9 : Localisation des piézairs et synthèse des impacts dans les gaz des sols de la zone 3**

# 4. Conceptualisation de l'exposition

Le schéma conceptuel est présenté de façon à visualiser :

- la ou les sources de pollution,
- les voies de transfert possibles,
- les milieux d'exposition.
- les cibles potentielles,

Il est présenté et discuté dans les paragraphes suivants.

Le schéma conceptuel mis à jour à l'issue du diagnostic environnemental du site et pour les usages futurs envisagés est présenté sur la **Figure 10.**

## 4.1 Géologie et hydrogéologie

**Nature des terrains :**

- Zone 3 :
  - Remblais limoneux et plus ou moins sableux selon les zones jusqu'à 2 m de profondeur.
- Zone 8 :
  - Terre végétale jusqu'à 0.05 m de profondeur ;
  - Remblais sablo-limoneux ou calcaire selon les zones jusqu'à 2 m de profondeur.

**Hydrogéologie (nappe la plus proche) :**

- Nappe contenue dans les calcaires lacustres du Berry et les calcaires du Jurassique entre 5 et 17 m de profondeur.
- Le sens d'écoulement des eaux est supposé dirigé vers l'ouest/Nord-Ouest.

## 4.2 Synthèse des impacts résiduels dans les différents milieux

Les anomalies mis en évidence au droit ou à proximité des futurs bâtiments compris dans l'emprise des zones 3 et 8 du site KNSD AMMO FRANCE de La Chapelle-Saint-Ursin sont les suivantes :

- Zone 3 : Anomalies en hydrocarbures C10-C40 et trace en TCE dans les sols du sondage Z3-T1 équipé en piézair (PzR58). Impact en COHV (Trichloroéthylène et Tétrachloroéthylène) dans les gaz du sol de PzR58 et PzR 59.
- Zone 8 : Aucune anomalie significative relevé en 2026 dans les sols (traces en hydrocarbures non significatives) et traces d'hydrocarbures dans les gaz du sol (HC C6-C10 et BTEX). Des concentrations résiduelles en explosifs sont également présents à environ 15 m de l'emprise des futurs bâtiments à des teneurs inférieurs aux objectifs de réhabilitation fixés pour cette zone lors des travaux de réhabilitation achevée en 2024.

## 4.3 L'usage des milieux

### 4.3.1 Projet d'aménagement/usage pris en compte/environnement du site

Le projet d'aménagement qui nous a été communiqué par le maitre d'ouvrage prévoit la construction de nouveaux bâtiments pour les besoins de la production.

Une partie des bâtiments sera dédiée à la production d'armement et une partie des bâtiments pourra être occupée par des bureaux. Le projet prévoit également la construction de nouveaux axes routiers pour desservir les nouveaux bâtiments.

Les informations suivantes ont pu être recueillies auprès du maître d'ouvrage :

- mode constructif : non connu à ce stade
- le projet ne prévoit aucun sous-sol ;
- la ventilation des bâtiments ne nous a pas été communiquée à ce stade ;
- recouvrement des sols hors bâtiment par de la terre végétale, enrobée ou béton au droit de la zone 3 conformément au dossier de restriction d'usage.

### 4.3.2 Enjeux/cibles à considérer

Les enjeux à considérer **sur site** sont les futurs usagers du site (adultes travailleurs).

**Aucun enjeu hors site ne sera considéré dans le cadre de cette analyse de risque** dans la mesure où une Interprétation de l'Etat des Milieux a été réalisée avant les travaux de réhabilitation qui conclut à la compatibilité sanitaire des concentrations hors site avec les usages (rapport GINGER BURGEAP _ IEM eaux souterraines référencé RESILB1036-01 du 14/11/2019 et IEM au droit de la ferme des Ignoux référencé RESILB10542-01 du 05/03/2019).

## 4.4 Voies de transferts depuis les milieux impactés vers les milieux d'exposition

### 4.4.1 Zone 3

Au droit des zones recouvertes par des bâtiments ou un revêtement spécifique, la voie de transfert à considérer est la volatilisation des composés volatils (hydrocarbures et solvants chlorés).

Conformément au dossier de restriction d'usage, les nouvelles canalisations d'eau potable devront être en matériaux anti-perméation et devront être posées dans un sablon sain. Ainsi, le transfert par perméation au travers des conduites d'eau potable ne sera pas retenu dans le cadre de cette analyse de risque.

En outre, l'ensemble de sols de surface sera considéré recouvert à l'issue du projet au droit de la zone 3, aussi l'envol de poussières contenant des polluants, l'emport de polluants par les eaux de ruissellement ne sera pas retenu sur la zone 3.

Le transfert vers les eaux souterraines est retenu en première approche.

### 4.4.2 Zone 8

Au droit des zones recouvertes par des bâtiments ou un revêtement spécifique, la voie de transfert à considérer est la volatilisation des composés volatils (trace d'hydrocarbures dans les gaz du sol). La présence d'anomalie en TNT relevé à proximité de l'emprise des futurs bâtiments (PM110 – cf paragraphe 3.1.2) ne sera pas prise en compte en zone recouverte compte tenu de la faible volatilité de ces composés.

Au droit des espaces non recouverts, les voies de transfert par envol de poussières contenant des polluants et l'emport de polluants par les eaux de ruissellement sont retenue en première approche dans la mesure où des anomalies en composés énergétiques sont mises en évidence dans les sols à proximité de l'emprise des futurs bâtiments (PM110 – cf paragraphe 3.1.2). En outre, la voie de transfert par volatilisation des composés volatils (trace d'hydrocarbures dans les gaz du sol en 2026) sera également prise en compte sur les sols non recouverts.

Conformément au dossier de restriction d'usage, les nouvelles canalisations d'eau potable devront être en matériaux anti-perméation et devront être posées dans un sablon sain. Ainsi, le transfert par perméation au travers des conduites d'eau potable ne sera pas retenu dans le cadre de cette analyse de risque.

## 4.5 Voies d'exposition

La sélection des voies d'exposition ainsi que l'argumentaire de cette sélection sont présentés dans le **Tableau 3**.

**Tableau 3 : Voies d'exposition retenues**

| VOIES D'EXPOSITION | Zone 3 | RAISON DE LA SELECTION | Zone 8 | RAISON DE LA SELECTION |
|---|---|---|---|---|
| | Adultes travailleurs | | Adultes travailleurs | |
| Inhalation de polluant sous forme gazeuse | **Oui** | Du fait de la présence de composés volatils dans les sols, les gaz du sol et la nappe | Non | Traces non significatives d'hydrocarbures dans les sols (proche de la limite de quantification du laboratoire yc pour les fractions volatil – 30 mg/kg). Cette absence d'impact est confirmée par les analyses sur les gaz du sol qui présentent des traces en hydrocarbures qui restent **inférieurs aux valeurs guide pour l'air intérieur après application du facteur alpha**. En outre, les gaz du sol sont également intégrateurs des impacts éventuellement présents en nappe. Malgré la présence d'impact relevé en COHV avant 2018 en aval de la zone 8, la volatilisation des composés vers les futurs bâtiments semble négligeable (absence de COHV quantifié dans les gaz du sol). |
| Inhalation de polluant adsorbé sur les poussières du sol | Non | En raison de la couverture des sols (dallage, bâtiments), l'inhalation de poussières ne peut plus se produire | Non | Voie d'exposition non prise en compte dans la mesure où :<br>• Le diagnostic de 2026 n'a mis en évidence aucune anomalies significatif dans le sol (des traces en hydrocarbures proches du seuil de quantification du laboratoire – 31 mg/kg et absence d'anomalie sur le reste des composés analysés) ;<br>• Les anomalies relevées dans les sols de surface au droit du sondage PM110 sont inférieures aux objectifs de réhabilitation. Les objectifs de réhabilitation ont fait l'objet d'une validation sanitaire pour un usage ponctuel des sols sans recouvrement dans le cadre de l'analyse de risque du plan de gestion de la zone 8 en 2020 (rapport référencé RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8). Le temps d'exposition en extérieur pris en compte pour cet usage est de 2h par jour. Ce temps d'exposition est supérieur au temps d'exposition habituellement prise en compte pour les usages tertiaires ou industriels avec bâtiment (8h/j en intérieur et 0.4h/j en extérieur). Aussi, l'analyse de risque réalisée pour la zone 8 valide la compatibilité des concentrations résiduelles en composés explosifs (inférieures ou égales aux objectifs de réhabilitation) dans les sols de surfaces sans recouvrement pour un usage industriel avec bâtiment et espace vert. De ce fait, ces composés ne feront pas l'objet d'un nouveau calcul de risque. |
| Inhalation de vapeur d'eau polluée* | Non | Les conduites AEP seront mises en place dans des sablons propres ou seront en matériaux anti-perméation | Non | Les conduites AEP seront mises en place dans des sablons propres ou seront en matériaux anti-perméation |
| Ingestion directe de sol et/ou de poussières | Non | Les sols de surface seront recouverts à l'issue du projet conformément au dossier de restriction d'usage | Non | Voie d'exposition non prise en compte dans la mesure où :<br>• Le diagnostic de 2026 n'a mis en évidence aucune anomalies significatif dans le sol (des traces en hydrocarbures proches du seuil de quantification du laboratoire – 31 mg/kg et absence d'anomalie sur le reste des composés analysés) ;<br>• Les anomalies relevées dans les sols de surface au droit du sondage PM110 sont inférieures aux objectifs de réhabilitation. Les objectifs de réhabilitation ont fait l'objet d'une validation sanitaire pour un usage ponctuel des sols sans recouvrement dans le cadre de l'analyse de risque du plan de gestion de la zone 8 en 2020 (rapport référencé RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8). Le temps d'exposition en extérieur pris en compte pour cet usage est de 2h par jour. Ce temps d'exposition est supérieur au temps d'exposition habituellement prise en compte pour les usages tertiaires ou industriels avec bâtiment (8h/j en intérieur et 0.4h/j en extérieur). Aussi, l'analyse de risque réalisée pour la zone 8 valide la compatibilité des concentrations résiduelles en composés explosifs (inférieures ou égales aux objectifs de réhabilitation) dans les sols de surfaces sans recouvrement pour un usage industriel avec bâtiment et espace vert. De ce fait, ces composés ne feront pas l'objet d'un nouveau calcul de risque. |
| Ingestion d'aliments d'origine végétale cultivés sur ou à proximité du site | Non | Absence de culture actuellement et dans le futur sur site ou dans le voisinage | Non | Absence de culture actuellement et dans le futur sur site ou dans le voisinage |
| Ingestion d'aliments d'origine animale à partir d'animaux élevés ou pêchés à proximité du site | Non | Absence d'élevages actuellement et dans le futur sur site ou dans le voisinage | Non | Absence d'élevages actuellement et dans le futur sur site ou dans le voisinage |
| Ingestion d'eau contaminée | Non | Aucun usage de la nappe actuellement et dans le futur n'est réalisé au droit de la zone d'étude, conformément au dossier de restriction d'usage. | Non | Aucun usage de la nappe actuellement et dans le futur, conformément au dossier de restriction d'usage |

| VOIES D'EXPOSITION | Zone 3 | RAISON DE LA SELECTION | Zone 8 | RAISON DE LA SELECTION |
|---|---|---|---|---|
| | Adultes travailleurs | | Adultes travailleurs | |
| Absorption cutanée de sols et/ou de poussières | Non | Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique** | Non | Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique** |
| Absorption cutanée d'eau contaminée (bain, douche, baignade en gravière) | Non | Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique** | Non | Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique** |
| Absorption cutanée de polluant sous forme gazeuse | Non | Voie d'exposition négligeable devant la voie inhalation de vapeur. Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique | Non | Voie d'exposition négligeable devant la voie inhalation de vapeur. Absence de relations dose-réponse dans la littérature scientifique |

* voie d'exposition considérée par la comparaison entre les concentrations dans les eaux utilisées et les concentrations maximales admissibles dans les eaux potables (voir paragraphe des investigations sur les eaux souterraines).

** *Les expositions par contact cutané avec les sols ne sont pas considérées dans la présente étude compte tenu de l'absence de valeur toxicologique de référence pour cette voie d'exposition. En effet, comme cela est préconisé dans la note* d'information N° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014*, en l'absence de connaissance des effets potentiels des substances étudiées par voie cutanée, la transposition de la valeur toxicologique établie par voie orale n'est pas effectuée*

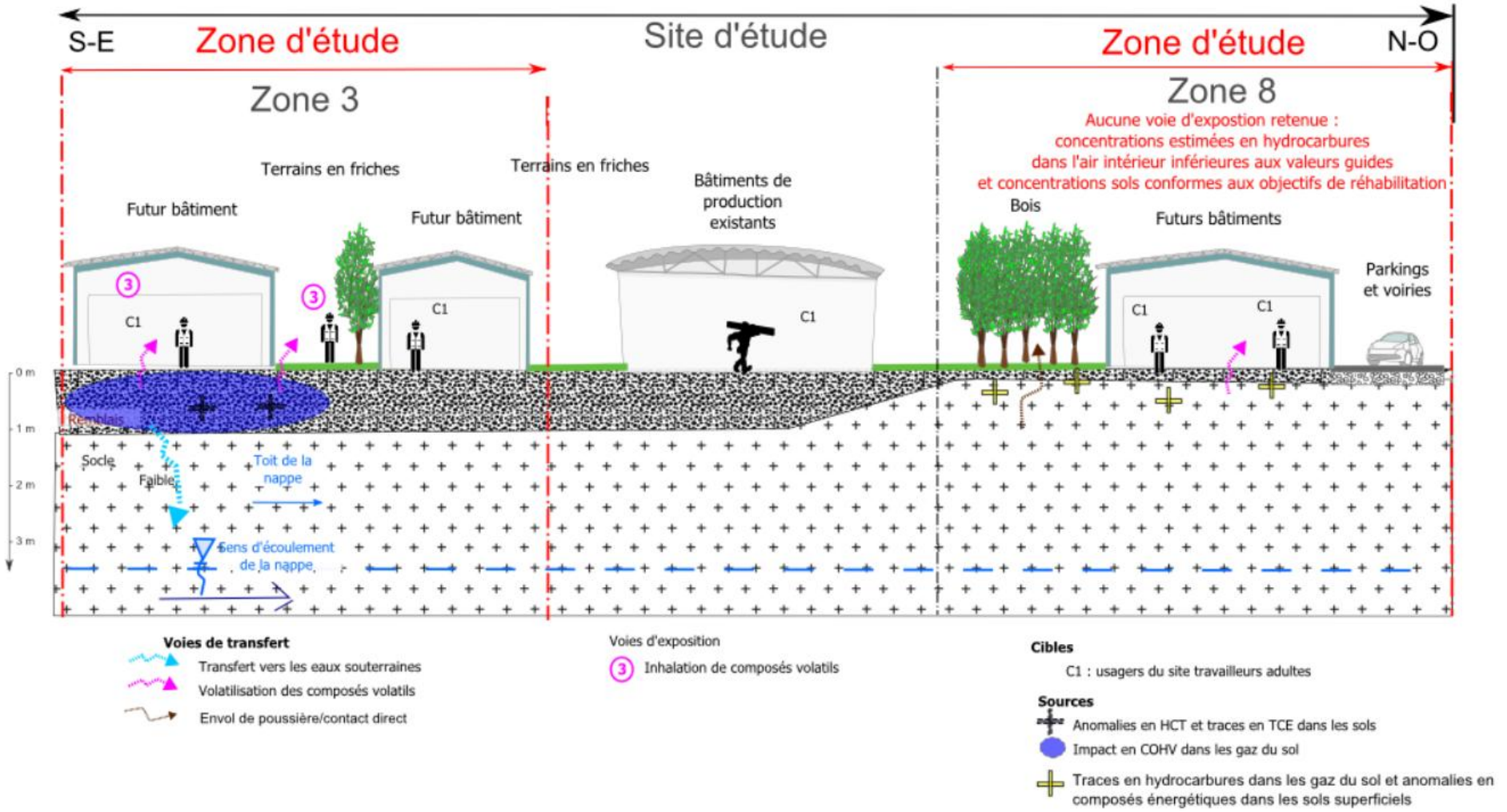



**Figure 10 : Schéma conceptuel sur l'usage futur de la zone 3 et de la zone 8**

**Aussi, à l'issue du schéma conceptuel présenté ci-avant, les milieux souterrains au droit des futurs bâtiments prévus sur la zone 8 sont considérés compatibles sanitairement avec le projet dans la mesure où :**

- **aucun impact n'a été mis en évidence dans les sols de surface en 2026 ;**
- **que le maintien des anomalies mesurées historiquement dans les sols en composés énergétiques à environ 25 m des futurs bâtiments (sondage PM110) a été validé d'un point de sanitaire dans le cadre de l'analyse de risque réalisée en 2020 (analyse de risque référencé RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8) ;**
- **que les traces en hydrocarbures dans les gaz du sol mesurées en avril 2026 (en condition favorable de dégazage) sont inférieures aux valeurs guide pour l'air intérieur après application du facteur alpha (facteur de transfert jugé plutôt sécuritaire) ;**
- **que l'historique de la zone ne met en évidence aucune activité autre que forestière au droit de l'emprise des futurs bâtiments.**

**À noter qu'une seule campagne sur les gaz du sol a été réalisée au droit du projet. Néanmoins au regard de l'historique du site (zone essentiellement boisée) et des concentrations mesurées dans les gaz du sol au cours d'une période plutôt favorable au dégazage, GINGER BURGEAP considère que les données sur les milieux peuvent être jugées suffisantes pour statuer sur la compatibilité des risques sanitaires concernant la zone 8.**

Concernant la zone 3, compte tenu des voies de transfert et voie d'expositions identifiée sur le schéma conceptuel, une analyse plus poussée sur les risques sanitaires est nécessaire pour conclure sur la compatibilité sanitaire du projet.

# 5. Analyse des Risques Résiduels (ARR)

## 5.1 Contexte et méthodologie

Conformément aux textes ministériels relatifs à la gestion des sites et sols pollués de 2017, la compatibilité entre l'état attendu des terrains après mise en œuvre des mesures de gestion proposées et l'usage futur du site doit être vérifié sur le plan sanitaire.

L'analyse des risques résiduels (ARR) consiste donc à vérifier que l'état des milieux à l'issue des travaux (concentrations résiduelles dans les sols) est compatible avec les usages futurs.

L'ARR qui repose sur le schéma conceptuel final peut être réalisée :

- *a priori* (avant la réalisation des travaux de réhabilitation ou « ARR prédictive »). Les calculs de risque sont menés sur des concentrations résiduelles estimées en tenant compte des performances connues des techniques de dépollution. Dans ce cas, lors du récolement à l'issue des travaux, les concentrations résiduelles mesurées et les caractéristiques des aménagements prévus seront comparées aux données d'entrée de la présente ARR afin de statuer sur la bonne mise en œuvre du plan de gestion. Une ARR prédictive apporte une certaine garantie sur l'acceptabilité sanitaire mais ne remplace pas celle réalisée à l'issue des travaux de réhabilitation ;
- *a posteriori* (à réception des travaux de réhabilitation ou « ARR fin de travaux »). Dans ce cas, à l'issue des travaux, les concentrations résiduelles mesurées lors du récolement et les caractéristiques des aménagements prévus sont intégrées à l'ARR afin de statuer sur la compatibilité entre les pollutions résiduelles et les usages.

L'analyse de risque est réalisée ici à postériori, en considérant les concentrations résiduelles après travaux via les données actualisées et ciblées sur les zones d'intérêt du projet de chaque zone.

La méthodologie appliquée est conduite en 4 étapes :

- Étape 1 : Identification des dangers
- Étape 2 : Caractérisation des relations dose-réponse
- Étape 3 : Estimation des expositions
- Étape 4 : Caractérisation des risques

Cette méthodologie nécessite l'étape préalable de choix justifié et raisonné des composés et concentrations à prendre en compte.

## 5.2 Composés et concentrations retenues dans les différents milieux – zone 3

La synthèse des investigations sur le site, combinée aux scénarios d'expositions retenus, permet de réaliser la sélection des composés à prendre en compte pour les milieux d'exposition considérés.

La seule voie d'exposition retenue est l'inhalation de composés volatils. Les concentrations mesurées dans les gaz des sols sont donc préférentiellement retenues par rapport aux concentrations sols et eaux souterraines (diminution des incertitudes liées à la modélisation des transferts).

Dans une approche majorante, les concentrations maximales mesurées dans les gaz du sol en 2026 sont retenues pour le calcul. A noter que les concentrations dans les gaz du sol avant travaux ne sont pas retenues compte tenu des travaux de réhabilitation achevés en 2024. Aucune analyse de gaz du sol sur la zone 3 n'a été réalisée après la réalisation des travaux (à l'exception de celles réalisées en avril 2026).

Les composés retenus dans le cadre de la présente analyse de risque correspondent aux concentrations mesurées dans les gaz du sol supérieures aux valeurs guide pour l'air intérieur. Les valeurs guides édictées par les différentes autorités sanitaires ont pour objectif de protéger les populations sur le risque cancérigène. Un abattement des concentrations est attendu entre les gaz du sol et l'air intérieur. Aussi, dans le cas où les concentrations mesurées sur les gaz du sol sont inférieures aux valeurs guides pour l'air intérieur, les concentrations estimées dans l'air intérieur via ces concentrations gaz du sol sont également considérées inférieures aux valeurs guides et ne sont donc pas prises en compte dans le calcul. La considération de l'ensemble des substances quantifiées dans les gaz du sol est néanmoins testée en calcul d'incertitude (cf paragraphe 5.7).

Les concentrations retenues sont présentées dans le **Tableau 4**.

**Tableau 4 : Concentrations retenues dans les différents milieux pour l'ARR**

| | Concentrations à la source retenues **sous le bâtiment** | | Concentrations à la source retenues **en extérieur** | |
|---|---|---|---|---|
| **Substances** | **Gaz du sol** | **Investigations correspondantes et critères de sélection** | **Gaz du sol** | **Investigations correspondantes et critères de sélection** |
| | **mg/m³** | | **mg/m³** | |
| **COMPOSES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES** | | | | |
| Benzène | 0.0081 | PzR58 - Mai-26 | 0.0081 | PzR58 - Mai-26 |
| **COMPOSES ORGANO-HALOGENES VOLATILS** | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | 2.241 | PzR58 - Mai-26 | 2.241 | PzR58 - Mai-26 |
| Trichloroéthylène (TCE) | 3.184 | PzR58 - Mai-26 | 3.184 | PzR58 - Mai-26 |
| Dichloroéthylène (cis 1,2-DCE) | 0.157 | PzR58 - Mai-26 | 0.157 | PzR58 - Mai-26 |
| Dichloroéthylène (trans 1,2-DCE) | 0.013 | PzR58 - Mai-26 | 0.013 | PzR58 - Mai-26 |

## 5.3 Identification des dangers

En termes sanitaires, un danger désigne tout effet toxique, c'est-à-dire un dysfonctionnement cellulaire ou organique lié à l'interaction entre un organisme vivant et un agent chimique, physique ou biologique. La toxicité d'un composé dépend de la durée et de la voie d'exposition de l'organisme humain. Différents effets toxiques peuvent être considérés.

Pour les substances prises en compte dans le cadre de cette évaluation, les effets toxiques ont été collectés et notamment les effets cancérigènes (apparition de tumeurs), les effets mutagènes (altération du patrimoine génétique) ainsi que les effets sur la reproduction (reprotoxicité).

En ce qui concerne le potentiel cancérogène, différents organismes internationaux (l'OMS, l'Union Européenne et l'US-EPA) distinguent différentes catégories ou classes. Seule la classification de l'Union Européenne a un caractère réglementaire. C'est également la seule qui classe les substances chimiques quant à leur caractère mutagène et reprotoxique.

L'ensemble des voies d'exposition a été traité en effets chroniques, correspondant à de longues durées d'exposition (supérieures à 7 ans pour l'US-EPA et supérieures à 1 an pour l'ATSDR).

L'ensemble des informations concernant le potentiel toxique des substances retenues est reporté en **Annexe 3.**

## 5.4 Caractérisation des Relation dose-réponse

L'évaluation quantitative de la relation entre la dose (ou la concentration) et l'incidence de l'effet néfaste permet d'élaborer la **Valeur Toxicologique de Référence** (VTR). Des VTR sont établies par diverses instances internationales ou nationales[1] à partir de l'analyse des données toxicologiques expérimentales chez l'animal et/ou des données épidémiologiques. Ces VTR sont une appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques établissant une relation quantitative entre une dose et un effet (toxiques à seuil de dose) ou entre une dose et une probabilité d'effet (toxiques sans seuil de dose).

Selon les mécanismes toxicologiques en jeu, deux grands types d'effets toxiques peuvent être distingués :

- les effets à seuil pour lesquels il existe un seuil d'exposition en dessous duquel l'effet néfaste n'est pas susceptible de se manifester,
- les effets sans seuil pour lesquels la probabilité de survenue de l'effet néfaste croît avec l'augmentation de la dose.

La 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 est prise en compte pour la sélection des VTR.

Les valeurs toxicologiques de référence sont synthétisées dans le **Tableau 5**. Les relations dose-réponse des composés retenus sont détaillées en **Annexe 6** et discutées dans les incertitudes au paragraphe **5.7**.

[1] IRIS US-EPA (Integrated Risk Information System ; US Environmental Protectin Agency)
ATSDR Toxicological Profiles (US Agency for Toxic Substances and Disease Registry)
OMS (Organisation Mondiale de la Santé)
Santé canada (Ministère Fédéral de la Santé – Canada),
RIVM (RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieu – Institut National de Santé Publique et de l'Environnement – Pays Bas),
OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment of California – Etats Unis)
En France, l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement, du Travail) peut également produire des VTR.

**Tableau 5 : Valeurs toxicologiques de référence retenues**

| Substance | CAS N° | Effets sans seuil | | | Effets à seuil | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ERUi | TYPE CANCER | SOURCE | VTRi | ORGANE | SOURCE | SF | VTRi spécifique effet cancérigène | ORGANE | SOURCE | SF |
| | | $(\mu g/m^3)^{-1}$ | | | $(\mu g/m^3)$ | | | | $(\mu g/m^3)$ | | | |
| **COMPOSES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES** | | | | | | | | | | | | |
| Benzène | 71-43-2 | **1.6E-06** | leucémie | Anses, 2024 | **9.7** | *sang* | *ATSDR, 2007 retenu par Anses, 2024* | *10* | - | - | - | **-** |
| **COMPOSES ORGANO-HALOGENES VOLATILS** | | | | | | | | | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | 127-18-4 | **2.60E-07** | *hépatique* | *US-EPA, 2012 retenu par Anses, 2024* | **400** | *neurotoxicité* | *Anses, 2024* | *30* | - | - | - | **-** |
| Trichloroéthylène (TCE) | 79-01-6 | **1.00E-06** | *cancer du rein* | *Anses, 2018* | **3 200** | **rein** | *Anses, 2018* | **75** | - | - | - | **-** |
| Dichloroéthylène (cis 1,2-DCE) | 156-59-2 | - | - | - | **60** | *hépatique* | *RIVM, 2009* | *3000* | - | - | - | **-** |
| Dichloroéthylène (trans 1,2-DCE) | 156-60-5 | - | - | - | **60** | *hépatique* | *RIVM, 2009* | *3000* | - | - | - | **-** |

## 5.5 Estimation des expositions

### 5.5.1 Concentrations dans les milieux d'exposition

#### 5.5.1.1 Estimation des concentrations dans l'air intérieur et extérieur

La modélisation des transferts des gaz des sols vers l'air intérieur est associée au développement d'outils datant du début des années 1990. Ces outils sont très peu nombreux, les principaux utilisés en France qui intègrent le transport diffusif et le transport convectif sont VOLASOIL [3] (Waitz et al, 1996) adapté aux situations avec vide sanitaire, le modèle dit de « Johnson and Ettinger »[4] (Johnson and Ettinger, 1991) adapté aux constructions en dallage indépendant (avec fissuration périphérique de la dalle liée au séchage) et le modèle développé par Bakker et al (2008)[5] pour les constructions en dalle portée ou radier (fondation et dalle d'un seul tenant, sans fissuration périphérique).

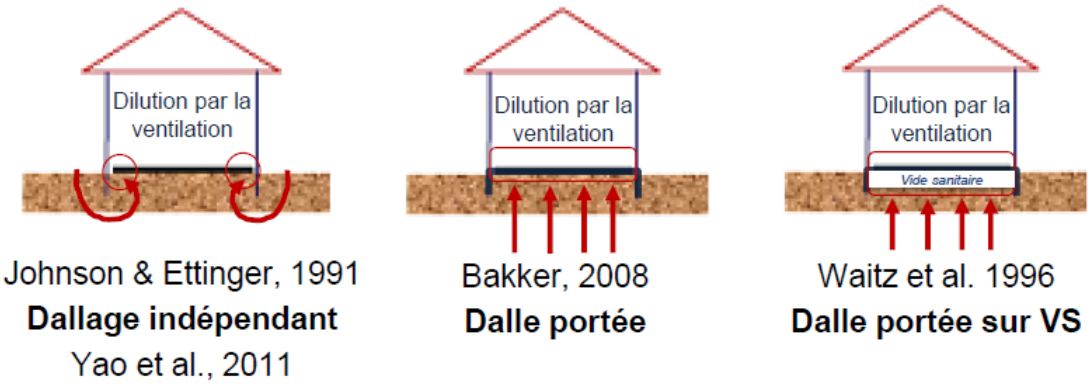



**Figure 11 : Représentation schématique des différents modèles de calcul des transferts des sols vers l'air intérieur**

Au vu du projet d'aménagement prévu sur le site (Cf. paragraphe 4.3), le modèle de construction n'étant pas connu à ce stade, le modèle de Baker sera utilisé en première approche (modèle considéré le plus probable). Le modèle de Johnson & Ettinger sera présenté en incertitude.

Les concentrations dans l'air intérieur obtenues via le modèle de Bakker sont présentées en **Tableau 8**. À noter que les concentrations dans l'air intérieur obtenu avec le modèle de Johnson & Ettinger sont globalement du même ordre de grandeur.

Dans l'air extérieur, la modélisation des expositions est conduite sur la base des équations de Millington and Quirk et de l'équation de Fick. La dilution par le vent est ensuite calculée dans une boite de taille fixée. Comme pour l'air intérieur, la zone de pollution est considérée comme infinie.

Les équations sont détaillées en **Annexe 7**.

[3] Waitz *et al.,* 1996. The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. M.F.W. Waitz; J.I. Freijer; F.A. Swartjes. May 1996. RIVM. Report n° 7581001.

[4] Johnson PC and Ettinger RA, 1991. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. Env. Sci. Technol. 25, p 1445-1452

[5] Bakker et al. 2008 RIVM Report 711701049/2008 : Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds

### Hypothèses retenues – paramètres liés au sol et aux aménagements

Les concentrations dans l'air intérieur sont estimées à partir des concentrations mentionnées dans le **Tableau 4**. Les hypothèses retenues pour la réalisation des calculs de transferts des gaz des sols vers l'air intérieur et l'air extérieur, sont rappelées dans les **Tableau 6** et

| Paramètres de sol génériques | Unités | Valeurs | Sources de données / Commentaires |
|---|---|---|---|
| Température de référence des sols (proche bâtiment) | °C | 15 | Utilisée pour calculer les perméabilités à cette température de référence. |
| Viscosité dynamique | (g/cm/s) | 1.8.E-04 | Viscosité à la température de référence utilisée pour calculer les perméabilités |
| Viscosité dynamique | (Pa.h) | 4.9.E-09 | Viscosité à la température de référence utilisée pour calculer les perméabilités |

Tableau 7 et en **Annexe 7**.

**Tableau 6 : Paramètres retenus liés au sol**

| Profondeur de la pollution | Unités | Valeurs |
|---|---|---|
| Profondeur du toit de la source sous le niveau du sol (sous le sol nu en l'absence de recouvrement ou sous la base du recouvrement) | m | 0.01 |

| Lithologie | Unités | Horizon1 |
|---|---|---|
| Nature lithologique | m | Limons sableux |
| Epaisseur | m | 0.01 |
| Porosité | - | 25% |
| Teneur en eau | - | 15% |
| foc | - | 0.7% |
| Masse volumique du sol | kg/l | 1.80 |

| Recouvrement de surface | Unités | Valeurs |
|---|---|---|
| Nature du recouvrement | - | Enrobé |
| Porosité | - | 0.03 |
| Teneur en eau | - | 0.00 |
| Epaisseur | m | 0.05 |

| Paramètres de sol génériques | Unités | Valeurs | Sources de données / Commentaires |
|---|---|---|---|
| Température de référence des sols (proche bâtiment) | °C | 15 | Utilisée pour calculer les perméabilités à cette température de référence. |
| Viscosité dynamique | (g/cm/s) | 1.8.E-04 | Viscosité à la température de référence utilisée pour calculer les perméabilités |
| Viscosité dynamique | (Pa.h) | 4.9.E-09 | Viscosité à la température de référence utilisée pour calculer les perméabilités |

**Tableau 7 : Paramètres retenus liés aux scenarios d'aménagements**

| Dilution par le vent | Unités | Valeurs | Sources de données |
|---|---|---|---|
| Hauteur de la zone de mélange (adulte) | m | 1.5 | Hauteur des voies respiratoires des cibles (1 m enfant et 1,5m pour les adultes) |
| Longueur de la zone de mélange | m | 85 | Longueur de la partie Est de la zone 3 (de l'ancien dallage béton à la route principale du site) |
| Vitesse moyenne de vent | m/s | 2.0 | Hypothèse : Vitesse moyenne du vent |

| Géométrie et Ventilation du bâtiment | Unités | Valeurs | Sources de données |
|---|---|---|---|
| Surface | m² | 10 | Bureau de 10 m² considéré |
| Hauteur | m | 2.5 | Hypothèse |
| Renouvellement d'air | /h | 1 | Pour les bureaux et locaux sans travail physique, débit minimum de 25 m3/h/personne<br>Référence : R232-5-3 du décret n°84-1093 (code du travail)<br>Hypothèse : 1 personne / 25m² |

## Bakker (RIVM, 2008)

| Paramètres nécessaires pour l'utilisation du modèle Bakker (2008) | Unités | Valeurs | Sources de données |
|---|---|---|---|
| Différence de pression entre l'air intérieur et extérieur (dP) | Pa | 4.00 | Valeur conservatoire définie par Johnson et Ettinger mais utilisée également dans le modèle de Bakker |
| Epaisseur de la dalle | m | 0.15 | Hypothèse |
| Perméabilité à l'air de la dalle du rez de chaussée (en l'absence de sous-sol) | m² | 2.0E-13 | Valeur par défaut de Bakker et al., 2008 pour une dalle de bonne qualité |
| Porosité de la dalle béton du rez de chaussée (en l'absence de sous-sol) | - | 0.12 | Données issues de la littérature |
| Teneur en gaz du béton du rez de chaussée (en l'absence de sous-sol) | - | 0.05 | Données issues de la littérature |
| Teneur en eau du béton du rez de chaussée (en l'absence de sous-sol) | - | 0.07 | Données issues de la littérature |

### Concentrations dans l'air intérieur et extérieur

Le **Tableau 8** présente les concentrations estimées en air intérieur et extérieur.

**Tableau 8 : Concentrations calculées dans l'air intérieur et extérieur**

| | AIR EXTERIEUR | | | AIR INTERIEUR | | | Concentrations calculées dans l'air intérieur | Concentrations calculées dans l'air extérieur |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Avec recouvrement |
| | (µg/m³) | (µg/m³) | (µg/m³) | (µg/m³) | (µg/m³) | (µg/m³) | Bakker | Adultes |
| **Substances** | **Bruit de fond (source OQAI (P90) ou INERIS,2009 (urbain))** * : Valeur sur forme particulaire | **Valeurs réglementaires - décret n° 2010-1250 (valeur limite/valeur cible)** * : Valeur sur forme particulaire | **Valeurs guide OMS** * : Valeur sur forme particulaire | **Valeur réglementaire Décret n° 2011-1727** | **VGAI ANSES , VRAI HCSP, INDEX, VG OMS** | **seuil R1 "établissements sensibles"** | Air intérieur des lieux de vie **(µg/m³)** | Air extérieur **(µg/m³)** |
| | | | | | | | | |
| **COMPOSES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES** | | | | | | | | |
| Benzène | 2.2 | 5 | 1.7 | 2 | 6 | 2 | 0.004 | 0.0003 |
| **COMPOSES ORGANO-HALOGENES VOLATILS** | | | | | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | 2.4 | - | 250 | - | 40 | 40 | 1.1 | 0.07 |
| Trichloroéthylène (TCE) | 1.6 | - | 23 | - | 10 | 10 | 1.6 | 0.11 |
| Dichloroéthylène (cis 1,2-DCE) | - | - | - | - | - | 60 | 0.08 | 0.005 |
| Dichloroéthylène (trans 1,2-DCE) | - | - | - | - | - | - | 0.006 | 0.0004 |

L'ensemble des concentrations modélisé dans l'air intérieur et extérieur du futur projet via les concentrations maximales mesurées dans les gaz du sol de 2026 sont inférieurs aux valeurs guides ou valeurs réglementaires quand elles existent.

## 5.5.2 Estimation des expositions

### 5.5.2.1 Exposition par inhalation

Le calcul de la concentration moyenne inhalée est réalisé avec l'équation générique suivante (guide EDR du Ministère en charge de l'environnement/BRGM/INERIS, version 2000) :

$$CI_j = [Cj \times t_j \times T \times F / Tm]$$

avec :
$CI_j$ : concentration moyenne inhalée du composé j (en mg/m$^3$).
Cj : concentration du composé j dans l'air inhalé (mg/m$^3$).
T : durée d'exposition (années).
F : fréquence d'exposition : nombre de jours d'exposition par an (jours/an).
$t_j$ : fraction du temps d'exposition à la concentration Cj pendant une journée (-)
$T_m$ : période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (jours).

Les concentrations moyennes inhalées sont calculées à partir des concentrations de gaz dans l'air présentées dans le **Tableau 8**.

Le détail des calculs est donné en **Annexe 8**.

### 5.5.2.2 Budget espace-temps (BET)

Le budget espace-temps des cibles considérées est présenté dans le **Tableau 9**.

**Tableau 9 : Budgets espace/temps retenus**

| Scénario | Cibles | Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée |
|---|---|---|
| | Adultes | |
| Bureaux de plain-pied | T = 42 ans<br>220 jours par an<br>8h/jour en intérieur<br>0,4h/jour en extérieur | - 70 ans (correspondant à la durée de vie considérée par l'ensemble des organismes nationaux et internationaux pour l'établissement de valeurs toxicologiques et l'évaluation des risques) pour les effets cancérigènes quelle que soit la cible considérée<br><br>- T (correspondant à durée d'exposition) pour les effets toxiques non cancérigènes quelle que soit la cible considérée |

Les données utilisées sont issues de la synthèse des travaux du département santé environnement de l'institut de veille sanitaire sur les variables humaines d'exposition[2] d'une part, de l'Exposure Factor Handbook (US-EPA, EFH, 1997 et 2001) d'autre part, et enfin de la règlementation du travail en France.

Pour les durées d'exposition dans le contexte du travail, le cas le plus défavorable a été considéré pour les adultes qui travailleraient pendant 42 ans au même endroit (correspondant à la durée totale de la période de travail) ; cependant la variabilité de cette durée d'exposition est importante. Les durées de 220 jours/an et 8 h/jour correspondent aux durées « classiques » du travail en France.

[2] Demeureaux C, Zeghnoun A. Synthèse des travaux du département santé environnement de l'institut de veille sanitaire sur les variables humaines d'exposition. Saint Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2012. 28p.

## 5.6 Quantification des risques sanitaires

### 5.6.1 Méthodologie

#### 5.6.1.1 Estimation du risque pour les effets toxiques sans seuil

Pour les effets toxiques sans seuil, et pour de faibles expositions, l'excès de risque individuel (ERI) est calculé de la façon suivante :

$$ERI\ (inhalation) = CI \times ERUi$$

$$ERI\ (ingestion) = DJE \times ERU_o$$

Les ERI s'expriment sous la forme mathématique $10^{-n}$. Par exemple, un excès de risque de $10^{-5}$ présente la probabilité supplémentaire, par rapport à une personne non exposée, de développer un cancer pour 100 000 personnes exposées durant la vie entière.

Pour chaque scénario d'exposition, un ERI global est ensuite calculé en faisant :

- pour chaque composé, la somme des risques liés à chacune des voies d'exposition,
- la somme des risques liés à chacun des composés cancérogènes.

Il n'existe pas de niveau d'excès de risque individuel universellement acceptable. Les documents du ministère en charge de l'environnement de février 2007, confirmés par ceux de 2017, relatifs aux sites et sols pollués et aux modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués, considèrent que le niveau de risque « usuellement [retenue] au niveau international par les organismes en charge de la protection de la santé », de $10^{-5}$ est acceptable.

En cas d'exposition conjointe à plusieurs agents dangereux, l'Environmental Protection Agency des États-Unis (US-EPA) recommande de sommer l'ensemble des excès de risque individuels (ERI), quels que soient le type de cancer et l'organe touché, de manière à apprécier le risque cancérigène global qui pèse sur la population exposée.

#### 5.6.1.2 Estimation du risque pour les effets toxiques à seuil

Pour les effets toxiques à seuil, un quotient de danger (QD) est défini pour chaque voie d'exposition de la manière suivante :

$$QD_{i,INH} = \frac{CI_{i,INH}}{RfCi}$$

$$QD_{i,ING} = \frac{DJE_{i,S}}{RfDi}$$

Un QD inférieur ou égal à 1 signifie que l'exposition de la population n'atteint pas le seuil de dose à partir duquel peuvent apparaître des effets indésirables pour la santé humaine. À l'inverse, un ratio supérieur à 1 signifie que l'effet toxique peut se déclarer dans la population, sans qu'il soit possible d'estimer la probabilité de survenue de cet événement.

En l'absence de doctrine unique sur l'additivité des risques et compte tenu de la méconnaissance à l'heure actuelle des mécanismes d'action pour la majorité des substances, nous procéderons à l'additivité des quotients de danger en premie**r niveau d'approche.**

### 5.6.2 Quantification des risques sanitaires résiduels au droit du site

**Les quotients de danger et excès de risques individuels liés aux différentes expositions ont été calculés à partir des valeurs toxicologiques (Tableau 5) et des niveaux d'exposition estimés au paragraphe précédent. Ils sont présentés dans le Tableau 10**. Le détail du calcul est donné en **Annexe 8**.

La méthodologie adoptée est celle préconisée par les circulaires ministérielles de février 2007 reprise dans les textes d'avril 2017. L'évaluation du risque nécessite la prise en compte simultanée d'expositions par différentes voies et concerne l'ensemble des substances pour lesquelles on considérera ici l'additivité des risques.

**Tableau 10 : Synthèse des QD et ERI**

| | Effets toxiques sans seuil Excès de risques individuels (ERI) | | Effets toxiques à seuil Quotient de danger (QD) | |
|---|---|---|---|---|
| | Adulte Travailleur | Composés tirant le risque | Adulte Travailleur | Composés tirant le risque |
| INHALATION air intérieur dans le lieu de vie Bakker | 2.39E-07 | Trichloroéthylène (TCE) | 0.001 | Tétrachloroéthylène (PCE) |
| INHALATION air extérieur avec recouvrement | 8.13E-10 | Trichloroéthylène (TCE) | 3.47E-06 | Tétrachloroéthylène (PCE) |
| TOTAL | **2.4E-07** | | **0.001** | |

| |
|---|
| Risques non significatifs |
| Risques significatifs |

Dans le cadre de la mission qui nous a été confiée par KNDS AMMO FRANCE, avec les conditions d'études retenues, et en l'état actuel des connaissances scientifiques, les niveaux de risques estimés sont inférieurs aux critères d'acceptabilité tels que définis par la politique nationale de gestion des sites pollués.

**Ainsi, la construction des bâtiments, d'espaces verts et de voiries au droit de la zone 3, conformément au plan masse fourni en Figure 3, est compatible d'un point de vue sanitaire avec les concentrations résiduelles.**

## 5.7 Analyse des incertitudes – zone 3

L'analyse des incertitudes d'une évaluation des risques et la sensibilité des paramètres retenus pour cette évaluation est une partie intégrante d'un calcul de risque sanitaire.

Afin de ne pas alourdir cette analyse, les paramètres clés de l'évaluation réalisée sont ici discutés, ainsi que leurs incidences sur les résultats de l'évaluation. Ces paramètres clés sont dépendants des scénarios d'exposition et des substances retenus.

**Tableau 11 : Variables générant les incertitudes majeures de l'évaluation**

<table>
<tr><th>Variable</th><th>Voie d'exposition touchée</th><th>Poids dans l'évaluation</th><th>Approche retenue</th></tr>
<tr><td colspan="4">Non prise en compte de l'exposition au bruit de fond</td></tr>
<tr><td>Bruit de fond</td><td>Inhalation et ingestion de sols et/ou poussières</td><td>Faible</td><td>Dans la mesure où le bruit de fond et ses incidences sanitaires n'ont pas à ce jour fait l'objet d'une procédure de gestion nationale, la présente étude a été menée en ne considérant que la compatibilité vis-à-vis des composés présents en concentrations supérieures au bruit de fond sur le site. Cette pratique correspond à ce qui est couramment réalisé dans ce type d'étude. Cependant, il faut rappeler que :<ul><li>certains métaux n'ont pas été retenus, car les concentrations dans les sols sont jugées appartenir au bruit de fond. Leur présence sur site et hors site pourrait dans certains cas induire des niveaux de risques qui seraient jugés inacceptables (c'est le cas en particulier de l'arsenic) ;</li><li>la présence potentielle de composés organiques volatils (benzène, solvants, etc.) ou de poussières dans l'air atmosphérique de certaines agglomérations (suivis parfois par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air), non liée au site, n'est pas prise en compte ;</li><li>la présence potentielle dans l'air intérieur de composés organiques volatils (solvants, formaldéhydes, etc.) issus des aménagements et activités dans les locaux, non liées au site, n'est pas prise en compte.</li></ul></td></tr>
<tr><td colspan="4">Choix et caractéristiques des composés</td></tr>
<tr><td>Nature des composés et concentrations retenues</td><td>Inhalation intérieure et extérieure</td><td>Fort</td><td>Sécuritaire : prise en compte des composés quantifiés dans gaz des sols (campagnes d'avril 2026). Certaines substances quantifiées dans les gaz du sol n'ont pas été quantifiées dans les sols. Aussi, la prise en compte des concentrations gaz du sol apparaît comme sécuritaire pour l'évaluation des expositions.<br><br>En première approche, seules les substances présentant des concentrations supérieures aux valeurs guide ont été prises en compte. Si, l'ensemble des composés volatils quantifié dans les gaz sols étaient pris en compte dans le calcul de risque, les seuils de risque resteraient inchangés (le risque étant tiré principalement par le TCE donc les teneurs sont supérieur aux valeurs guide et donc pris en compte dans la première approche de calcul).<br>Les concentrations retenues sont les concentrations maximales mesurées (quand elles sont supérieures aux valeurs guide) en considérant les 2 ouvrages de la zone 3 (PzR58 et PzR59 situé au droit de l'emprise des futurs bâtiments). La conclusion de la présente ARR serait remise en question dans le cas où l'emprise des futurs bâtiments ne correspondrait pas à celle présentée sur le plan de masse (cf Figure 3 plan fourni par KNDS AMMO FRANCE). Aussi, et en l'état actuel des connaissances, la conclusion sur la compatibilité de l'état des milieux avec les usages futurs n'est donc valable que dans le cadre d'une configuration du projet d'aménagement correspondant au plan de de masse fourni par le client (cf. Figure 3 plan fourni par KNDS AMMO FRANCE).</td></tr>
<tr><td>Valeurs Toxicologiques de référence</td><td>Inhalation et ingestion</td><td>Faible</td><td>Les VTR ont été retenues conformément à la 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 VTR pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués.<br>Malgré l'existence d'incertitudes sur les VTR (concernant le degré de confiance accordées aux études, les facteurs de sécurité, les désaccords entre experts toxicologues), l'approche que nous avons retenue rend compte des connaissances scientifiques et techniques du moment et n'engendre pas d'incertitude majeure sur les conclusions formulées quant à l'acceptabilité des risques.</td></tr>
<tr><td>Cumul des QD et des ERI</td><td>Toutes</td><td>Fort</td><td>Il convient de rappeler la limite méthodologique des évaluations de risques sanitaires lorsque plusieurs substances peuvent avoir entre elles des effets synergiques ou antagonistes.<br>A l'heure actuelle, les éléments qui permettraient de déterminer si les effets se cumulent ou non ne sont pas disponibles et il n'y a pas de consensus sur une méthode pour prendre en compte les effets de mélanges.
<table>
<tr><th></th><th>Somme des ERI ou QD</th><th>Justification</th><th>Consensus</th></tr>
<tr><td>ERI</td><td>Oui, quels que soient les organes cibles, les types de cancer et les voies d'exposition.</td><td>On parle de cancer en général quelle que soit la cause ou le mécanisme.</td><td>Oui, internationaux</td></tr>
<tr><td>QD</td><td>Discutable</td><td>Approche par organe cible</td><td>Proche des consensus nationaux et internationaux</td></tr>
<tr><td>Si Somme QD >1</td><td>Faire la somme par organe cible</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td colspan="4">Caractéristiques des sources de pollution et concentrations dans les différents milieux</td></tr>
<tr><td>Source « gaz des sols »</td><td>Inhalation intérieur et extérieur</td><td>Fort</td><td>Sécuritaire pour la campagne de mesure réalisée : prise en compte des résultats les plus pénalisants des gaz des sols et profondeur de la source « gaz des sols » supposée à 0,01 m sous le bâtiment.<br>Les conditions météorologiques et techniques d'échantillonnage des gaz jouent un rôle sur la représentativité des résultats d'analyse. Les teneurs retenues pour la modélisation ont été mesurées lors d'une campagne présentant des conditions plutôt favorables au dégazage (avril 2026) à des profondeurs situées entre 1 et 1,5 m. À noter que les concentrations mesurées pour les COHV en avril 2026 sont supérieures aux concentrations prises en compte dans l'analyse de risque du plan de gestion de 2019 pour la zone 3.<br>Aussi, au vu de la variabilité saisonnière des concentrations dans les gaz des sols et compte tenu des concentrations mesurées en 2026, nous recommandons de renouveler la campagne d'échantillonnage/analyses des gaz des sols sur la zone 3 pour confirmer le degré d'impact mesuré en avril 2026.</td></tr>
<tr><td>Cas d'un mélange de composés en un même point</td><td>Toutes</td><td>Faible</td><td>Si toutes les concentrations en différents composés sont retrouvées dans un même sondage, on considère être en présence d'un mélange de constituants dont les propriétés vont être dépendantes de l'équilibre triphasique qui se mettra en place dans le milieu « sols » (phase pure du produit, produit dissous dans l'eau des sols, produit volatilisé dans les gaz des sols).<br>Sécuritaire :la prise en considération d'un mélange a tendance à diminuer les concentrations dans l'air et l'eau des sols, du fait de l'équilibre triphasique.</td></tr>
<tr><td>Profondeur de la source</td><td>Toutes</td><td>Faible</td><td>Le modèle considéré ne tient pas compte de l'évolution de la source de pollution et des flux en fonction du temps (source infinie). Ainsi, compte tenu de la volatilité élevée des substances considérées et des paramètres de sols favorables au transfert de vapeur, afin de ne pas majorer de manière irréaliste le risque sanitaire, nous retiendrons la profondeur de 10 cm par défaut.<br>Dans le cas d'une profondeur réduite à 1 cm (approche sécuritaire), les ordres de grandeur de risque resteraient inchangés. Aussi la profondeur de la source considérée n'est pas de nature à remettre en cause les conclusions de l'étude.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>Variable</th><th>Voie d'exposition touchée</th><th>Poids dans l'évaluation</th><th>Approche retenue</th></tr>
<tr><td colspan="4">Caractéristiques des sols</td></tr>
<tr><td>Lithologie</td><td>Toutes</td><td>Faible</td><td>Sécuritaire : remblais d'apport assimilés à des limons-sableux sous le bâtiment comme en extérieur. La prise en compte d'une texture plus contraignante des sols (sable) induirait des niveaux de risque du même ordre de grandeur L'incertitude sur la texture des sols n'est donc pas de nature à modifier les conclusions de la présente ARR.</td></tr>
<tr><td>Perméabilité, porosité, teneur en gaz des sols</td><td>Toutes</td><td>Faible</td><td>Sécuritaire : En l'absence de mesures sur site, les valeurs de la littérature (logiciel RISC 4.0) sont prises en compte par défaut. Rappelons que la prise en compte d'une texture plus contraignante des sols et remblais (sable) induirait des niveaux de risque équivalent. L'incertitude sur la texture des remblais n'est donc pas de nature à modifier les conclusions de la présente ARR.</td></tr>
<tr><td>Fraction de carbone organique</td><td>Toutes</td><td>Moyen</td><td>Sécuritaire : La fraction de carbone organique dans les sols au niveau de la source de pollution prise en compte est 0.7%, elle correspond aux terrains Limono-sableux identifié sur les coupes de sondages. Cette valeur est issue de la base de données du logiciel RISC 4.0.</td></tr>
<tr><td colspan="4">Paramètres d'aménagement</td></tr>
<tr><td>Couverture de sol extérieur</td><td>Inhalation extérieur<br>Ingestion de sols et/ou poussières</td><td>Faible</td><td>Sécuritaire/Réaliste recouvrement pérenne et systématique des sols en place, prévu pour l'aménagement du site (conformément au dossier de restriction d'usage) et considéré en 1ère approche comme de l'enrobé.<br>Dans le cadre de la modélisation, ces recouvrements présentent les caractéristiques suivantes :
<table>
<tr><th></th><th>Gamme enrobé asphalté (hors enrobé poreux)</th><th>Bétons (pour mémoire)</th><th>Sols limoneux (pour mémoire)</th></tr>
<tr><td>Porosité</td><td>3%</td><td>12%</td><td>30%</td></tr>
<tr><td>Teneur en gaz</td><td>3%</td><td>5%</td><td>12%</td></tr>
<tr><td>Teneur en eau</td><td>0%</td><td>7%</td><td>18%</td></tr>
</table>
La prise en compte d'un recouvrement de type « terre végétale » (venelle et parkings) ne modifierait pas les niveaux de risque modélisés. L'incertitude sur la nature du recouvrement des sols en place et en extérieur, n'est donc pas de nature à modifier les conclusions de la présente ARR.</td></tr>
<tr><td>Mode constructif</td><td>Inhalation dans l'air intérieur</td><td>Faible</td><td>Les calculs de transfert des pollutions du sol vers l'air intérieur (et les risques induits) ont été calculés en considérant le modèle de Bakker qui prend en compte un transfert des pollutions en lien avec la perméabilité du dallage.<br>Si un autre mode constructif était retenu (modèle de Johnson et Ettinger (1991,) les calculs de transfert seraient différents et intégreraient dans les calculs des transferts à travers les fissures périphériques associées à la rétractation du dallage indépendant lors de son séchage. En considérant ce modèle de transfert, les risques modélisés sont inférieurs à ceux modélisés avec le modèle de Bakker avec un ERI modélisé de $1.5x10^{-7}$ et un QD de 0.0007. Aussi, le choix du modèle n'est pas de nature à remettre en cause les conclusions de l'étude de risque.</td></tr>
<tr><td>Taille et caractéristique du bâtiment et du dallage</td><td>Inhalation dans l'air intérieur</td><td>Faible</td><td>Réaliste : prise en compte d'une pièce de 10 m2 correspondant à un bureau de taille moyenne. L'hypothèse d'une pièce de taille inférieure (bureau de 9 $m^2$) induit des niveaux modélisés de risque inchangés.<br>En outre, il a été pris en compte une hypothèse d'épaisseur de dalle de 15 cm. La variation raisonnable de l'épaisseur de dalle (+/- 5 cm) ne modifie pas les conclusions en termes d'acceptabilité des risques (QD équivalent et ERI légèrement supérieur). Aussi l'épaisseur du dallage n'est pas de nature à remettre en cause les conclusions de l'étude.</td></tr>
<tr><td>Taux de ventilation des bâtiments</td><td>Inhalation dans les bâtiments</td><td>Faible</td><td>Sécuritaire : prise en compte du taux de ventilation retenu pour des bureaux et locaux sans travail physique (en référence à l'article R232-5-3 du décret n°84-1093 (code du travail)), étant donné la configuration du projet (bâtiment industriel pouvant accueillir des bureaux)
<table>
<tr><th>Usage</th><th>Renouvellement d'air (h-1)</th><th>Source d'information</th></tr>
<tr><td>Bureaux</td><td>1 $h^{-1}$</td><td>Pour les bureaux et locaux sans travail physique,<br>débit minimum de 25 $m^3$/h/personne<br>Référence : R232-5-3 du décret n°84-1093 (code du travail)</td></tr>
</table>
Ces taux influencent de manière inversement linéaire les concentrations dans les bâtiments et donc les risques induits.<br>L'hypothèse d'un taux de ventilation 2 fois plus faible (0,5 h-1) correspondant à celui de logements bénéficiant d'une VMC (approche considérée « excessivement majorante » de la modélisation), induirait des niveaux de risque sanitaire plus élevé (ordres de grandeur inchangés), mais restant acceptable pour les travailleurs.</td></tr>
<tr><td>Vieillissement du bâtiment, des systèmes et équipements</td><td>Inhalation dans les bâtiments</td><td>Fort</td><td>Sécuritaire à réaliste : prise en compte d'une qualité de dalle « de bonne qualité » avec une perméabilité à l'air de $2.10^{-13}$ m². Parmi les polluants présents dans les gaz des sols, certains présentent des effets pour lesquels les risques ont été calculés sur le long terme (durées d'exposition de 44 ans).<br>L'hypothèse d'une qualité moindre de la dalle (« bonne» et impliquant une perméabilité de $2.10^{-11}$ m²), induirait des niveaux de risque supérieurs d'un ordre de grandeur pour les effets toxiques sans seuil et proche du seuil inacceptable. L'incertitude sur la qualité de la dalle bétonnée en RdC apparait donc comme un élément important qui influence les conclusions de l'étude.<br>Aussi, le vieillissement du bâtiment ne peut être anticipé dans la présente ARR. Ainsi, il est recommandé d'inscrire dans les documents supports de l'exploitation cet enjeu (carnet de vie, carnet d'entretien), afin que les futurs exploitants mettent en œuvre l'entretien et la maintenance nécessaire. En outre, compte tenu de ces éléments, une 2eme campagne sur les gaz est préconisée pour confirmer le degré d'impact sous le futur dallage.</td></tr>
<tr><td colspan="4">Paramètres liés aux usagés/cibles</td></tr>
<tr><td>Durée d'exposition des cibles</td><td>Inhalation intérieure et extérieure<br>Ingestion de sols et/ou poussières</td><td>Faible</td><td>Sécuritaire : dans le cas d'une durée d'exposition plus grande (+ 2 h en intérieur et/ou extérieur), les niveaux de risque pour les effets à seuil restent inchangés.</td></tr>
</table>

Plusieurs facteurs engendrent des incertitudes sur les risques évalués. Pour la majorité des facteurs engendrant ces incertitudes, l'approche adoptée a été « *sécuritaire* » notamment par l'utilisation des hypothèses suivantes :

- la prise en compte des concentrations maximales mesurées dans les gaz (sur la base des résultats de la campagne d'avril 2026, effectuée par GINGER BURGEAP) ;
- la prise en compte d'une ventilation contraignante des futurs ateliers (correspondant à la ventilation de bureaux) ;
- les durées d'exposition de 44 ans correspondant à la durée totale de travail en France en 2026.

Pour la majorité de ces paramètres, les connaissances actuelles ne permettent pas de réduire ces incertitudes.

En outre, les recommandations principales sont rappelées ci-après :

- Campagne complémentaire sur les gaz des sols, afin de vérifier les ordres de grandeur des concentrations mesurées en avril 2026 et ainsi confirmer les concentrations retenues dans le cadre de la présente analyse des enjeux sanitaires ;
- la mise en place d'une bonne qualité de dalle en limitant au maximum le percement de cette dernière pour le passage de réseau où le cas échéant, porter une attention particulière à l'étanchéité de ces singularités ;
- le maintien du recouvrement systématique des sols en place (dallage ou terre saine sur 30 m d'épaisseur) ;
- la mise en place des nouvelles canalisations AEP en matériaux anti-perméation et enfouies dans des tranchées comblées de sablon sain.

Ces conclusions ne sont valables que pour les conditions précisées ci-dessus. **Dans tous les cas, l'ARR devra être mise à jour en cas de modification des hypothèses d'aménagement retenues et notamment si l'emprise des bâtiments du projet est différente de celle présentée en Figure 3 (plan fourni par KNDS AMMO France).**

# 6. Synthèse et recommandations

## 6.1 Synthèse

KNDS AMMO France exploite une usine de production d'armement sur son site de La Chapelle-Saint-Ursin situé route de Villeneuve (18).

Dans le cadre de l'augmentation des besoins de production, KNDS AMMO FRANCE envisage la construction de nouveaux bâtiments industriels dédiés à la production dont certains sont implantés en Zone 3 et Zone 8 du site (ancienne zone ayant fait l'objet de travaux de réhabilitation). Ces zones étant soumises à restrictions d'usage suite aux travaux de dépollution achevés en 2024, elles ont fait l'objet d'investigations complémentaires sur les sols et les gaz du sol en avril 2026 (rapport GINGER BURGEAP référencé SSP1.Q0018-R01-V1 du 25/06/2026) au droit ou à proximité des futurs bâtiments dans l'emprise des zones 3 et 8 dans l'objectif de statuer sur la compatibilité sanitaire du projet.

Les investigations réalisées en 2026 au droit des futurs bâtiments **situés sur la zone 3** mettent en évidence :

- Sur les sols, une anomalie en hydrocarbures C10-C40 couplée à des traces en trichloroéthylène au droit du sondage Z3-T1. À noter que les métaux n'ont pas été analysés compte tenu de la restriction d'usage lié au recouvrement des sols superficiels.
- Sur les gaz du sol : la présence d'impact en solvants chlorés et en moindre mesure en hydrocarbures dans les 2 piézairs posé en 2026.

Les investigations réalisées en 2026 au droit ou à proximité des futurs bâtiments situés **sur la zone 8** mettent en évidence :

- Sur les sols l'absence d'anomalie pour les composés recherchés ;
- Sur les gaz du sol des traces en hydrocarbures au droit de LCH-BGP-PRZ55. Ces teneurs sont inférieures aux valeurs guides (air intérieur et extérieur) après application du facteur alpha.

### Conclusion sur la compatibilité du projet en zone 3

Dans le cadre de la mission qui nous a été confiée par KNDS AMMO FRANCE, avec les conditions d'études retenues, et en l'état actuel des connaissances scientifiques, les niveaux de risques estimés sont inférieurs aux critères d'acceptabilité tels que définis par la politique nationale de gestion des sites pollués.

**Ainsi, la construction des bâtiments, d'espaces verts et de voiries au droit de la zone 3, conformément au plan masse fourni en Figure 3, est compatible d'un point de vue sanitaire avec les concentrations résiduelles.**

A noter que cette conclusion n'est valable que pour les conditions précisées ci-dessous :

- la réalisation d'une campagne complémentaire sur les gaz des sols, afin de vérifier les ordres de grandeur des concentrations mesurées en avril 2026 et ainsi confirmer les concentrations retenues dans le cadre de la présente analyse des enjeux sanitaires ;
- la mise en place d'une bonne qualité de dalle en limitant au maximum le percement de cette dernière pour le passage de réseau où le cas échéant, porter une attention particulière à l'étanchéité de ces singularités ;
- le maintien du recouvrement systématique des sols en place (dallage ou terre saine sur 30 m d'épaisseur) ;

- la mise en place des nouvelles canalisations AEP en matériaux anti-perméation et enfouies dans des tranchées comblées de sablon sain.

Dans tous les cas, l'analyse de risque devra être mise à jour en cas de modification des hypothèses d'aménagement retenues et notamment si l'emprise des bâtiments du projet est différente de celle en présentée en Figure 3 (plan fourni par KNDS AMMO France).

#### Conclusion sur la compatibilité du projet en zone 8

**Ainsi, la construction des bâtiments, d'espaces verts et de voiries au droit de la zone 8, conformément au plan masse fourni en Figure 3, est compatible d'un point de vue sanitaire avec les concentrations résiduelles dans la mesure où :**

- aucune anomalie n'a été mise en évidence dans les sols de surface en 2026 ;
- que le maintien des anomalies mesurées historiquement dans les sols en composés énergétiques à environ 25 m des futurs bâtiments (sondage PM110) a été validé d'un point de sanitaire dans le cadre de l'analyse de risque réalisée en 2020 (analyse de risque référencé RESILB11082-02 du 17/07/2020 annexé au plan de gestion de la zone 8) ;
- que les traces en hydrocarbures dans les gaz du sol mesurées en avril 2026 (en condition favorable de dégazage) sont inférieures aux valeurs guide pour l'air intérieur après application du facteur alpha (facteur de transfert jugé plutôt sécuritaire) ;
- que l'historique de la zone ne met en évidence aucune activité autre que forestière au droit de l'emprise des futurs bâtiments.

L'analyse de risque devra être mise à jour en cas de modification des hypothèses d'aménagement retenues et notamment si l'emprise des bâtiments du projet est différente de celle présentée en Figure 3 (plan fourni par KNDS AMMO France).

### 6.1.2 Conservation de la mémoire et recommandation

La mise à jour du dossier de restriction d'usage pourra être réalisée (rapport GINGER BURGEAP P0011-R1-v03 du 19/09/2025) en lien avec les données environnementales de 2026.

En outre, GINGER BURGEAP conseil de rester vigilant en cas de construction de nouveaux bâtiments dans des zones d'activité ou d'ancienne zone d'activité du site, et d'évaluer au cas par cas la nécessité d'investigations environnementales pour vérifier la compatibilité des milieux avec les usages projetés.

# 7. Limites d'utilisation d'une étude de pollution

1- Une étude de la pollution du milieu souterrain a pour seule fonction de renseigner sur la qualité des sols, des eaux ou des déchets contenus dans le milieu souterrain. Toute utilisation en dehors de ce contexte, dans un but géotechnique par exemple, ne saurait engager la responsabilité de GINGER BURGEAP.

2- Il est précisé que le diagnostic repose sur une reconnaissance du sous-sol réalisée au moyen de sondages répartis sur le site, soit selon un maillage régulier, soit de façon orientée en fonction des informations historiques ou bien encore en fonction de la localisation des installations qui ont été indiquées par l'exploitant comme pouvant être à l'origine d'une pollution. Ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas, dont l'extension possible est en relation inverse de la densité du maillage de sondages, et qui sont liés à des hétérogénéités toujours possibles en milieu naturel ou artificiel. Par ailleurs, l'inaccessibilité de certaines zones peut entraîner un défaut d'observation non imputable à notre société.

3- Le diagnostic rend compte d'un état du milieu à un instant donné. Des évènements ultérieurs au diagnostic (interventions humaines, traitement des terres pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, ou phénomènes naturels) peuvent modifier la situation observée à cet instant.

4- La responsabilité de GINGER BURGEAP ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes et/ou erronées et en cas d'omission, de défaillance et/ou erreur dans les informations communiquées.

5- Un rapport d'étude de pollution et toutes ses annexes identifiées constituent un ensemble indissociable. Dans ce cadre, toute autre interprétation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle ne saurait engager la responsabilité de GINGER BURGEAP. En particulier l'utilisation même partielle de ces résultats et conclusions par un autre maître d'Ouvrage ou pour un autre projet que celui objet de la mission confiée ne pourra en aucun cas engager la responsabilité de GINGER BURGEAP.

La responsabilité de GINGER BURGEAP ne pourra être engagée en dehors du cadre de la mission objet du présent mémoire si les préconisations ne sont pas mises en œuvre.

# ANNEXES



# Annexe 1. Synthèse du diagnostic complémentaire sur les sols et les gaz du sol en zone 3 et 8 – avril 2026

Cette annexe contient 4 pages

| | | Campagne | | | | | | Campagne du 30/04/2026 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zone d'étude | | | | | | Zone 8 | | | | | | | | Zone 3 | |
| | | Localisation | | | | | | Bois/ Future voirie | | Bois/ Proximité future voirie | Bois/ Futur bâtiment | | | | Bois | Friche/ Futur bâtiment | Zone de stockage/Futur bâtiment |
| | | Echantillon | | | | | | Z8-T1/0.05-1.1 | Z8_T1/1.1-2 | Z8_T2/0.05-1 | Z8_T3/0.05-1 | Z8_T3/1-1.8 | Z8_T4/0.05-1 | Z8_T4/1-2 | Z8_T5/0.05-1 | Z3_T1/1-2 | Z3_T2/1-2 |
| | | Valeur PID (ppmV) | | | | | | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.3 | 2.1 | 1.2 | 0.6 | 1.4 | 3.7 | 1.1 |
| | | Indice organoleptique | | | | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | Lithologie | | | | | | Remblais sablo-limoneux | Remblais sablo-limoneux | Remblais sablo-limoneux | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Remblais limono-sableux | Remblais limoneux |
| BGP323 A-V10 | | Objectif de réhabilitation sur les sols fixé par l'arrêté préfectoral N°2023-1725 Zone 3 | Objectif de réhabilitation sur les sols fixé par l'arrêté préfectoral N°2023-1725 Zone 8 | Bruit de fond (1) | HCSP (seuil de vigilance / seuil de dépistage) | Valeurs limite des ISDI | Quotient de risque (QD) égal à 0,1 et excès de risque Individuel (ERI) inférieur à 1.10-6 pour un usage industriel US EPA (11/2024 | | | | | | | | | | |
| **ANALYSES SUR SOL BRUT** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Matière sèche | % | - | | - | - | - | - | 90.9 | 90.7 | 90.3 | 96 | 95.1 | 92.9 | 91.2 | 93.3 | 94.2 | 93.4 |
| **COT** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COT Carbone Organique Total (2) | mg/kg M.S. | - | | - | - | 30 000 | - | 1 400 | - | - | - | - | 1 100 | - | - | - | - |
| **Métaux et métalloïdes** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Arsenic (As) | mg/kg M.S. | **-** | **15** | **25** | 25/70 | Résultats de lixiviation conformes aux seuils définis pour les déchets inertes dans l'arrêté du 12/12/2014 | **-** | 2.6 | **-** | 3.5 | 1.9 | - | *<1,0* | - | 1.6 | - | - |
| Cadmium (Cd) | mg/kg M.S. | **-** | **0.8** | **0.45** | 15/10 | | - | 0.2 | - | 0.1 | *<0,1* | - | 0.2 | - | *<0,1* | - | - |
| Chrome (Cr) | mg/kg M.S. | **-** | **130** | **90** | - | | - | 13 | - | 13 | 9.4 | - | 19 | - | 7.1 | - | - |
| Cuivre (Cu) | mg/kg M.S. | **-** | **220** | **20** | - | | - | 2.6 | - | 3.2 | 2 | - | 2.1 | - | 1.7 | - | - |
| Mercure (Hg) | mg/kg M.S. | **0.1** | **1.5** | **0.1** | 1/5 | | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | - | - |
| Nickel (Ni) | mg/kg M.S. | **-** | **-** | **60** | - | | - | 5.8 | - | 5.9 | 3.2 | - | 5.2 | - | 2.8 | - | - |
| Plomb (Pb) | mg/kg M.S. | **50** | **52** | **50** | 100 / 300 | | - | 3 | - | 3.2 | 1.8 | - | 3.9 | - | 2.2 | - | - |
| Zinc (Zn) | mg/kg M.S. | **-** | **120** | **100** | - | | - | 12 | - | 11 | 5.5 | - | 14 | - | 5.3 | - | - |
| **Hydrocarbures volatils C5-C10** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fraction > C6 - C8 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,40* | *<0,40* |
| Fraction > C8 - C10 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,40* | *<0,40* |
| Fraction C5-C6 Aliphatiques | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,40* | *<0,40* |
| Fraction > C6-C8 Aliphatiques | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,20* | *<0,20* |
| Fraction > C8-C10 Aliphatiques | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,20* | *<0,20* |
| Fraction aromatique >C6-C8 | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,20* | *<0,20* |
| Fraction aromatique >C8-C10 | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<0,20* | *<0,20* |
| **Somme des hydrocarbures C5-C10** | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *<1,0* | *<1,0* |
| **Indice hydrocarbure C10-C40** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fraction > C10 - C12 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<4,0* | *<4,0* | **6.2** | - | **4.3** | *<4,0* | *<4,0* | *<4,0* | *<4,0* | *<4,0* |
| Fraction > C12 - C16 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<4,0* | *<4,0* | **6.2** | - | *<4,0* | *<4,0* | *<4,0* | *<4,0* | **44.4** | *<4,0* |
| Fraction > C16 - C20 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | **3.7** | - | **5.6** | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | **130** | **2.7** |
| Fraction > C20 - C24 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | **4.2** | - | **5** | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | **95** | *<2,0* |
| Fraction > C24 - C28 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | **3.7** | - | **3.5** | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | **30.8** | *<2,0* |
| Fraction > C28 - C32 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | **5.3** | - | **3.5** | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | **5.3** | *<2,0* |
| Fraction > C32 - C36 inclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | - | **3.3** | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* |
| Fraction > C36 - C40 exclus | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | - | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* | *<2,0* |
| **Somme des hydrocarbures C10-C40** | mg/kg M.S. | 2500 | | LQ | - | 500 | - | *<20,0* | *<20,0* | **31.8** | - | **29** | *<20,0* | *<20,0* | *<20,0* | **310** | *<20,0* |
| **HAP** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Naphtalène | mg/kg M.S. | - | | *0.125* | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Acénaphtylène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Acénaphtène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Fluorène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Phénanthrène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Anthracène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Fluoranthène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Pyrène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Benzo(a)anthracène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Chrysène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Benzo(b)fluoranthène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Benzo(k)fluoranthène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Benzo(a)pyrène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Dibenzo(a,h)anthracène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Benzo(g,h,i)pérylène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| Indéno(1,2,3-cd)pyrène | mg/kg M.S. | - | | - | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| **Somme des HAP** | mg/kg M.S. | - | | *25* | - | 50 | - | n.d. | n.d. | n.d. | - | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| **BTEX** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Benzène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| Toluène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| Ethylbenzène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,050* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| m,p-Xylène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | - | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* |
| o-Xylène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | - | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* | *<0,050* |
| **Somme des BTEX** | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | 6 | - | n.d. | n.d. | n.d. | - | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| **COHV** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| Trichloroéthylène (TCE) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | **0.12** | *<0,05* |
| Cis-1,2-dichloroéthylène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,0250* | *<0,0250* | - | *<0,0250* | - | *<0,0250* | *<0,0250* | *<0,0250* | *<0,0250* |
| Trans-1,2-dichloroéthylène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,0250* | *<0,0250* | - | *<0,0250* | - | *<0,0250* | *<0,0250* | *<0,0250* | *<0,0250* |
| 1,1-dichloroéthylène | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,10* | *<0,10* | - | *<0,10* | - | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* |
| Chlorure de Vinyle | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,02* | *<0,02* | - | *<0,02* | - | *<0,02* | *<0,02* | *<0,02* | *<0,02* |
| 1,1,2-trichloroéthane | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| 1,1,1-trichloroéthane | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| 1,2-dichloroéthane | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| 1,1-dichloroéthane | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,10* | *<0,10* | - | *<0,10* | - | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* | *<0,10* |
| Tétrachlorométhane (tétrachlorure de carbone) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| Trichlorométhane (chloroforme) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| Dichlorométhane | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | - | *<0,05* | *<0,05* | - | *<0,05* | - | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* | *<0,05* |
| **Somme des COHV (3)** | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | 2 | - | - | n.d. | n.d. | - | n.d. | - | n.d. | n.d. | **0.12** | n.d. |

| | | Campagne | | | | | | Campagne du 30/04/2026 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zone d'étude | | | | | | Zone 8 | | | | | | | | Zone 3 | |
| | | Localisation | | | | | | Bois/ Future voirie | | Bois/ Proximité future voirie | Bois/ Futur bâtiment | | | | Bois | Friche/ Futur bâtiment | Zone de stockage/Futur bâtiment |
| | | Echantillon | | | | | | Z8-T1/0.05-1.1 | Z8_T1/1.1-2 | Z8_T2/0.05-1 | Z8_T3/0.05-1 | Z8_T3/1-1.8 | Z8_T4/0.05-1 | Z8_T4/1-2 | Z8_T5/0.05-1 | Z3_T1/1-2 | Z3_T2/1-2 |
| | | Valeur PID (ppmV) | | | | | | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.3 | 2.1 | 1.2 | 0.6 | 1.4 | 3.7 | 1.1 |
| | | Indice organoleptique | | | | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | Lithologie | | | | | | Remblais sablo-limoneux | Remblais sablo-limoneux | Remblais sablo-limoneux | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Calcaire | Remblais limono-sableux | Remblais limoneux |
| BGP323 A-V10 | | Objectif de réhabilitation sur les sols fixé par l'arrêté préfectoral N°2023-1725 Zone 3 | Objectif de réhabilitation sur les sols fixé par l'arrêté préfectoral N°2023-1725 Zone 8 | Bruit de fond (1) | HCSP (seuil de vigilance / seuil de dépistage) | Valeurs limite des ISDI | Quotient de risque (QD) égal à 0,1 et excès de risque Individuel (ERI) inférieur à 1.10-6 pour un usage industriel US EPA (11/2024 | | | | | | | | | | |
| **PCB** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PCB (28) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (52) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (101) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (118) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (138) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (153) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| PCB (180) | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - | *<0,001* | - | - | - | - |
| **Somme des PCB** | mg/kg M.S. | - | | LQ | - | 1 | - | n.d. | - | - | - | - | n.d. | - | - | - | - |
| **Explosifs** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,4,6-Trinitrotoluène | mg/kg M.S. | - | 51 | LQ | - | - | 51 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| 4-Amino-2,6-dinitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 11 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| 2-Amino-4,6-dinitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 11 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| Hexogène (RDX) | mg/kg M.S. | - | 38 | LQ | - | - | 38 | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| Nitroglycérine | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 12 | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| 1,3,5-Trinitrobenzène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 3200 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| Diphénylamine (DPA) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 8200 | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| 2-Nitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 15 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| 3-Nitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 8.2 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| 4-Nitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 140 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| 2,4-Dinitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 7.4 | *<0,05* | - | - | - | - | *<0,05* | - | *<0,05* | - | - |
| 2,6-Dinitrotoluène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 1.5 | *<0,05* | - | - | - | - | *<0,05* | - | *<0,05* | - | - |
| 1,3-Dinitrobenzène | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 7.4 | *<0,050* | - | - | - | - | *<0,050* | - | *<0,050* | - | - |
| Dinitrate d'éthylèneglycol (EGDN) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | - | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| Dinitrate de diéthyleneglycol (DEGN) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | - | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| Octogène (HMX) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 5700 | *<0,10* | - | - | - | - | *<0,10* | - | *<0,10* | - | - |
| Penthrite (PETN) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 530 | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| Acide picrique (PA) | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | 160 | *<0,10* | - | - | - | - | *<0,10* | - | *<0,10* | - | - |
| Hexyle | mg/kg M.S. | - | - | LQ | - | - | - | *<0,20* | - | - | - | - | *<0,20* | - | *<0,20* | - | - |
| **ANALYSES SUR ELUAT** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Paramètres généraux** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | - | - | | - | - | - | - | 8.7 | - | - | - | - | 8.8 | - | - | - | - |
| Conductivité corrigée à 25 °C | µS/cm | - | | - | - | - | - | 59.1 | - | - | - | - | 58.5 | - | - | - | - |
| Fraction soluble (4) | mg/kg M.S. | - | | - | - | 4000 | - | *<1000* | - | - | - | - | *<1000* | - | - | - | - |
| Carbone organique total | mg/kg M.S. | - | | - | - | 500 | - | *<200* | - | - | - | - | *<200* | - | - | - | - |
| Indice phénol | mg/kg M.S. | - | | - | - | 1 | - | *<0.2* | - | - | - | - | *<0.2* | - | - | - | - |
| **Anions** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fluorures | mg/kg M.S. | - | | - | - | 10 | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - |
| Chlorures (4) | mg/kg M.S. | - | | - | - | 800 | - | *<10* | - | - | - | - | *<10* | - | - | - | - |
| Sulfates (4) | mg/kg M.S. | - | | - | - | 1000 | - | *<50* | - | - | - | - | *<50* | - | - | - | - |
| **Métaux et métalloïdes** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Antimoine | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.06 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Arsenic | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.5 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Baryum | mg/kg M.S. | - | | - | - | 20 | - | *<0.1* | - | - | - | - | *<0.1* | - | - | - | - |
| Cadmium | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.04 | - | *<0.001* | - | - | - | - | *<0.001* | - | - | - | - |
| Chrome | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.5 | - | *<0.02* | - | - | - | - | *<0.02* | - | - | - | - |
| Cuivre | mg/kg M.S. | - | | - | - | 2 | - | *<0.02* | - | - | - | - | 0.04 | - | - | - | - |
| Mercure | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.01 | - | *<0.0003* | - | - | - | - | *<0.0003* | - | - | - | - |
| Molybdène | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.5 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Nickel | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.4 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Plomb | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.5 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Selenium | mg/kg M.S. | - | | - | - | 0.1 | - | *<0.05* | - | - | - | - | *<0.05* | - | - | - | - |
| Zinc | mg/kg M.S. | - | | - | - | 4 | - | *<0.02* | - | - | - | - | *<0.02* | - | - | - | - |

LQ : Limite de quantification du laboratoire / n.d. : Non détecté

(1) Valeurs **en gras** : source = Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols, Denis BAIZE, INRA. *En italique* : source = ATSDR

(2) [Pour l'acceptation en ISDI], une valeur limite plus élevée peut être admise, à condition que la valeur limite de 500 mg/kg de matière sèche soit respectée pour le carbone organique total sur éluat, soit au pH du sol, soit pour un pH situé entre 7,5 et 8,0.

(3) Valeur limite des ISDI : valeur non réglementaire mais parfois appliquée par les gestionnaires d'ISDI

(4) Si le déchet ne respecte pas au moins une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble, le déchet peut être encore jugé conforme aux critères d'admission [en ISDI] s'il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble.

| |
|---|
| **Concentration supérieure au bruit de fond et inférieure aux valeurs limites des ISDI** |
| **Concentration supérieure au seuil de vigilance du HCSP** |
| **Concentration supérieure au seuil de dépistage du HCSP** |
| **Concentration supérieure aux valeurs limites des ISDI, et inférieures au Bruit de fond sols sous influence industrielle US EPA (11/2024)** |
| **Quotient de risque (QD) égal à 0,1 et excès de risque Individuel (ERI) inférieur à 1.10-6 pour un usage industrielle US EPA (11/2024** |

| Résultats investigation gaz du sol zone 3 | | AIR INTERIEUR | | | Campagne de prélèvement du 19/05/26 – Futur bâtiment Zone 3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Valeur réglementaire Décret n° 2011-1727 | VGAI ANSES, VRAI HCSP, INDEX, VG OMS (1) | Seuil R1 "établissements sensibles" | LCH-BGP-PRZ58- 1.5 m Intérieur | | LCH-BGP-PRZ59- 1.5 m Intérieur | |
| | | | | | Résultat brut | Avec facteur d'abattement de 0.05 | Résultat brut | Avec facteur d'abattement de 0.05 |
| **Temps de pompage** | min | | | | 135 | | 121 | |
| **Débit de pompage** | l/min | | | | 0.3024 | | 0.302 | |
| **Volume pompé** | $m^3$ | | | | 0.041 | | 0.037 | |
| **Hydrocarbures par TPH** | | | | | | | | |
| Aliphatic nC>5-nC6 | µg/m3 | - | - | 18 000 | *<49* | *<2.45* | *<55* | *<2.75* |
| Aliphatic nC>6-nC8 | µg/m3 | - | - | 18 000 | 69 | 3.45 | *<55* | *<2.75* |
| Aliphatic nC>8-nC10 | µg/m3 | - | - | 1 000 | **171** | 8.55 | **55** | 2.75 |
| Aliphatic nC>10-nC12 (2) | µg/m3 | - | - | 1 000 | **132** | 6.6 | **99** | 4.95 |
| Aliphatic nC>12-nC16 | µg/m3 | - | - | 1 000 | 130 | 6.5 | *<55* | *<2.75* |
| Aromatic nC>6-nC7 (benzène) | µg/m3 | voir benzène | voir benzène | voir benzène | 8.1 | 0.405 | 2.3 | 0.115 |
| Aromatic nC>7-nC8 (toluène) | µg/m3 | voir toluène | voir toluène | voir toluène | 4.7 | 0.235 | 6.3 | 0.315 |
| Aromatic nC>8-nC10 | µg/m3 | - | - | 200 | *<49* | *<2.45* | *<55* | *<2.75* |
| Aromatic nC>10-nC12 | µg/m3 | - | - | 200 | *<49* | *<2.45* | *<55* | *<2.75* |
| Aromatic nC>12-nC16 | µg/m3 | - | - | 200 | 86 | 4.3 | *<55* | *<2.75* |
| **Somme des TPH** | µg/m3 | - | - | - | 600.8 | 30.04 | 162.6 | 8.13 |
| **HAP** | | | | | | | | |
| Naphtalène | µg/m3 | - | ***10*** | 10 | *<2.4* | *<0.12* | *<2.7* | *<0.135* |
| **BTEX** | | | | | | | | |
| Benzène | µg/m3 | 2 | 2 | 2 | **8.1** | 0.405 | **2.5** | 0.125 |
| Toluène | µg/m3 | - | 20000 | 20000 | 4.7 | 0.235 | 6.3 | 0.315 |
| Ethylbenzène | µg/m3 | - | 1500 | 1500 | *<2.4* | *<0.12* | *<2.7* | *<0.135* |
| m+p - Xylène | µg/m3 | - | *200* | 100 | 3.4 | 0.17 | 7.9 | 0.395 |
| o - Xylene | µg/m3 | - | *200* | | *<2.4* | *<0.12* | *<2.7* | *<0.135* |
| **COHV** | | | | | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | µg/m3 | - | 40 | 250 | **2241** | **112.05** | **5.7** | 0.285 |
| Trichloroéthylène (TCE) | µg/m3 | - | 10 | 10 | **3184** | **159.2** | **30** | 1.5 |
| Cis-1,2-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | 60 | **157** | 7.85 | *<5.5* | *<0.275* |
| Trans-1,2-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | - | 13 | 0.65 | *<5.5* | *<0.275* |
| 1,1-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | - | *<2.4* | *<0.12* | *<2.7* | *<0.135* |
| Chlorure de Vinyle | µg/m3 | - | - | 2.6 | *<2.4* | *<0.12* | *<2.7* | *<0.135* |
| 1,1,2-trichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| 1,1,1-trichloroéthane | µg/m3 | - | - | 1000 | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| 1,2-dichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| 1,1-dichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| Tétrachlorométhane (tétrachlorure de carbone) | µg/m3 | - | - | 110 | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| Trichlorométhane (chloroforme) | µg/m3 | - | - | 63 | *<4.9* | *<0.245* | *<5.5* | *<0.275* |
| Dichlorométhane | µg/m3 | - | - | 10 | *<6.1* | *<0.305* | *<6.8* | *<0.34* |

n.d. : Non détecté

(1) en gras : valeur repère du HCSP, souligné : valeur guide de l'ANSES (VGAI), en italique : valeur guide projet

(2) La valeur de bruit de fond OQAI concerne la somme du n-décane et du n-undécane.

| | |
|---|---|
| **Concentration supérieure aux valeurs règlementaires** | **AIR INTERIEUR** |
| **Concentration supérieure à une valeur guide** | |
| **Concentration supérieure au seuil R1 des "établissements sensibles"** | |

## Résultats des investigations des gaz du sol zone 8

| | | AIR EXTERIEUR | | | AIR INTERIEUR | | | Campagne de prélèvement du 19/05/26 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Proximité futur bâtiment zone 8 | | Futur bâtiment Zone 8 | | | |
| | | | | | | | | LCH-BGP-PRZ55 | | LCH-BGP-PRZ56 | | LCH-BGP-PRZ57 | |
| | | | | | | | | 1,5 m | | 1,5 m | | 1,5 m | |
| | | | | | | | | Extérieur | | Intérieur | | Intérieur | |
| | | Bruit de fond (source OQAI (P90) ou INERIS, 2009 (urbain)) | Valeurs réglementaires - décret n° 2010-1250 (valeur limite/valeur cible) | Valeurs guide OMS | Valeur réglementaire Décret n° 2011-1727 | VGAI ANSES, VRAI HCSP, INDEX, VG OMS (1) | Seuil R1 "établissements sensibles" | Résultat brut | Avec facteur d'abattement de 0,05 | Résultat brut | Avec facteur d'abattement de 0,05 | Résultat brut | Avec facteur d'abattement de 0,05 |
| **Temps de pompage** | min | | | | | | | 139 | | 135 | | 140 | |
| **Débit de pompage** | l/min | | | | | | | 0,32295 | | 0,33255 | | 0,30645 | |
| **Volume pompé** | $m^3$ | | | | | | | 0,045 | | 0,045 | | 0,043 | |
| **Hydrocarbures par TPH** | | | | | | | | | | | | | |
| Aliphatic nC>5-nC6 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 18 000 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aliphatic nC>6-nC8 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 18 000 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aliphatic nC>8-nC10 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 1 000 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aliphatic nC>10-nC12 (2) | µg/m3 | 9,8 | - | - | - | - | 1 000 | **60** | 3 | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aliphatic nC>12-nC16 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 1 000 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aromatic nC>6-nC7 (benzène) | µg/m3 | voir benzène | voir benzène | voir benzène | voir benzène | voir benzène | voir benzène | 1,2 | 0,06 | 1,2 | 0,06 | 1,5 | 0,075 |
| Aromatic nC>7-nC8 (toluène) | µg/m3 | voir toluène | voir toluène | voir toluène | voir toluène | voir toluène | voir toluène | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | 3,7 | 0,185 |
| Aromatic nC>8-nC10 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 200 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aromatic nC>10-nC12 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 200 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| Aromatic nC>12-nC16 | µg/m3 | - | - | - | - | - | 200 | *<45* | *<2,25* | *<45* | *<2,25* | *<47* | *<2,35* |
| **Somme des TPH** | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | 61,2 | 3,06 | 1,2 | 0,06 | 5,2 | 0,26 |
| **HAP** | | | | | | | | | | | | | |
| Naphtalène | µg/m3 | 0,009 | - | - | - | ***10*** | 10 | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | *<2,3* | *<0,115* |
| **BTEX** | | | | | | | | | | | | | |
| Benzène | µg/m3 | 2,2 | 5 | 1,7 | 2 | 2 | 2 | 1,3 | 0,065 | 1,1 | 0,055 | 1,6 | 0,08 |
| Toluène | µg/m3 | 9 | - | - | - | 20000 | 20000 | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | 3,7 | 0,185 |
| Ethylbenzène | µg/m3 | 2,1 | - | - | - | 1500 | 1500 | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | *<2,3* | *<0,115* |
| m+p - Xylène | µg/m3 | 5,6 | - | - | - | *200* | 100 | 5,3 | 0,265 | *<2,2* | *<0,11* | 5,4 | 0,27 |
| o - Xylene | µg/m3 | 2,3 | - | - | - | *200* | | **2,7** | 0,135 | *<2,2* | *<0,11* | *<2,3* | *<0,115* |
| **COHV** | | | | | | | | | | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | µg/m3 | 2,4 | - | 250 | - | 40 | 250 | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| Trichloroéthylène (TCE) | µg/m3 | 1,6 | - | 23 | - | 10 | 10 | *<1,1* | *<0,055* | *<1,1* | *<0,055* | *<1,2* | *<0,06* |
| Cis-1,2-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | - | - | - | 60 | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| Trans-1,2-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| 1,1-dichloroéthylène | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | *<2,3* | *<0,115* |
| Chlorure de Vinyle | µg/m3 | - | - | 10 | - | - | 2,6 | *<2,2* | *<0,11* | *<2,2* | *<0,11* | *<2,3* | *<0,115* |
| 1,1,2-trichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| 1,1,1-trichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | - | - | 1000 | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| 1,2-dichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| 1,1-dichloroéthane | µg/m3 | - | - | - | - | - | - | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| Tétrachlorométhane (tétrachlorure de carbone) | µg/m3 | - | - | - | - | - | 110 | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| Trichlorométhane (chloroforme) | µg/m3 | - | - | - | - | - | 63 | *<4,5* | *<0,225* | *<4,5* | *<0,225* | *<4,7* | *<0,235* |
| Dichlorométhane | µg/m3 | - | - | - | - | - | 10 | *<5,6* | *<0,28* | *<5,6* | *<0,28* | *<5,8* | *<0,29* |

n.d. : Non détecté

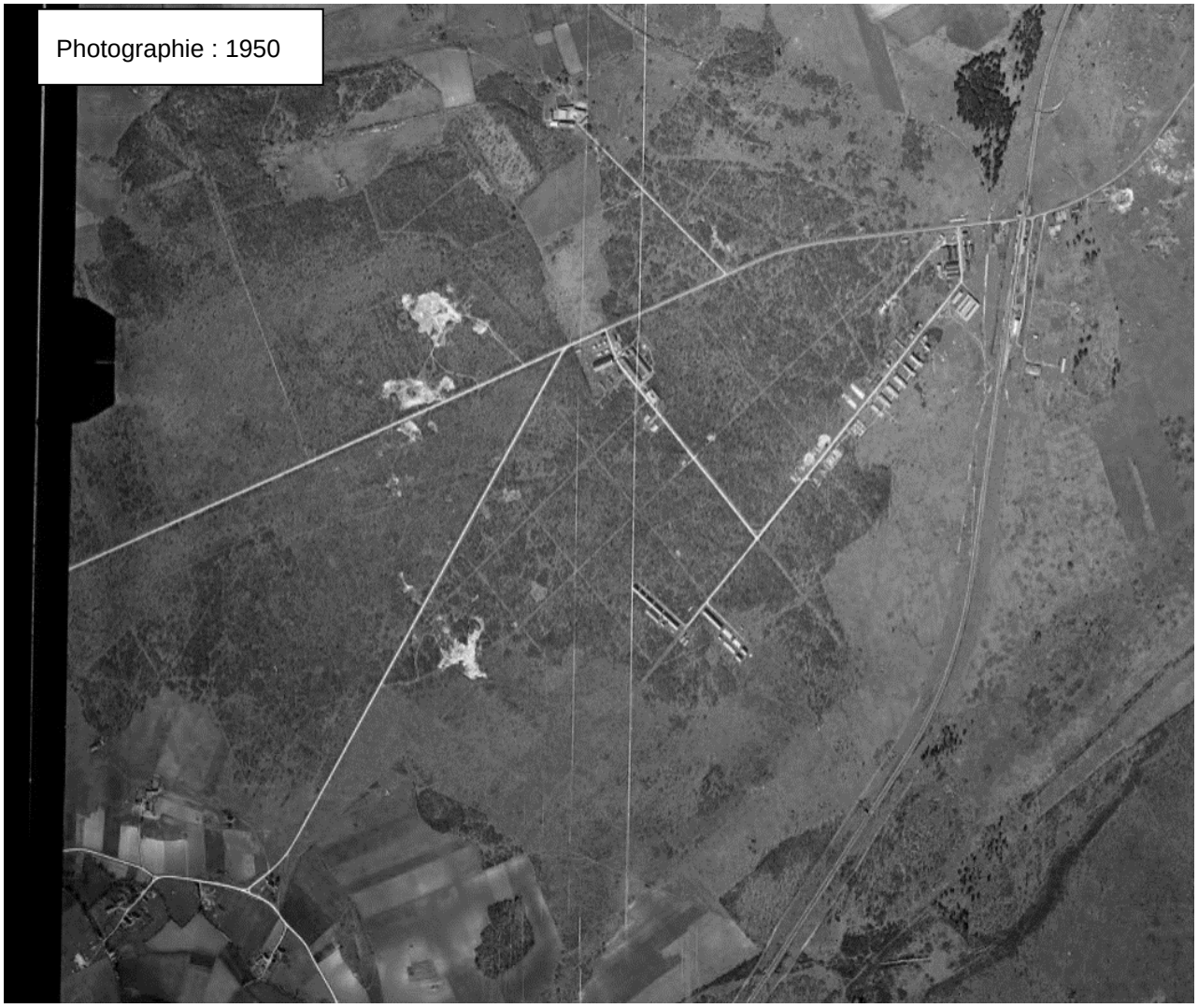
(1) en gras : valeur repère du HCSP, souligné : valeur guide de l'ANSES (VGAI), en italique : valeur guide projet

(2) La valeur de bruit de fond OQAI concerne la somme du n-décane et du n-undécane.

| | |
|---|---|
| **Concentration supérieure au bruit de fond** | **AIR EXTERIEUR** |
| **Concentration supérieure aux valeurs règlementaires** | |
| **Concentration supérieure à une valeur guide** | |
| **Concentration supérieure au bruit de fond** | **AIR INTERIEUR** |
| **Concentration supérieure aux valeurs règlementaires** | |
| **Concentration supérieure à une valeur guide** | |
| **Concentration supérieure au seuil R1 des "établissements sensibles"** | |

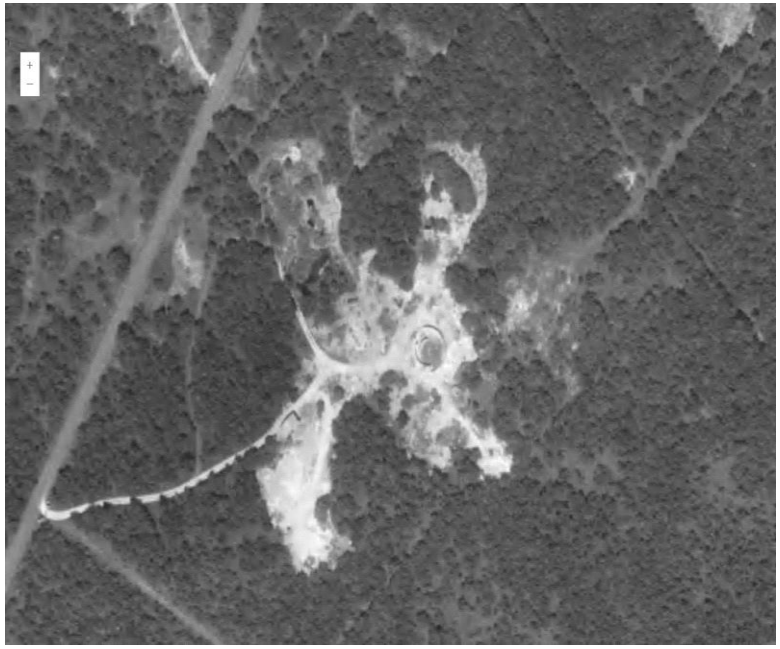
# Annexe 2. Photographie aériennes anciennes zone 8

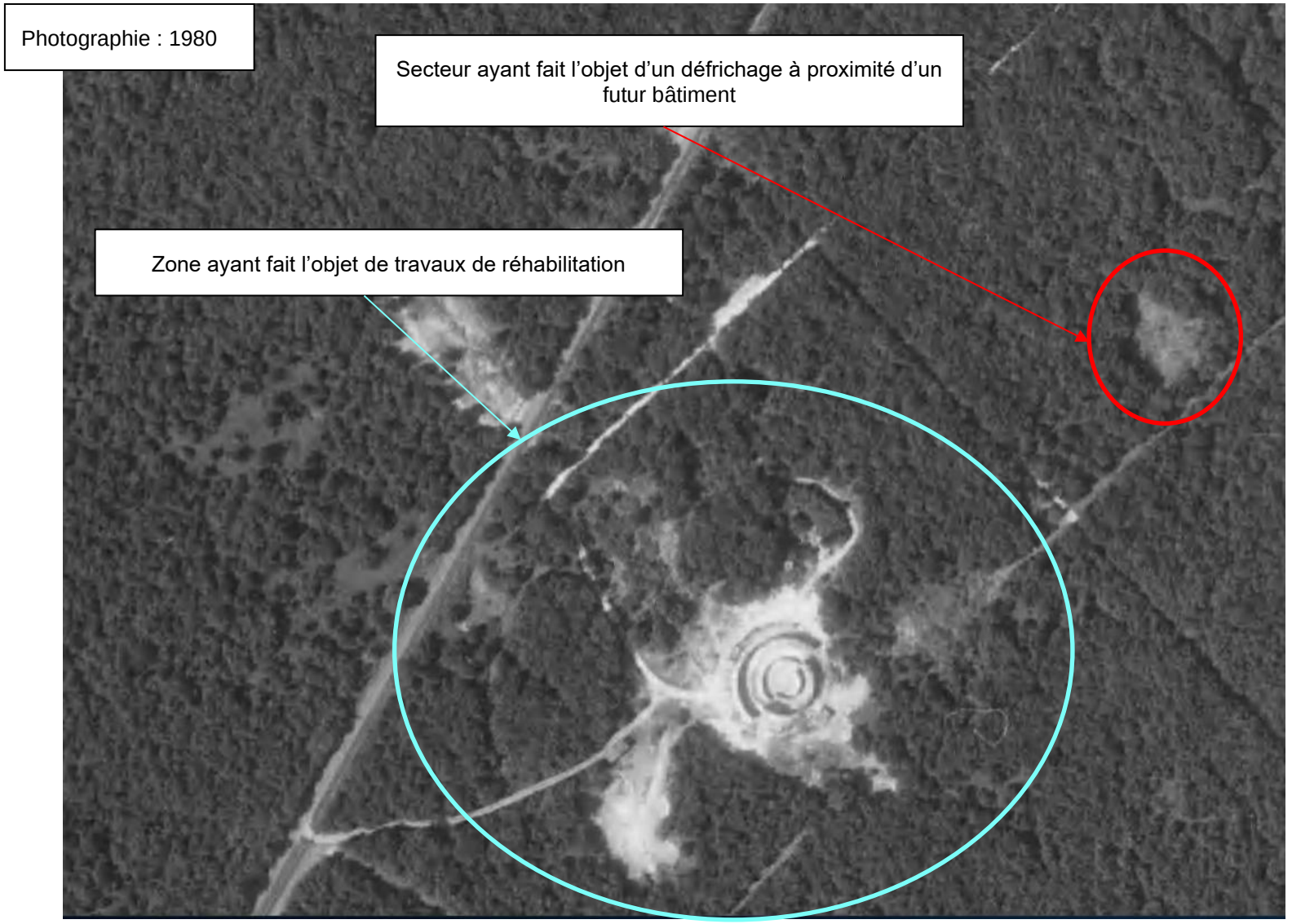
Cette annexe contient 2 pages


Photographie : 1950

Photographie : 1969






Photographie : 1980
Secteur ayant fait l'objet d'un défrichage à proximité d'un futur bâtiment
Zone ayant fait l'objet de travaux de réhabilitation

Photographie : 1994

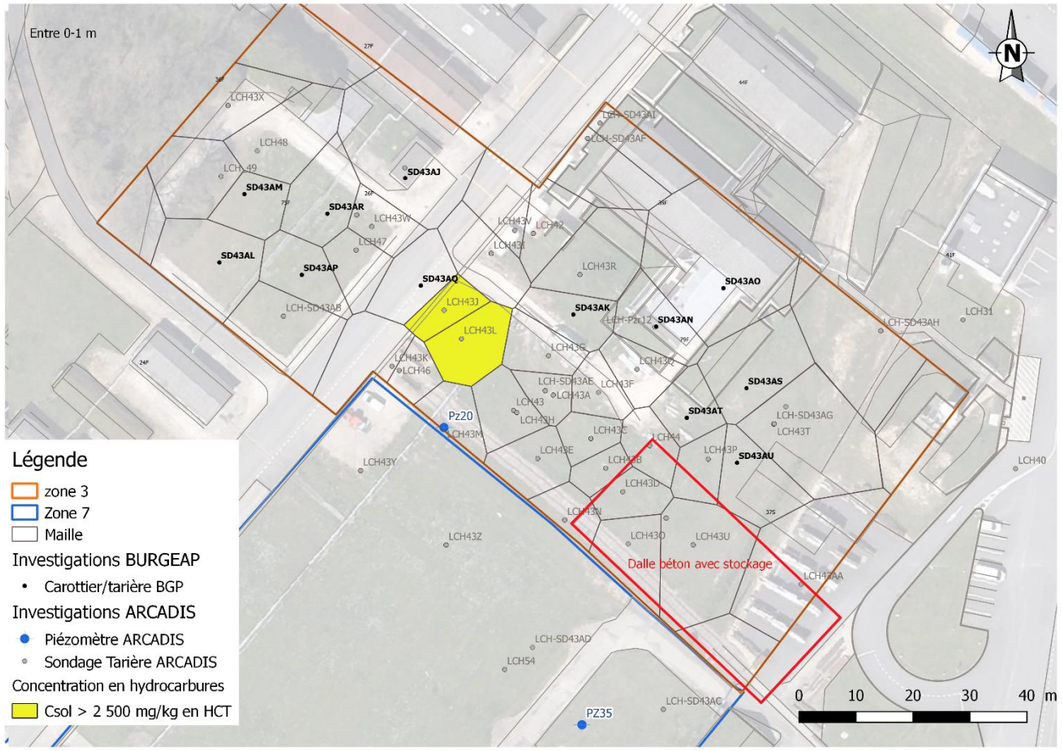


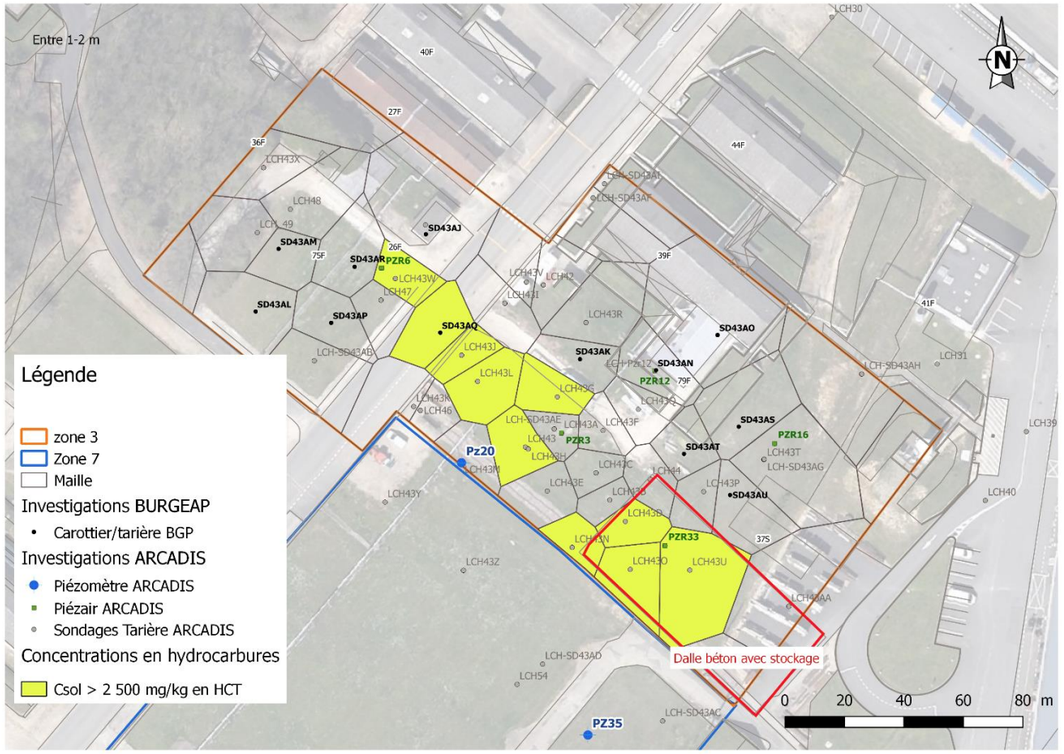
# Annexe 3. Synthèse des impacts au droit des zone 3 avant travaux de réhabilitation

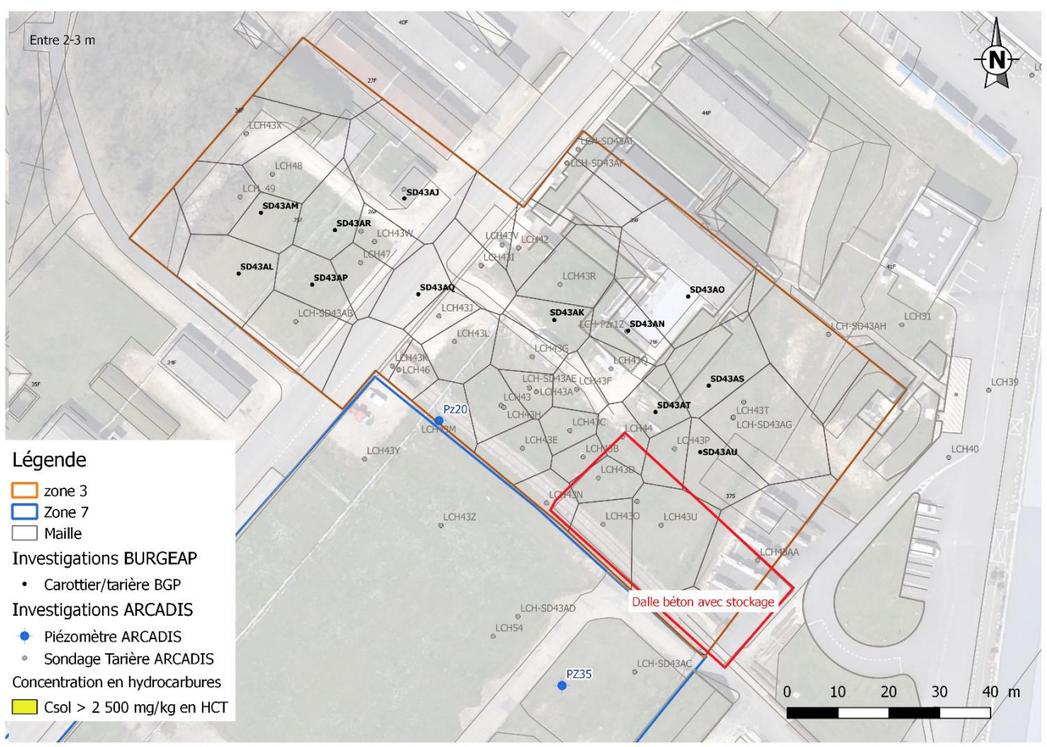
Cette annexe contient 8 pages

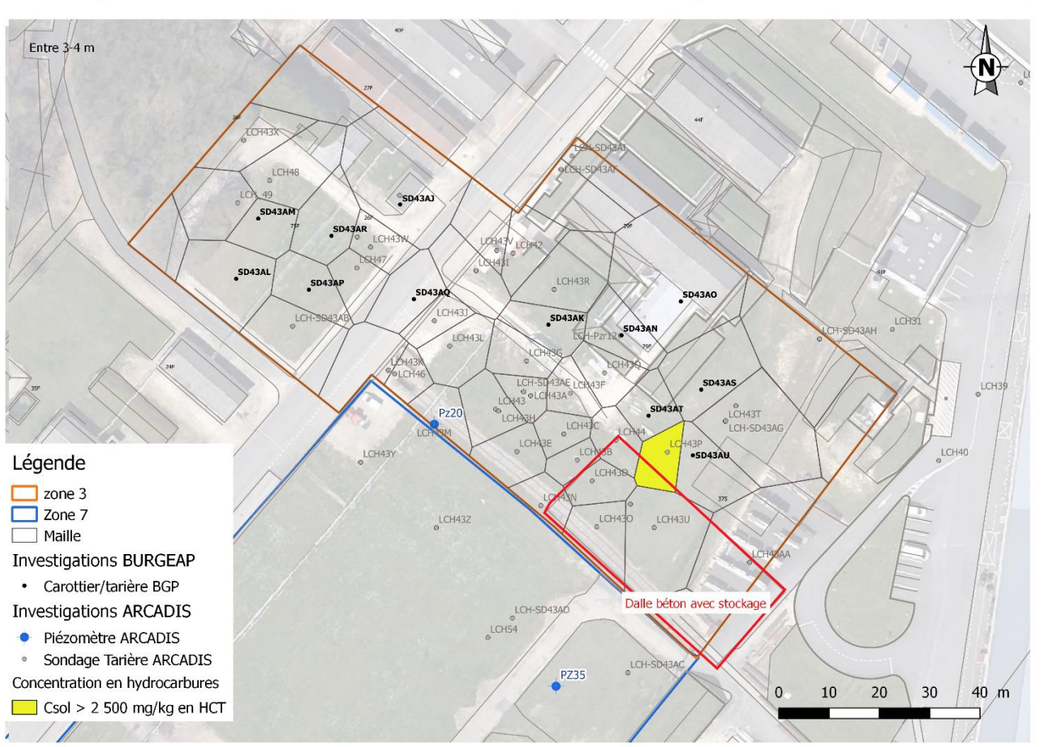


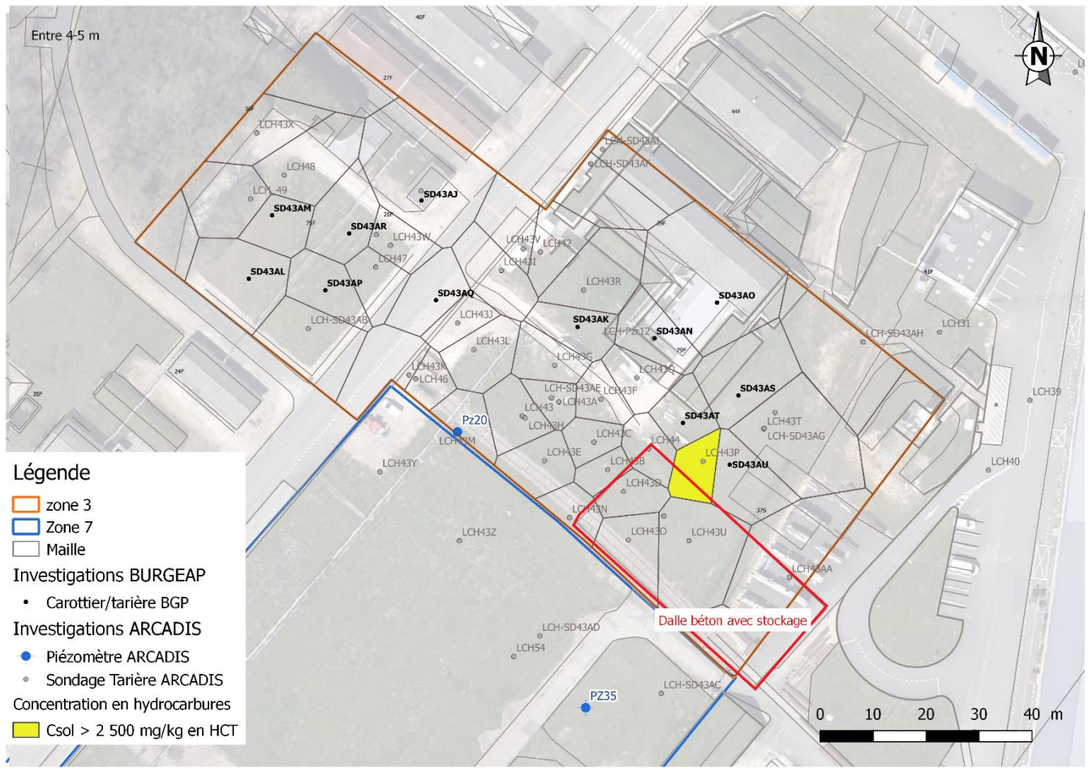

**Localisation des impacts en métaux et solvant chloré (COHV) au droit de la zone 3 (avant travaux)**

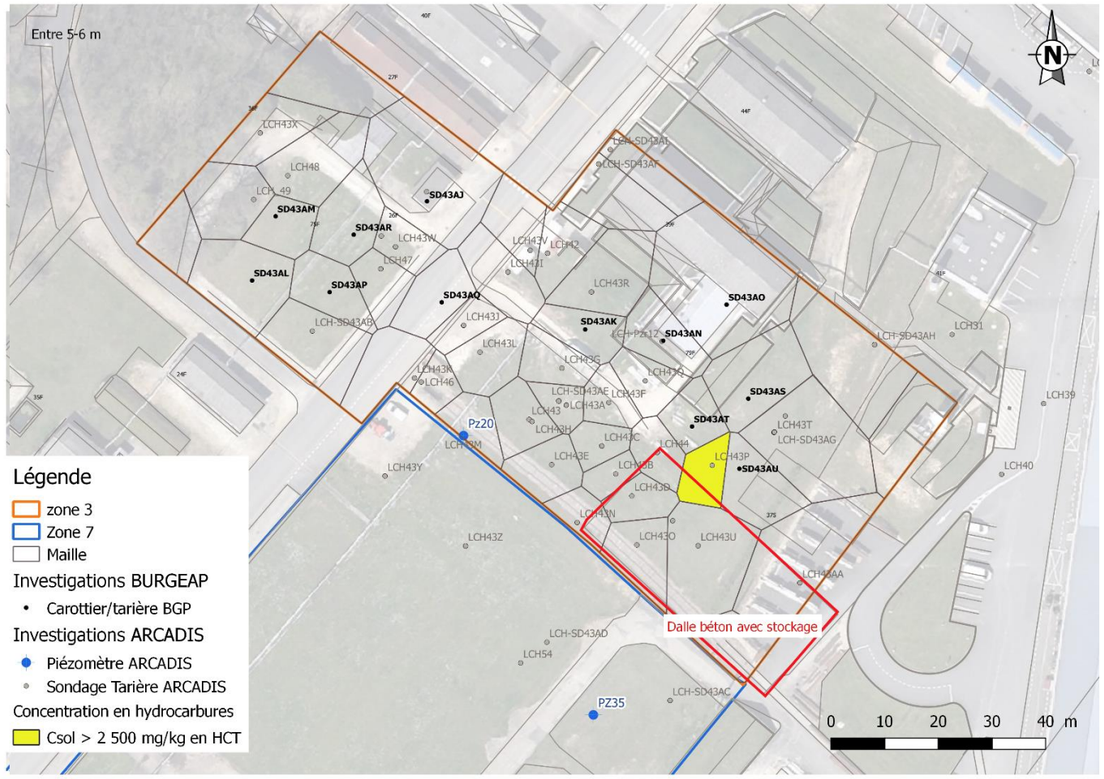

Entre 0-1 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
Concentration en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Dalle béton avec stockage
Pz20
PZ35
0 10 20 30 40 m


Entre 1-2 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Piézair ARCADIS
Sondages Tarière ARCADIS
Concentrations en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Dalle béton avec stockage
Pz20
PZ35
0 20 40 60 80 m


Entre 2-3 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
Concentration en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Dalle béton avec stockage
Pz20
PZ35
0 10 20 30 40 m


Entre 3-4 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
Concentration en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Dalle béton avec stockage
Pz20
PZ35
0 10 20 30 40 m

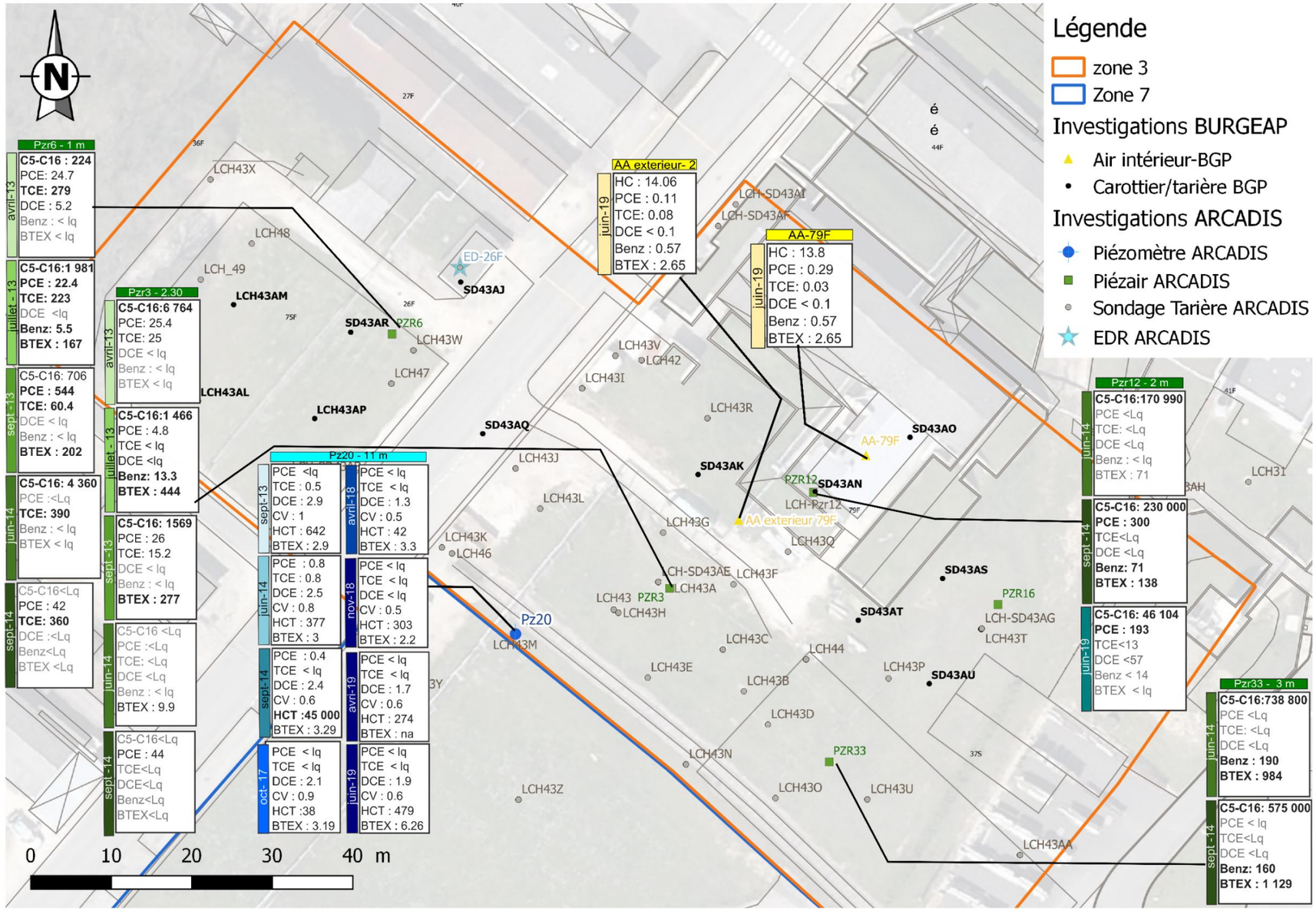

Entre 4-5 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
Concentration en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Pz20
PZ35
Dalle béton avec stockage
0 10 20 30 40 m


Entre 5-6 m
Légende
zone 3
Zone 7
Maille
Investigations BURGEAP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
Concentration en hydrocarbures
Csol > 2 500 mg/kg en HCT
Pz20
PZ35
Dalle béton avec stockage
0 10 20 30 40 m

| Milieux | Résultats au droit de la zone 3 avant travaux | Commentaire |
|---|---|---|
| Sols (série LCH43) | Les investigations sur les sols montrent un impact en hydrocarbures semi-volatils sur une majorité des sondages (38 % des sondages présentent des teneurs supérieures à 1 000 mg/kg en HC). Les fractions majoritaires sont les fractions C12-C20 (signature d'une pollution de type fuel). Les impacts sont majoritairement présents entre 1 et 2 m de profondeur (Cmax = 7 210 mg/kg en C10-C40 sur LCH43AG dont 3 060 mg/kg en C10-C16). Seul le sondage LCH43P, présente un impact entre 1 et 6 m de profondeur minimum (2 950 mg/kg en C10-C40 à 6 m de profondeur).. À noter que ces impacts sont souvent accompagnés d'odeurs en hydrocarbures dans les sols.<br>Par ailleurs, les résultats mettent en évidence dans les sols :<br>• un impact en Antimoine (Cmax = 23 mg/kg) et Plomb (Cmax= 300 mg/kg) sur le sondage LCH47 entre 1 m et 1,7 m sur une surface comprise entre 20 et 40 $m^2$ ainsi qu'une anomalie en mercure (1,3 mg/kg) entre 1 et 1,5 m de profondeur au droit de LCH43M (sondage situé en limite avec la zone 7) et l'absence d'impact en métaux sur le reste des échantillons analysés . ;<br>• les COHV ont été détectés sur plusieurs sondages en partie Est et Ouest de la zone. La concentration maximale est mise en évidence en surface du sondage LCH47 (ancien atelier de maintenant des moyens généraux) entre 0.3 et 1 m de profondeur avec 3 mg/kg pour la somme des COHV ;<br>• l'absence d'impact dans les sols par des matières énergétiques, seules des traces en hexogène (0.42 mg/kg) sont relevées sur le sondage SD43AH entre 3 et 4 m ;<br>• des traces en BTEX (somme inférieure à 1 mg/kg) ;<br>• des traces en HAP inférieures au bruit de fond urbain de 25 mg/kg ;<br>• les PCB sont détectés 1 fois (teneur proche de la limite de quantification et peu significative). | |
| Eaux souterraines (Pz20) | **Pz20 - 11 m de profondeur (suivi depuis 2013) :** les concentrations sont du même ordre de grandeur en 2013 qu'en 2019.<br>• présence de traces en HC entre 300 à 600 µg/L et traces de BTEX (2 µg/L) avec présence de Benzène ;<br>• fait marquant en sept 2014 : [HC] = 45 000 mg/kg et sonde grasse constatée (présence de NAPL[3]?) ;<br>• présence de traces de COHV avec présence de CV du même ordre de grandeur que le DCE (entre 1 et 2 µg/L) ;. | L'impact est peu marqué en hydrocarbures depuis 2013 (à l'exception de la campagne de septembre 2014 sur Pz20). Il est possible qu'une erreur de mesure ait eu lieu lors de cette campagne (interversion d'ouvrage ou erreur laboratoire), compte tenu des concentrations mesurées sur les campagnes suivantes (non significatives).<br>En mettant à l'écart la mesure de septembre 2014, les hydrocarbures dans la zone 3 semblent peu mobiles (absence de phase organique présente dans les piézomètres). Les teneurs en hydrocarbures dissous semblent cohérentes avec les teneurs mesurées dans les sols de ce secteur. |
| Gaz du sol (PzR3, Pzr12, Pzr16, Pzr33) | **PZr6 (1 m de profondeur) - Pzr3 (2,3 m de profondeur) - ouvrages non prélevés en 2019 :**<br>• impact en hydrocarbures de l'ordre de 1 000 à 6 000 µg/$m^3$ en juillet 2013 puis diminution des concentrations en 2014 avec des teneurs qui passent en dessous de la limite de quantification du laboratoire (dernière campagne date de septembre 2014) ;<br>• impact en TCE sur Pzr6 (Cmax =390 µg/$m^3$) et en moindre mesure sur Pzr3 (44 µg/m3 en septembre 2014) ;<br>• les BTEX sont détectés en 2013 (Cmax =444 µg/$m^3$), mais sont inférieurs à la limite de quantification à partir de juillet 2014 (dernière campagne en septembre 2014) ;<br>**Pzr12 (2 m de profondeur) - prélevé en 2019, Pzr33 (3 m de profondeur) - ouvrage non prélevé en 2019**<br>• impact marqué en hydrocarbures, de l'ordre de 100 000 µg/$m^3$ en 2014. Les concentrations ont diminué d'un ordre de grandeur en juin 2019 sur Pzr12 (seul piézair prélevé en 2019) ;<br>• impact en PCE de l'ordre de 100 µg/$m^3$ sur Pzr12. Les concentrations sont du même ordre de grandeur depuis 2014 (ouvrage prélève en juin 2019).<br>• impact en BTEX sur Pzr33 en 2014 (Cmax = 1 129 µg/$m^3$) avec présence de benzène (environ 100 µg/$m^3$). L'ouvrage n'a pas été prélevé en 2019.<br>Aucun résultat d'analyse ne nous a été fourni sur le PrZ16. | Les impacts en hydrocarbures mis en évidence dans les sols semblent être à l'origine des impacts en hydrocarbures dans les gaz du sol. Ces derniers ne semblent pas avoir d'influence sur la qualité de l'air intérieur (cf. résultats air intérieur ci-dessous).<br>Des anomalies en COHV ont été mises en évidence dans les sols, aussi, les impacts en solvants dans les gaz du sol peuvent être issus en partie des sols et en partie des concentrations présentes en nappe. Seules des traces en solvants sont détectées sur l'ouvrage Pz20, mais un impact est identifié sur un ouvrage situé à 20 m au sud de la zone 3 (Pz35 - latérale hydraulique supposée). L'origine des anomalies en COHV dans la nappe sur ce secteur n'est pas clairement identifiée. Il est possible qu'elles soient le résidu de la pollution en COHV mis en évidence au nord du site. Des investigations complémentaires sur les eaux souterraines seront menées en ce sens pour lever le doute.<br>À noter qu'aucune campagne n'a été menée en période hivernale. Les teneurs attendues dans les gaz du sol en période estivale sont généralement supérieures à celles observées en période hivernale. En ce sens, elles sont considérées comme représentatives. |
| Eau du robinet (EDR-bâtiment 26F) | **Prélèvement dans le bâtiment 26F (côté ouest de la zone) - 2 campagnes réalisées en 2013 et 1 campagne en 2019**<br>• présence de traces en TCE = 1.4 µg/L ; PCE = 4 µg/L ; DCE = 1 µg/L (en dessous des seuils pour l'eau potable) ;<br>• des traces en HAP (0,315 µg/L maximum pour la somme en HAP - en dessous des seuils pour l'eau potable en équivalent toxique B(a)P) ; | Deux hypothèses peuvent être émises :<br>• les composés retrouvés dans les eaux du robinet de la zone 3 sont issus de la perméation des solvants présents dans les gaz du sol mesurés dans cette zone (zone 3). Les gaz du sol étant eux-mêmes probablement impactés par la volatilisation des solvants présents dans les eaux souterraines (pas de source sol mise en évidence sur |

[3] NAPL : Non Aqueuse Phase Liguide. Produit sous forme organique pure

| Milieux | Résultats au droit de la zone 3 avant travaux | Commentaire |
|---|---|---|
| | • des traces en cis DCE 1,1DCE et en 1,1,1 TCA (1,8 µg/L pour la somme de ces composés) sont mesurées sur les deux campagnes. Aucune valeur de référence n'est disponible pour ces composés.<br>Les concentrations sont constantes depuis 2013. | ce secteur). Cette hypothèse parait la moins probable compte tenu du degré d'impact relevé dans les gaz du sol ;<br>• il est possible que les canalisations alimentant la zone 3 traversent une partie du panache de polluants en PCE de la zone 4, ce qui pourrait expliquer les concentrations identiques dans les eaux des 2 secteurs (contamination du réseau en amont de la zone 3). Cette hypothèse reste néanmoins à vérifier (détection du tracé ?). Cette hypothèse parait la plus probable à ce stade. |
| Air extérieur et intérieur (bâtiment 79F) | Prélèvement dans le bâtiment 79F et à l'extérieur devant le bâtiment.<br>Traces de BTEX, d'hydrocarbures volatils et de COHV dans l'air intérieur, mais du même ordre de grandeur où inférieur à celles mesurées à l'extérieur.<br>Il semble que les teneurs mesurées dans l'intérieur soient issues du bruit de fond extérieur et non d'un transfert de la pollution présente dans les gaz du sol à proximité du bâtiment. | Les concentrations sont inférieures aux valeurs guides pour l'air intérieur quand elles existent. |

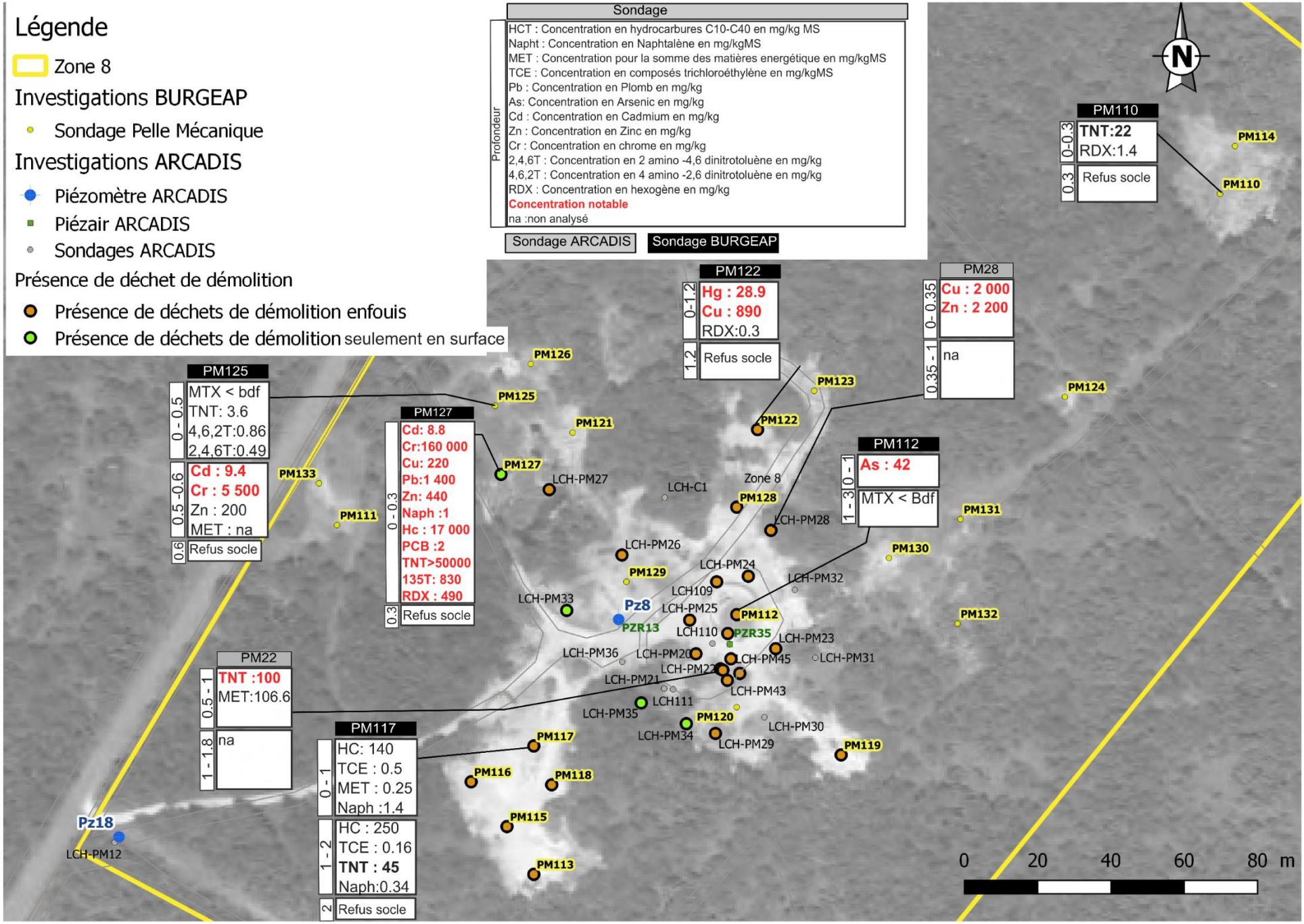

Légende
zone 3
Zone 7
Investigations BURGEAP
Air intérieur-BGP
Carottier/tarière BGP
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Piézair ARCADIS
Sondage Tarière ARCADIS
EDR ARCADIS
Piézair (profondeur de l'ouvrage)
C5-C16: Concenetration en hydrocarbures C10-C40 en µg/m3
PCE : Concenetration en tetrachloroéthylène µg/m3
TCE: Concentration en trichloroéthylène en µg/m3
DCE : Concentration en Cis + Trans dichloroéthylène en µg/m3
Benz: Concentration en Benzène en µg/m3
concentration notable
Prélèvement d'air intérieur /extérieur
HC: Concenetration en hydrocarbures C5-C16 en µg/m3
PCE : Concenetration en tetrachloroéthylène µg/m3
TCE: Concentration en trichloroéthylène en µg/m3
DCE : Concentration en Cis + Trans dichloroéthylène en µg/m3
Benz: Concentration en Benzène en µg/m3
concentration notable
Piézomètre (profondeur de l'ouvrage)
HCT : Concenetration en hydrocarbures C10-C40 en µg/L
PCE : Concenetration en tetrachloroéthylène µg/L
TCE: Concentration en trichloroéthylène en µg/L
DCE : Concentration en Cis + Trans dichloroéthylène en µg/L
CV : Concentration en chlorure de Vinyle en µg/L
concentration notable
campagne
N
Pzr6 - 1 m
avril-13 C5-C16 : 224 PCE: 24.7 TCE: 279 DCE : 5.2 Benz : < lq BTEX < lq
juillet - 13 C5-C16:1 981 PCE : 22.4 TCE: 223 DCE <lq Benz: 5.5 BTEX : 167
sept-13 C5-C16: 706 PCE : 544 TCE: 60.4 DCE < lq Benz : < lq BTEX : 202
juin-14 C5-C16: 4 360 PCE :<Lq TCE: 390 Benz : < lq BTEX < lq
sept-14 C5-C16<Lq PCE : 42 TCE: 360 DCE :<Lq Benz<Lq BTEX <Lq
Pzr3 - 2.30
avril-13 C5-C16:6 764 PCE: 25.4 TCE: 25 DCE < lq Benz : < lq BTEX < lq
juillet - 13 C5-C16:1 466 PCE : 4.8 TCE < lq DCE <lq Benz: 13.3 BTEX : 444
sept-13 C5-C16: 1569 PCE : 26 TCE: 15.2 DCE < lq Benz : < lq BTEX : 277
juin-14 C5-C16 <Lq PCE :<Lq TCE: <Lq DCE <Lq Benz : < lq BTEX : 9.9
sept-14 C5-C16<Lq PCE : 44 TCE<Lq DCE<Lq Benz<Lq BTEX<Lq
Pz20 - 11 m
sept-13 PCE <lq TCE : 0.5 DCE : 2.9 CV : 1 HCT : 642 BTEX : 2.9
avril-18 PCE < lq TCE < lq DCE : 1.3 CV : 0.5 HCT : 42 BTEX : 3.3
juin-14 PCE : 0.8 TCE : 0.8 DCE : 2.5 CV : 0.8 HCT : 377 BTEX : 3
nov-18 PCE < lq TCE < lq DCE < lq CV : 0.5 HCT : 303 BTEX : 2.2
sept-14 PCE : 0.4 TCE < lq DCE : 2.4 CV : 0.6 HCT :45 000 BTEX : 3.29
avri-19 PCE < lq TCE < lq DCE : 1.7 CV : 0.6 HCT : 274 BTEX : na
oct- 17 PCE < lq TCE < lq DCE : 2.1 CV : 0.9 HCT :38 BTEX : 3.19
juin-19 PCE < lq TCE < lq DCE : 1.9 CV : 0.6 HCT : 479 BTEX : 6.26
AA exterieur- 2
juin-19 HC : 14.06 PCE : 0.11 TCE: 0.08 DCE < 0.1 Benz : 0.57 BTEX : 2.65
AA-79F
juin-19 HC : 13.8 PCE : 0.29 TCE: 0.03 DCE < 0.1 Benz : 0.57 BTEX : 2.65
Pzr12 - 2 m
juin-14 C5-C16:170 990 PCE <Lq TCE: <Lq DCE <Lq Benz : < lq BTEX : 71
sept-14 C5-C16: 230 000 PCE : 300 TCE<Lq DCE <Lq Benz: 71 BTEX : 138
juin-19 C5-C16: 46 104 PCE : 193 TCE<13 DCE <57 Benz < 14 BTEX < lq
Pzr33 - 3 m
juin-14 C5-C16:738 800 PCE <Lq TCE: <Lq DCE <Lq Benz : 190 BTEX : 984
sept - 14 C5-C16: 575 000 PCE < lq TCE<Lq DCE <Lq Benz: 160 BTEX : 1 129
LCH43X
LCH48
LCH_49
LCH43AM
SD43AR
PZR6
LCH43W
LCH47
LCH43AL
LCH43AP
SD43AQ
LCH43J
LCH43L
LCH43K
LCH46
LCH43G
LCH43Q
LCH-SD43AE
LCH43F
LCH43A
LCH43 PZR3
LCH43H
Pz20
LCH43M
LCH43C
LCH44
LCH43E
LCH43B
LCH43P
SD43AU
LCH43D
LCH43N
PZR33
LCH43Z
LCH43O
LCH43U
LCH43AA
SD43AS
PZR16
SD43AT
LCH-SD43AG
LCH43T
SD43AK
SD43AN
SD43AO
LCH43R
LCH43V
LCH42
LCH43I
LCH-SD43AI
LCH-SD43AF
ED-26F
SD43AJ
AA-79F
AA exterieur 79F
LCH-Pzr12
PZR12
LCH31
0 10 20 30 40 m

# Annexe 4. Synthèse des impacts au droit des zone 8 avant travaux de réhabilitation

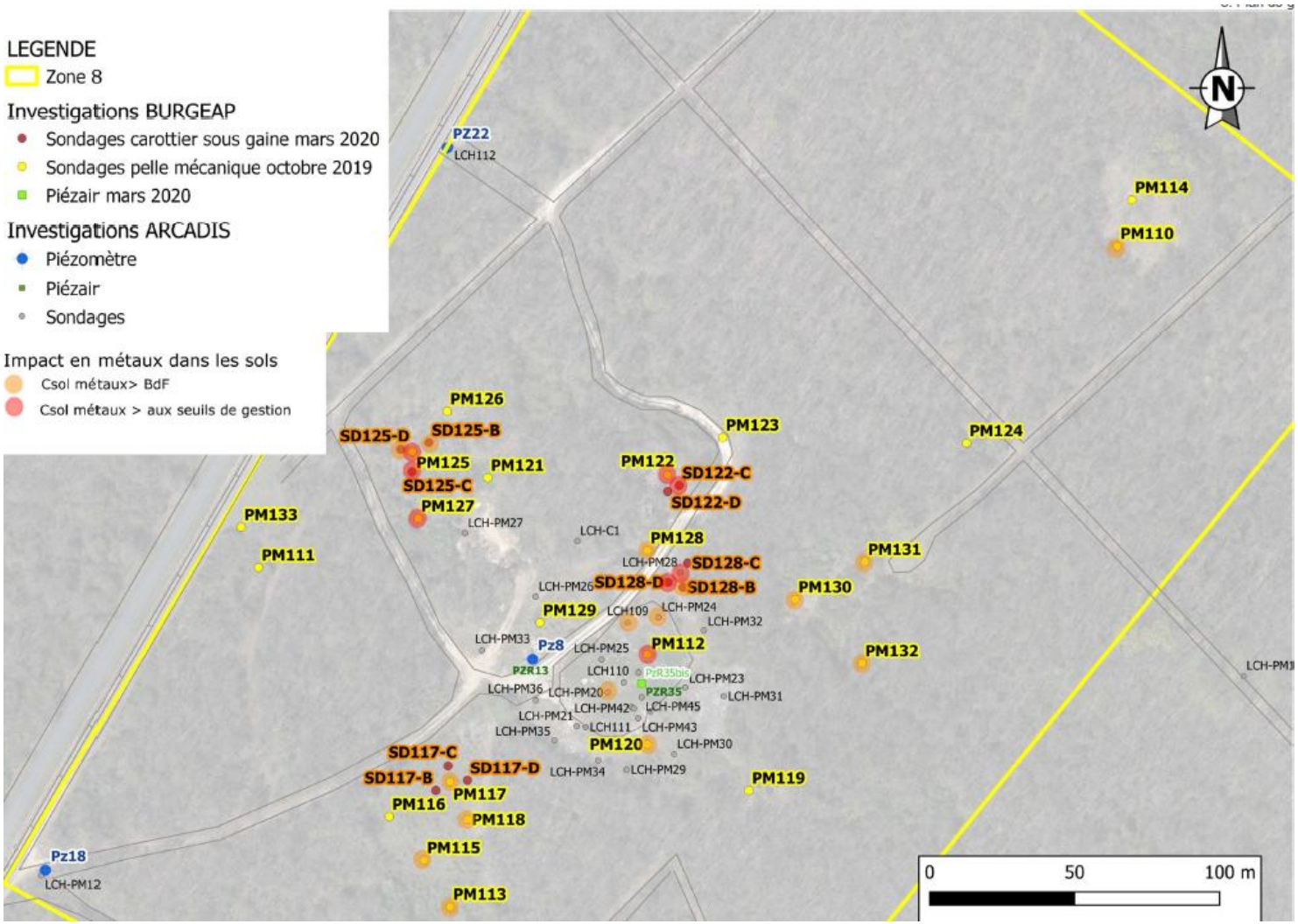
Cette annexe contient 3 pages

**: Synthèse des principaux impacts/anomalies dans les différents milieux**

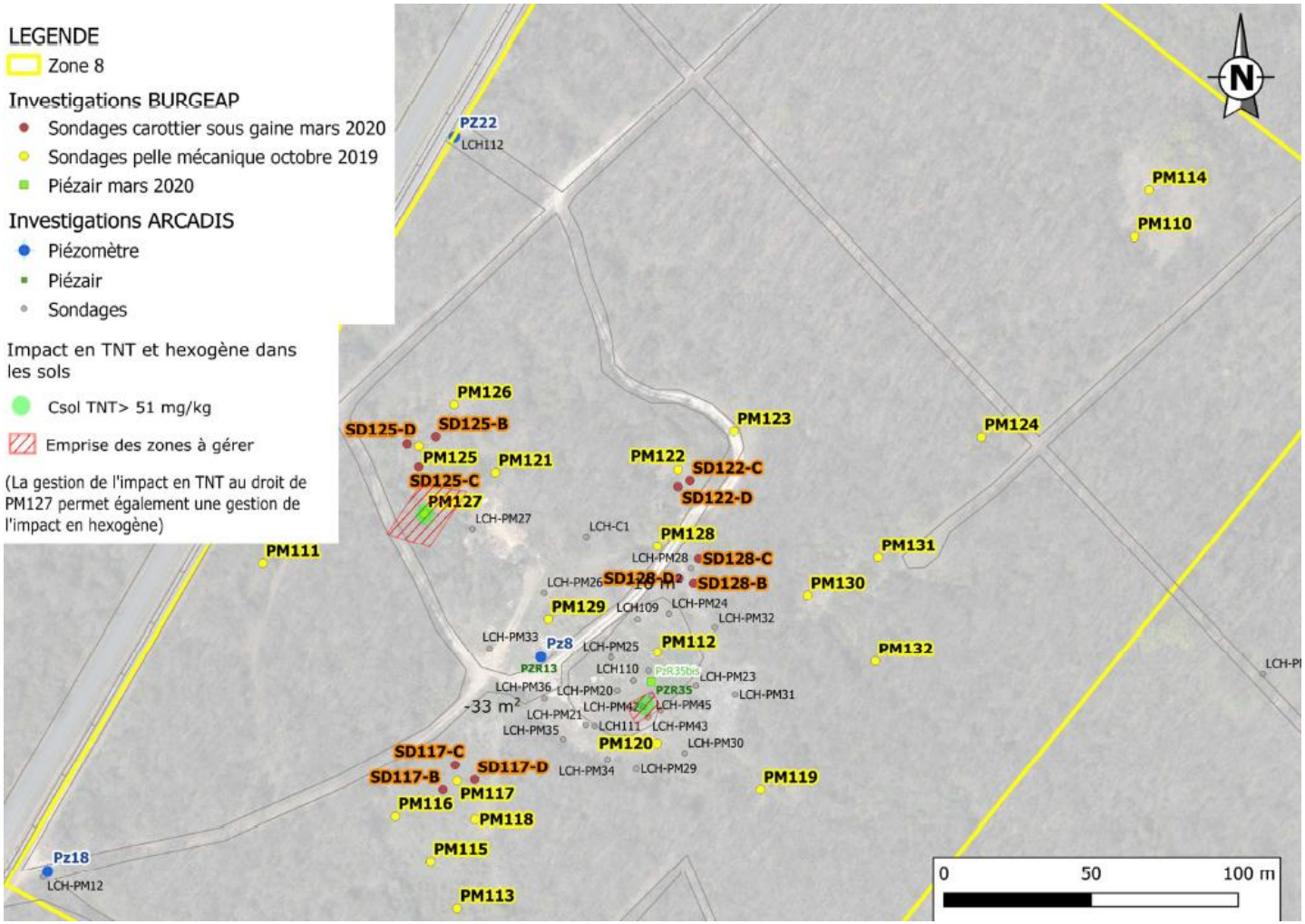
| Impact | Milieu impacté | Sondage | Centrations maximum | Recommandation |
|---|---|---|---|---|
| Matières énergétiques | Sol | PM127/0-0.3 | TNT > 50 000 mg/kg<br>RDX = 490 mg/kg<br>1,3,5 trinitrobenzène = 830 mg/kg | |
| | | PM22/0.5-1 | TNT = 100 mg/kg<br>4 amnio2,6dinitrotoluène = 2.9 mg/kg<br>2 amino 4-6 dinitrotoluène = 2 mg/kg<br>1,3,5 trinitrobenzène = 1.7 mg/kg | |
| | | PM117/1-2 | TNT = 45 mg/kg<br>RDX =0.6 mg/kg | |
| | | PM110/0-0.3 | TNT = 22 mg/kg<br>RDX =1.4 mg/kg | |
| | Eaux souterraines | Pz18 Pz8 et Pz22 | Traces non significatives | - |
| Métaux | Sol | PM127/0-0.3 | Cd= 8.8 / Cr = 160 000 / Pb = 1 400 | |
| | | PM125/0.5-0.6 | Cd= 9.4 / Cr = 5 500<br>Pas d'impact mesuré sur l'échantillon de surface | |
| | | PM28/0-0.3 | Cu = 2 000 mg/kg / Zn = 2 000 mg/kg | |
| | | PM122/0-1.2 | Hg = 28.9 mg/kg | La fraction de mercure volatil n'est pas connue. L'emprise de l'impact pourrait être précisée par des investigations complémentaires. |
| | | PM112/0-1 | As=42 mg/kg | |
| | Gaz du sol | PzR13 et Pz35 | Mercure non détecté | |
| | Eaux souterraines | Pz8 | Cr= 110 µg/L en mai 2014<br>Impact non retrouvé en avril 2018 | Cette anomalie ponctuelle n'est pas retrouvée sur les autres campagnes de mesure. Aussi il semble que les impact en métaux ont pas ou peu atteint la nappe. |
| Solvants chlorés | Eaux souterraines | Pz8 | Impact mesuré en avril 2013 et mai 2014<br>PCE : 1 µg/L<br>TCE 3 600 µg/L<br>DCE = 450 µg/L<br>**Impact non retrouvé en avril 2018** | Les impacts ne sont pas cohérents entre les eaux souterraines et les gaz du sol. L'impact significatif mesuré dans les eaux souterraines n'est pas mesuré sur le piézair situé à moins d'un mètre du piézomètre. Par ailleurs, la nappe sur cet ouvrage n'est présent qu'en basse eaux.<br>Des COHV sont détectés sur Pz35 alors même que ce dernier est crépiné quasiment dès la surface (forte sous-estimation des concentrations). |
| | Gaz du sol | PzR13 (2 campagnes)<br>PzR35 (1 campagne) | PzR13 COHV < 56 µg/m$^3$ Toluène = 51 µg/m$^3$<br>PZR35 COHV= 21µg/m$^3$ | |


Légende
Zone 8
Investigations BURGEAP
Sondage Pelle Mécanique
Investigations ARCADIS
Piézomètre ARCADIS
Piézair ARCADIS
Sondages ARCADIS
Présence de déchet de démolition
Présence de déchets de démolition enfouis
Présence de déchets de démolition seulement en surface
Sondage
Profondeur
HCT : Concentration en hydrocarbures C10-C40 en mg/kg MS
Napht : Concentration en Naphtalène en mg/kgMS
MET : Concentration pour la somme des matières energétique en mg/kgMS
TCE : Concentration en composés trichloroéthylène en mg/kgMS
Pb : Concentration en Plomb en mg/kg
As: Concentration en Arsenic en mg/kg
Cd : Concentration en Cadmium en mg/kg
Zn : Concentration en Zinc en mg/kg
Cr : Concentration en chrome en mg/kg
2,4,6T : Concentration en 2 amino -4,6 dinitrotoluène en mg/kg
4,6,2T : Concentration en 4 amino -2,6 dinitrotoluène en mg/kg
RDX : Concentration en hexogène en mg/kg
Concentration notable
na :non analysé
Sondage ARCADIS
Sondage BURGEAP
N
PM110
0-0.3 TNT:22 RDX:1.4
0.3 Refus socle
PM114
PM110
PM122
0-1.2 Hg : 28.9 Cu : 890 RDX:0.3
1.2 Refus socle
PM28
0- 0.35 Cu : 2 000 Zn : 2 200
0.35 - 1 na
PM124
PM123
PM122
PM126
PM125
PM125
0 - 0.5 MTX < bdf TNT: 3.6 4,6,2T:0.86 2,4,6T:0.49
0.5 -0.6 Cd : 9.4 Cr : 5 500 Zn : 200 MET : na
0.6 Refus socle
PM127
0 - 0.3 Cd: 8.8 Cr:160 000 Cu: 220 Pb:1 400 Zn: 440 Naph :1 Hc : 17 000 PCB :2 TNT>50000 135T: 830 RDX : 490
0.3 Refus socle
PM121
PM127
PM133
PM111
LCH-PM27
LCH-C1
Zone 8
PM128
PM112
1 - 3 0 - 1 As : 42
MTX < Bdf
PM131
LCH-PM28
PM130
LCH-PM26
PM129
LCH-PM24
LCH-PM32
LCH109
LCH-PM33
Pz8
LCH-PM25
PM112
PM132
PZR13
LCH110
PZR35
LCH-PM23
LCH-PM36
LCH-PM20
LCH-PM45
LCH-PM31
LCH-PM22
LCH-PM21
LCH-PM43
LCH111
LCH-PM35
PM120
LCH-PM30
LCH-PM34
LCH-PM29
PM119
PM22
0.5 - 1 TNT :100 MET:106.6
1 - 1.8 na
PM117
0 - 1 HC: 140 TCE : 0.5 MET : 0.25 Naph :1.4
1 - 2 HC : 250 TCE : 0.16 TNT : 45 Naph:0.34
2 Refus socle
PM117
PM116
PM118
PM115
PM113
Pz18
LCH-PM12
0 20 40 60 80 m

## Impact sur les sols en zone 8 avant travaux




**Impact en métaux au droit de la zone 8 avant travaux**




**Impact en composés énergétiques au droit de la zone 8 avant travaux**

# Annexe 5. Données toxicologiques

Cette annexe contient 6 pages

## Identification des dangers

En termes sanitaires, un danger désigne tout effet toxique, c'est-à-dire un dysfonctionnement cellulaire ou organique lié à l'interaction entre un organisme vivant et un agent chimique, physique ou biologique. La toxicité d'un composé dépend de la durée et de la voie d'exposition de l'organisme humain.

Tous les modes d'exposition sont traités en **effets chroniques,** correspondant à de longues durées d'exposition (supérieures à 7 ans pour l'US-EPA et supérieures à 1 an pour l'ATSDR).

## Types d'effets distingués

Par chaque substance, différents effets toxiques peuvent être considérés. On distinguera dans le présent document les effets cancérigènes (apparition de tumeurs), les effets mutagènes (ou tératogènes consistant à la modification de l'ADN en particulier), les effets sur la reproduction (reprotoxicité) des autres effets toxiques.

Différents organismes internationaux (l'OMS, l'Union Européenne et l'US-EPA) ont classé les effets suscités en catégories ou classes. Celles-ci sont présentées en page suivante. Seule la classification de l'Union Européenne a un caractère réglementaire. C'est également la seule qui classe les substances chimiques quant à leur caractère mutagène et reprotoxique.

Les mentions de danger des substances sont présentées en préambule ainsi que les symboles (SGH01 à SGH09) qui les représentent. Ces mentions de danger sont liées au classement établi par l'Union Européenne.

**Classification en termes de cancérogénicité**

| UE | US-EPA | CIRC |
|---|---|---|
| C1 (H350 ou H350i) : cancérogène avéré ou présumé l'être :<br>C1A : Substance dont le potentiel cancérogène pour l'être humain est avéré<br>C1B : Substance dont le potentiel cancérogène pour l'être humain est supposé | A : Preuves suffisantes chez l'homme | 1 : Agent ou mélange cancérigène pour l'homme |
| C2 : Substance suspectée d'être cancérogène pour l'homme | B1 : Preuves limitées chez l'homme<br>B2 : Preuves non adéquates chez l'homme et preuves suffisantes chez l'animal | 2A : Agent ou mélange probablement cancérigène pour l'homme |
| Carc.3 : Substance préoccupante pour l'homme en raison d'effets cancérogènes possibles<br>(R40) | C : Preuves inadéquates chez l'homme et preuves limitées chez l'animal | 2B : Agent ou mélange peut-être cancérigène pour l'homme |
| | D : Preuves insuffisantes chez l'homme et l'animal<br>E : Indications d'absence de cancérogénicité chez l'homme et chez l'animal | 3 : Agent ou mélange inclassables quant à sa cancérogénicité pour l'homme<br>4 : Agent ou mélange probablement non cancérigène chez l'homme - |

### Classification en termes de mutagénicité

<table>
<tr><th colspan="2">UE</th></tr>
<tr><td rowspan="2">M1 (H340) : Substance dont la capacité d'induire des mutations héréditaires est avérée ou qui sont à considérer comme induisant des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains. Substance dont la capacité d'induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains est avérée.</td><td>M1A : Classification fondée sur des résultats positifs d'études épidémiologiques humaines.<br>Substance considérée comme induisant des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains.</td></tr>
<tr><td>M1B : Classification fondée sur des essais in vivo de mutagénicité sur des cellules germinales et somatiques et qui ont donné un ou des résultats positifs et sur des essais qui ont montré que la substance a des effets mutagènes sur les cellules germinales humaines, sans que la transmission de ces mutations à la descendance n'ait été établie.</td></tr>
<tr><td colspan="2">M2 (H341) : Substance préoccupantes du fait qu'elle pourrait induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains.</td></tr>
</table>

### Classification en termes d'effets reprotoxiques

<table>
<tr><th colspan="2">UE</th></tr>
<tr><td rowspan="2">R1 (H360 ou H360F ou H360D ou H360FD ou H360Fd ou H360fD) : Reprotoxique avéré ou présumé</td><td>R1A : Substance dont la toxicité pour la reproduction humaine est avérée. La classification d'une substance dans cette catégorie s'appuie largement sur des études humaines.</td></tr>
<tr><td>R1B : Substance présumée toxique pour la reproduction humaine. La classification d'une substance dans cette catégorie s'appuie largement sur des données provenant d'études animales.</td></tr>
<tr><td colspan="2">R2 (H361 ou H361f ou H361d ou H361fd) : Substance suspectée d'être toxique pour la reproduction humaine. Les substances sont classées dans cette catégorie lorsque les résultats des études ne sont pas suffisamment probants pour justifier une classification dans la catégorie 1 mais qui font apparaître un effet indésirable sur la fonction sexuelle et la fertilité ou sur le développement.</td></tr>
</table>

La toxicité pour la reproduction comprend l'altération des fonctions ou de la capacité de reproduction chez l'homme ou la femme et l'induction d'effets néfastes non héréditaires sur la descendance.

Les effets sur la fertilité masculine ou féminine recouvrent les effets néfastes sur :

- sur la libido,
- le comportement sexuel,
- les différents aspects de la spermatogenèse ou de l'oogénèse,
- l'activité hormonale ou la réponse physiologique qui perturberaient la fécondation
- la fécondation elle-même ou le développement de l'ovule fécondé.

La toxicité pour le développement est considérée dans son sens le plus large, perturbant le développement normal aussi bien avant qu'après la naissance.

Les produits chimiques les plus préoccupants sont ceux qui sont toxiques pour la reproduction à des niveaux d'exposition qui ne donnent pas d'autres signes de toxicité.

## Symboles et phrases de risques

Le SGH ou Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques est un ensemble de recommandations élaborées au niveau international. Il vise à harmoniser les règles de classification des produits chimiques et de communication des dangers (étiquettes, fiches de données de sécurité). En Europe, dans les secteurs du travail et de la consommation, le SGH est mis en application via le règlement CLP. Le nouveau règlement européen CLP (*Classification, Labelling and Packaging*) 1272/2008 du 16 décembre 2008 relatif à la classification à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges et modifiant les directives 67/548/CEE, 1999/45/CE et le règlement 1907/2006 a été publié le 31 décembre 2008 au Journal officiel de l'Union européenne.

Le règlement CLP est entré en vigueur le **20 janvier 2009**. Il prévoit néanmoins une période de transition durant laquelle l'ancien et le nouveau système de classification et d'étiquetage coexisteront. Sauf dispositions particulières prévues par le texte, la mise en application du nouveau règlement devient obligatoire à partir du **1er décembre 2010** pour les **substances** et du **1er juin 2015** pour les **mélanges**. Il est à souligner que, pour éviter toute confusion, les produits ne peuvent porter de double étiquetage. Au 1er juin 2015, le système préexistant sera définitivement abrogé et la nouvelle réglementation sera la seule en vigueur.

Les principales nouveautés pour l'étiquette de sécurité sont l'apparition de nouveaux pictogrammes de danger, de forme losange et composés d'un symbole noir sur un fond blanc bordé de rouge, et l'ajout de mention d'avertissement indiquant la gravité du danger ("DANGER", pour les produits les plus dangereux, et "ATTENTION"). Les étiquettes comporteront également des mentions de danger (ex: "Mortel par inhalation") en remplacement des phrases de risque (phrases R) et des nouveaux conseils de prudence (ex: "Éviter tout contact avec les yeux, la peau ou les vêtements").

## MENTIONS DE DANGER

### ◗ 28 mentions de danger physique

- H200 : Explosif instable
- H201 : Explosif ; danger d'explosion en masse
- H202 : Explosif ; danger sérieux de projection
- H203 : Explosif ; danger d'incendie, d'effet de souffle ou de projection
- H204 : Danger d'incendie ou de projection
- H205 : Danger d'explosion en masse en cas d'incendie
- H220 : Gaz extrêmement inflammable
- H221 : Gaz inflammable
- H222 : Aérosol extrêmement inflammable
- H223 : Aérosol inflammable
- H224 : Liquide et vapeurs extrêmement inflammables
- H225 : Liquide et vapeurs très inflammables
- H226 : Liquide et vapeurs inflammables
- H228 : Matière solide inflammable
- H240 : Peut exploser sous l'effet de la chaleur
- H241 : Peut s'enflammer ou exploser sous l'effet de la chaleur
- H242 : Peut s'enflammer sous l'effet de la chaleur
- H250 : S'enflamme spontanément au contact de l'air
- H251 : Matière auto-échauffante ; peut s'enflammer
- H252 : Matière auto-échauffante en grandes quantités ; peut s'enflammer
- H260 : Dégage au contact de l'eau des gaz inflammables qui peuvent s'enflammer spontanément
- H261 : Dégage au contact de l'eau des gaz
- H270 : Peut provoquer ou aggraver un incendie ; comburant
- H271 : Peut provoquer un incendie ou une explosion ; comburant puissant
- H272 : Peut aggraver un incendie ; comburant
- H280 : Contient un gaz sous pression ; peut exploser sous l'effet de la chaleur
- H281 : Contient un gaz réfrigéré ; peut causer des brûlures ou blessures cryogéniques
- H290 : Peut être corrosif pour les métaux

### ◗ 38 mentions de danger pour la santé

- H300 : Mortel en cas d'ingestion
- H301 : Toxique en cas d'ingestion
- H302 : Nocif en cas d'ingestion
- H304 : Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires
- H310 : Mortel par contact cutané
- H311 : Toxique par contact cutané
- H312 : Nocif par contact cutané
- H314 : Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves
- H315 : Provoque une irritation cutanée
- H317 : Peut provoquer une allergie cutanée
- H318 : Provoque des lésions oculaires graves
- H319 : Provoque une sévère irritation des yeux
- H330 : Mortel par inhalation
- H331 : Toxique par inhalation
- H332 : Nocif par inhalation
- H334 : Peut provoquer des symptômes allergiques ou d'asthme ou des difficultés respiratoires par inhalation
- H335 : Peut irriter les voies respiratoires
- H336 : Peut provoquer somnolence ou vertiges

- H340 : Peut induire des anomalies génétiques *<indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>*
- H341 : Susceptible d'induire des anomalies génétiques *<indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même dangert>*
- H350 : Peut provoquer le cancer <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H351 : Susceptible de provoquer le cancer <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H360 : Peut nuire à la fertilité ou au foetus <indiquer l'effet spécifique s'il est connu> <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H361 : Susceptible de nuire à la fertilité ou au foetus <indiquer l'effet s'il est connu> <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H362 : Peut être nocif pour les bébés nourris au lait maternel
- H370 : Risque avéré d'effets graves pour les organes <ou indiquer tous les organes affectés, s'ils sont connus> <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H371 : Risque présumé d'effets graves pour les organes <ou indiquer tous les organes affectés, s'ils sont connus> <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H372 : Risque avéré d'effets graves pour les organes <indiquer tous les organes affectés, s'ils sont connus> à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>
- H373 : Risque présumé d'effets graves pour les organes <indiquer tous les organes affectés, s'ils sont connus> à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée <indiquer la voie d'exposition s'il est formellement prouvé qu'aucune autre voie d'exposition ne conduit au même danger>

### ◗ Pour certaines mentions de danger pour la santé des lettres sont ajoutées au code à 3 chiffres :

- H350i : Peut provoquer le cancer par inhalation
- H360F : Peut nuire à la fertilité
- H360D : Peut nuire au foetus
- H361f : Susceptible de nuire à la fertilité
- H361d : Susceptible de nuire au foetus
- H360FD : Peut nuire à la fertilité. Peut nuire au foetus
- H361fd : Susceptible de nuire à la fertilité. Susceptible de nuire au foetus
- H360Fd : Peut nuire à la fertilité. Susceptible de nuire au foetus
- H360Df : Peut nuire au foetus. Susceptible de nuire à la fertilité.

### ◗ 5 mentions de danger pour l'environnement

- H400 : Très toxique pour les organismes aquatiques
- H410 : Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
- H411 : Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
- H412 : Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
- H413 : Peut être nocif à long terme pour les organismes aquatiques

### ◗ Symboles de danger

- **SHG01 : Explosif** (ce produit peut exploser au contact d'une flamme, d'une étincelle, d'électricité statique, sous l'effet de la chaleur, d'un choc ou de frottements).
- **SGH02 : Inflammable** (Le produit peut s'enflammer au contact d'une flamme, d'une étincelle, d'électricité statique, sous l'effet de la chaleur, de frottements, au contact de l'air ou au contact de l'eau en dégageant des gaz inflammables).
- **SGH03 : Comburant** (peut provoquer ou aggraver un incendie – peut provoquer une explosion en présence de produit inflammable).
- **SGH04 : Gaz sous pression** (peut exploser sous l'effet de la chaleur (gaz comprimé, liquéfié et dissous) – peut causer des brûlures ou blessures liées au froid (gaz liquéfiés réfrigérés).
- **SGH05 : Corrosif** (produit qui ronge et peut attaquer ou détruire des métaux – peut provoquer des brûlures de la peau et des lésions aux yeux en cas de contact ou de projection).
- **SGH06 : Toxique ou mortel** (le produit peut tuer rapidement – empoisonne rapidement même à faible dose).
- **SGH07 : Dangereux pour la santé** (peut empoisonner à forte dose – peut irriter la peau, les yeux, les voies respiratoires – peut provoquer des allergies cutanées – peut provoquer somnolence ou vertige – produit qui détruit la couche d'ozone).
- **SGH08 : Nuit gravement pour la santé** (peut provoquer le cancer, modifier l'ADN, nuire à la fertilité ou au fœtus, altérer le fonctionnement de certains organes – peut être mortele en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires – peut provoquer des difficultés respiratoires ou des allergies respiratoires).
- **SGH09 : Dangereux pour l'environnement** (produit polluant – provoque des effets néfastes à court et/ou long terme sur les organismes des milieux aquatiques).

| SGH01 | SGH02 | SGH03 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **SGH04** | **SGH05** | **SGH06** |
|  |  |  |
| **SGH07** | **SGH08** | **SGH09** |
|  |  |  |

Le tableau ci-après reprend l'ensemble des informations propres à chaque substance considérée dans la présente étude.

| | CAS n°R | Volatilité Pv | solubilité S | Classement symboles | Mention de danger | classement cancérogénéicité UE | CIRC (IARC) | EPA | EFFETS TOXIQUES A SEUIL *Organe cible (oral)* | *Organe cible (inh°)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **COMPOSES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES** | | | | | | | | | | |
| Benzène | 71-43-2 | ++ | ++ | SGH02, SGH07, SGH08 | H225, H350, H340, H372, H304, H319, H315 | C1A M1B | 1 | A | *sang* | *sang* |
| **COMPOSES ORGANO-HALOGENES VOLATILS** | | | | | | | | | | |
| PCE (tétrachloroéthylène) | 127-18-4 | ++ | ++ | SGH08, SGH09 | H351, H411 | C2 | 2À | B1 | *hépatique* | *neurotoxicité* |
| TCE (trichloroéthylène) | 79-01-6 | ++ | ++ | SGH07, SGH08 | H350, H341, H319, H315, H336, H412 | C1B M2 | 1 | A | *multiples* | *rein* |
| Cis 1,2DCE (dichloroéthylène) | 156-59-2 | ++ | ++ | SGH02, SGH07 | H225, H335, H412 | - | - | D | *rein* | *hépatique* |
| Trans 1,2DCE (dichloroéthylène) | 156-60-5 | | ++ | SGH02, SGH07 | H225, H335, H412 | - | - | D | *immunitaire* | *hépatique* |

| **LEGENDE Volatilité :** | **LEGENDE Solubilité :** |
|---|---|
| *++ :Pv > 1000 PA (COV)* | *++ : S>100 mg/l* |
| *+ : 1000 > Pv > 10 Pa (COV)* | *+ : 100>S>1 mg/l* |
| *- : 10 >P> 10-2 Pa (non COV)* | *- : 1>S>0.01 mg/l* |
| *-- : 10-2 >P> 10-5 Pa (non COV)* | *-- : S<0.01 mg/l* |

# Annexe 6. Relations dose-réponse

Cette annexe contient 6 pages.

## Relations dose-effet/dose-réponse

La dose est la quantité d'agent dangereux mise en contact avec un organisme vivant. Elle s'exprime généralement en milligramme par kilo de poids corporel et par jour (mg/kg/j).

La relation entre une dose et son effet est représentée par une grandeur numérique appelée Valeur Toxicologique de Référence (VTR). Établies par diverses instances internationales ou nationales[4] (Cf § H) sur l'analyse des connaissances toxicologiques animales et épidémiologiques, ces VTR sont une appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques établissant une relation quantitative entre une dose et un effet (toxiques à seuil de dose) ou entre une dose et une probabilité d'effet (toxiques sans seuil de dose).

Selon les mécanismes toxicologiques en jeu et pour des expositions chroniques, deux grands types d'effets sanitaires peuvent être distingués : **les effets à seuil** de dose (effets non cancérigènes et effets cancérigènes à seuil[5]) et **les effets sans seuil** de dose (substances cancérigènes génotoxiques). Une même substance peut produire ces deux types d'effets.

Pour les **effets à seuil de dose**, on dispose en pratique et dans le meilleur des cas :

- d'un niveau d'exposition sans effet observé (NOEL : no observed effect level),
- d'un niveau d'exposition sans effet néfaste observé (NOAEL : no observed adverse effect level),
- d'un niveau d'exposition le plus faible ayant entraîné un effet (LOEL : lowest observed effect level),
- le niveau d'exposition le plus faible auquel un effet néfaste apparaît (LOAEL : lowest observed adverse effect level).

Ces seuils sont issus d'expérimentations animales, d'études épidémiologiques ou d'essais de toxicologie clinique. À partir de ces seuils, des DJT (dose journalière tolérable) ou des CA (concentration admissible) applicables à l'homme sont définies en divisant les seuils précédents par des facteurs de sécurité liés aux types d'expérimentations ayant permis d'obtenir ces données. Les DJT et CA sont habituellement qualifiées de « valeur toxicologiques de références » (VTR).

Les **effets sans seuil de dose** sont exprimés au travers d'un indice représentant un excès de risque unitaire (ERU) qui traduit la relation entre le niveau d'exposition chez l'homme et la probabilité de développer l'effet. Les ERU sont définis à partir d'études épidémiologiques ou animales. Les niveaux d'exposition appliqués à l'animal sont convertis en niveaux d'exposition équivalents pour l'homme.

**Pour les effets à seuil de dose**, les VTR sont exprimées en mg/kg/j pour l'ingestion et en µg/m$^3$ pour l'inhalation, avec des dénominations variables selon les pays et les organismes, les principales dénominations sont reprises ci-dessous :

- DJT (dose journalière tolérable - France)
- RfD (Reference Dose – US-EPA)
- RfC (Reference Concentration – US-EPA)
- ADI (Acceptable Daily Intake – US-EPA)
- MRL (Minimum Reasonable Level - ATSDR)
- REL (Reference Exposure Level – OEHHA)

[4] ATSDR Toxicological Profiles (US Agency for Toxic Substances and Disease Registry)
IRIS US-EPA (Integrated Risk Information System ; US Environmental Protectin Agency)
OMS. Guidelines for drinking-water quality.
INCHEM-IPCS (International Program on Chemical Safety, OMS)
En France, l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) peut également produire des VTR

5 Cancérogènes épigénétiques ou non génotoxiques

- TDI (Tolerable Daily Intake –RIVM)
- CAA (Concentration dans l'Air Admissible – OMS);

En France, la dénomination retenue par l'ANSES[6] pour l'ensemble de ses valeurs est la dénomination générique « VTR » (Valeur Toxicologique de Référence)

**Pour les effets sans seuil de dose**, les VTR seront présentées sous formes d'excès de risque unitaire (ERU). Cet ERU représente la probabilité de survenue d'un effet cancérigène pour une exposition à une unité de dose donnée. Les dénominations proposées les plus classiques sont les suivantes :

- l'excès de risque unitaire lié à la voie d'exposition orale : ERUo en $(mg/kg/j)^{-1}$,
- l'excès de risque unitaire par inhalation : ERUi en $(\mu g/m^3)^{-1}$.

## Critères de choix des VTR

La 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 est prise en compte pour la sélection des VTR.

En l'absence de VTR établie par l'ANSES, en application de la note DGS/DGPR précitée, pour chaque substance, les différentes VTR actuellement disponibles seront recherchées de façon à discuter le choix réalisé sur les critères suivants :

- les valeurs issues d'études chez l'homme par rapport à des valeurs dérivées à partir d'études sur les animaux. Par ailleurs, la qualité de l'étude pivot sera également prise en compte (protocole, taille de l'échantillon, …) ;
- les modes de calcul (degré de transparence dans l'établissement de la VTR) et les facteurs de sécurité appliqués constitueront également un critère de choix ;
- les valeurs issues d'organismes reconnus (européens ou autres).

Ainsi, en l'absence **d'expertise nationale** ou de VTR proposée par l'**Anses**, la VTR sera retenue selon l'ordre de priorité défini par la circulaire DGS/DGPR du 31/10/2014, à savoir :

- la VTR la plus récente parmi les trois bases de données : **US-EPA, ATSDR ou OMS** sauf s'il est fait mention par l'organisme de référence que la VTR n'est pas basée sur l'effet survenant à la plus faible dose et jugé pertinent pour la population visée**.**
- Puis, si aucune VTR n'était retrouvée dans les 4 bases de données (Anses, US-EPA, ATSDR et OMS), la VTR la plus récente proposée par **Santé Canada, RIVM, l'OEHHA ou l'EFSA**.

## VTR pour la voie cutanée

Lors de la réalisation d'évaluations des risques sanitaires en France, l'exposition cutanée n'est pas prise en compte, en raison de l'absence de valeurs toxicologiques de référence (VTR) et de méthodologie d'élaboration. Ainsi, l'INERIS a récemment travaillé sur la prise en compte de la voie cutanée et a proposé une méthode de construction de VTR pour des effets sensibilisants pour une exposition de la peau (INERIS, rapport DRC-07-85452-12062A, 2007).

A l'heure actuelle, l'INERIS continue son travail concernant les VTR pour des effets cutanés. L'objet de son rapport DRC-09-94380-01323A d'avril 2009, est d'ajuster la méthodologie précédemment proposée en prenant notamment en compte les recommandations du document guide développé pour la mise en œuvre du règlement REACh relatif à une méthodologie d'établissement des DNEL (Derived No Effect Level) pour les effets sensibilisants. La méthodologie a été appliquée à trois substances sensibilisantes : l'hydroquinone, substance pour laquelle deux types de tests étaient disponibles (LLNA et GPMT) qui présentait ainsi une

[6]ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail

bonne étude de cas pour la méthodologie et le benzo(a)pyrène, substance couramment retrouvée en évaluation des risques. Le 3-méthyleugénol, faiblement sensibilisant, a également été étudié dans l'objectif d'avoir un aperçu sur l'étendue possible des valeurs des DNEL. Ces valeurs ne sont pas reprises dans le présent document.

*In fine*, GINGER GINGER BURGEAP applique la note DGS/DGPR d'octobre 2014 qui mentionne « en l'absence de procédures établies pour la construction de VTR pour la voie cutanée, il ne doit être envisagé aucune transposition à cette voie de VTR disponibles pour les voies orale ou respiratoire ».

## Autres valeurs de comparaison utilisées

L'utilisation d'autres valeurs que les Valeurs Toxicologiques de Référence peut être réalisée parallèlement à la quantification des risques sanitaires. Ces autres valeurs permettent en effet de discuter de l'exposition des individus et d'estimer l'état des milieux, à savoir si un impact est mesuré (ou mesurable) ou non.

Ces valeurs de comparaison regroupent des valeurs réglementaires (France et Europe), des valeurs guide (OMS, INDEX, CHSPF) qui sont généralement des valeurs qui servent de point de départ à l'élaboration de valeurs réglementaires et, dans le contexte particulier du code du travail, des valeurs limites pour l'exposition professionnelle (VLEP) qu'elles soient réglementaires ou indicatives. Les VLEP peuvent en effet avec les seuils olfactifs être des éléments de l'interprétation de l'état du milieu air en l'absence de toute autre valeur guide.

Ces valeurs ne sont en aucun cas (conformément à la note DGS/DGPR d'octobre 2014) utilisées pour évaluer les Quotient de Danger (QD) et excès de risques individuels (ERI) faisant référence à une évaluation des risques sanitaires. Ces valeurs appelées valeurs de comparaison constituent des critères de gestion.

### Valeurs réglementaires

#### ◗ Milieu AIR

Le Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 transpose la directive européenne 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe et précise notamment les nouvelles normes à appliquer.

Ces valeurs réglementaires françaises sont établies pour l'air atmosphérique extérieur, pour des durées d'exposition (3h, 24h ou vie entière) et sur la base de moyennes horaires, journalières ou annuelles. On distingue 5 niveaux de **valeurs réglementaires** :

- Objectif de qualité : niveau de concentration à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.
- Valeur cible : niveau de concentration à atteindre, dans la mesures du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.
- Valeur limite pour la protection de la santé : niveau de concentration à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.
- Seuil d'information et de recommandation : niveau de concentration au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaires l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.
- Seuil d'alerte de la population : niveau de concentration au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Des valeurs réglementaires françaises existent pour le monoxyde de carbone, le benzène, le benzo(a)pyrène, les PM10 et PM2.5, dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, arsenic, cadmium, nickel et plomb.

Enfin, pour l'air intérieur des ERP (Établissement recevant du public) des valeurs guides réglementées en France ont été mises en place, elles sont reprises dans le présent document. La loi du 1er août 2008 relative à la responsabilité environnementale oblige à définir des « valeurs-guides pour l'air intérieur » dans les ERP. Le décret **n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur** y pourvoit pour le formaldéhyde, gaz incolore principalement utilisé pour la fabrication de colles, liants ou résines, et pour le benzène, substance cancérogène aux effets hématologiques issue de phénomènes de combustion (gaz d'échappement, cheminée, cigarette, etc.). La valeur-guide pour le formaldéhyde est fixée pour une exposition de longue durée à 30 µg/m³ au 1er janvier 2015 et à 10 µg/m³ au 1er janvier 2023. La valeur-guide pour le benzène est fixée pour une exposition de longue durée à 5 µg/m³ au 1er janvier 2013 et à 2 µg/m³ au 1er janvier 2016.

### ◗ Autres milieux

D'autres milieux sont concernés par des valeurs réglementaires en France (dans le domaine alimentaire par exemple). Celles-ci ne sont pas détaillées ici mais constituent au même titre que les concentrations dans l'eau et l'air des valeurs de gestion.

**Valeurs guides**

Les valeurs guides peuvent porter sur le milieu eau, air, sol et matrices alimentaires (animales, végétales). Ces valeurs, bien que reposant sur des critères sanitaires sont considérées comme des valeurs de gestion, et ne constituent pas, stricto sensus, des valeurs toxicologiques de référence.

### ◗ OMS –Air et air intérieur

Le bureau Europe de l'Organisation Mondiale de la Santé a publié en 2000 un document intitulé « Air Quality Guidelines in Europe » [WHO 2000][7] dans lequel figurent des valeurs guides pour la qualité de l'air.

L'objet de ce guide est de fournir une base pour la protection de la santé publique contre les effets néfastes des polluants atmosphériques, dans la perspective d'une cessation ou d'une réduction de l'exposition aux polluants qui nuisent certainement ou probablement à la santé ou au bien-être. Ce guide présente des informations générales et des conseils aux autorités internationales, nationales et locales qui souhaitent évaluer les risques et prendre des décisions concernant leur gestion. Ce guide établit des niveaux de polluants au-dessous desquels l'exposition (à vie ou pendant une période donnée) ne représente pas de risque important pour la santé publique.

En ce qui concerne les polluants abordés, les sections relatives à l'évaluation des risques pour la santé et aux valeurs-guides exposent les considérations les plus pertinentes qui ont conduit à l'adoption des valeurs-guides recommandées.

Certains polluants ont été revus par l'OMS en 2005 (WHO air quality guidelines, global update, 2005)[8]. Cette révision s'appuie sur l'ensemble des connaissances acquises ces dernières années (études épidémiologiques notamment).

Enfin, en 2010, l'OMS a publié un document intitulé « WHO guidelines for indoor air quality » [WHO 2010] dans lequel figurent des valeurs guides spécifiques pour la qualité de l'air intérieur.

### ◗ INDEX –Air intérieur

Le rapport final du projet INDEX : « Critical Appraisal of the setting and implementation of indoor exposures limits in the EU", 2005 élaboré par l'institut de la protection de la santé et du consommateur propose des valeurs guide pour l'air intérieur.

[7] WHO. Air Quality Guidelines. Second edition WHO Regional Publications, European Series, No. 91.2000, 273 pages.
[8] WHO. Air Quality Guidelines. Global update 2005. Report on a working group meeting. Bonn, Germany. 18-20 october 2005.

Les substances listées dans ce document sont le benzène, le toluène, les xylènes, le styrène, le naphtalène, l'acétaldéhyde, le formaldéhyde, le dioxyde de carbone, le dioxyde d'azote, l'ammoniac, le limonène, l'alpha pinène.

Les informations sur les expositions, la toxicité et la caractérisation du risque ont conduit les membres du projet à donner des recommandations quant aux expositions dans l'air intérieur à ne pas dépasser pour différentes durées.

### ◗ ANSES – Air intérieur

L'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire humaine dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation, notamment en mobilisant une expertise scientifique et technique pluridisciplinaire nécessaire à l'évaluation des risques.

Pour faire face à l'enjeu que représente la qualité de l'air intérieur et apporter aux pouvoirs publics des informations utiles à la gestion de ce risque, l'ANSES s'est auto-saisie en octobre 2004, de l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air intérieur (VGAI) en France. Elles sont exclusivement construites sur des critères sanitaires. Elles sont exprimées sous forme de concentration dans l'air, associée à un temps d'exposition (VGAI court terme, VGAI long terme, VGAI intermédiaire), en dessous de laquelle aucun effet sanitaire, aucune nuisance, ou aucun effet indirect important sur la santé n'est en principe attendu pour la population générale.

Dans le cadre de substances dont les effets se manifestent sans seuil de dose, les VG sont exprimées sous la forme de niveaux de risque correspondant à une probabilité de survenue de la maladie.

En décembre 2014, date de la mise à jour de ce document, 11 polluants d'intérêt de l'air intérieur ont fait l'objet d'une expertise de l'Anses sur les VGAI.

Voir : https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualit%C3%A9-d%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-vgai

### ◗ CSHPF et HCSP

Le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) est une instance d'expertise scientifique et technique, placée auprès du ministre chargé de la santé. Cette instance a un rôle d'évaluation et de gestion des risques pour la santé de l'homme. Le CSHPF peut être consulté lorsque se posent des problèmes sanitaires. Les avis et les recommandations émis par le CSHPF constituent une base essentielle à la prise de décision en santé publique et peuvent également servir d'appui à l'élaboration de textes réglementaires.

Les avis et rapports du CSHPF sont consultables sur le site suivant : http://www.sante.gouv.fr/avis-et-rapports-du-cshpf.html

Le Haut Conseil de la santé publique a été officiellement installé le 14 mars 2007. Ses 105 membres ont élu leur président et leur vice-président. Le HCSP est une instance d'expertise créée par la Loi relative à la politique de santé publique du 9 août 2004. Il reprend, en les élargissant, les missions du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) et celles du Haut Comité de la santé publique.

Les avis et rapports du HCSP sont consultables sur le site suivant :

http://www.hcsp.fr/explore.cgi/accueil?ae=accueil

## Organismes consultés pour la recherche de VTR

Les bases de données consultées pour la recherche des VTR sont les suivantes (présentée dans l'ordre de priorité préconisé par la note d'information DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014) :

- **Anses** (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail).
- **US EPA** (United States Environmental Protection Agency – États-Unis) dont dépend la base de données **IRIS** – Integrated Risk Information System).
- **ATSDR** (Agency for Toxic Substances and Disease Registry – États-Unis).

- **OMS** (Organisation Mondiale de la Santé – Bureau régional de l'Europe) / **IPCS** (International Program on Chemical Safety).

Ces organismes établissent leurs propres VTR à partir d'études expérimentales ou épidémiologiques. Les valeurs issues de ces bases de Données sont des données à caractère national mais elles sont internationalement reconnues.

Viennent ensuite les organismes pour lesquels la transparence dans l'établissement des valeurs n'est pas toujours adaptée à la sélection de leur VTR :

- **Health Canada = Santé canada** (Ministère Fédéral de la Santé – Canada),
- **RIVM** (RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieu – Institut National de Santé Publique et de l'Environnement – Pays Bas),
- **OEHHA** (Office of Environmental Health Hazard Assessment of California – États-Unis) qui établit également ces propres VTR. L'OEHHA se base souvent sur les mêmes études que l'US EPA mais les VTR sont souvent plus conservatoires.
- **EFSA** (Eureopean Food Safety Authority).

Des recueils de données sont consultés par ailleurs, car ils regroupent les VTR des différents organismes cités ci-avant. Ce sont :

- **Furetox** (Faciliter l'Usage des REsources TOXicologique), base de données française réalisée en partenariat avec l'Institut de Veille sanitaire, l'ARS Nord Pas de Calais et l'ARS Ile de France.
- **TERA** (toxicology excellence for risk assessment), base de données **de ITER** (International Toxicity Estimates for Risk Database), établit une synthèse des données toxicologiques issues des autres bases de données.
- **INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des risques - France), établit des fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques qui synthétisent notamment l'ensemble des données toxicologiques issues des autres bases de données - à l'heure actuelle ce programme contient une cinquantaine de fiches.
- **IPCS INCHEM** (International Programme on Chemical Safety) : Portail d'accès à de nombreux sites dont le **CIRC** (Centre International de Recherche sur de Cancer), le **JEFCA** (Joint Expert Committee on Food Additives) et autres instances internationales.

Le recueil de donnée **RAIS** (Risk Assessment Information System – États-Unis) reprenant les valeurs des autres organismes américains, en particulier du **NTP** (National Toxicology Program) et de **IRIS** de l'US EPA, n'est pas considéré compte tenu de l'absence de toute transparence dans les valeurs affichées.

# Annexe 7. Estimation des concentrations dans les milieux d'exposition

Cette annexe contient 8 pages.

## Concentration dans les gaz des sols et coefficients de diffusion dans les sols (**commun à tous les modèles**)

### Concentration dans les gaz des sols

La concentration dans les gaz des sols quand elle n'est pas donnée directement par l'utilisateur est calculée à partir des équations suivantes.

Elle correspond à la valeur minimale issue des équations (a) et (b) :

$$C_{gds} = (C_t \times \rho_b \times K_H) / (\theta_a \times K_H + \theta_w + \rho_b \times F_{oc} \times K_{oc}) \quad \textbf{(a)}$$

Équation utilisée quand $C_w$< Solubilité effective

Avec $C_t$ : concentration en polluant dans le sol (mg/kg)
$\rho_b$ : densité du sol (g/cm$^3$)
$F_{oc}$ : fraction de carbone organique dans le sol (g co/g sol)
$K_{oc}$ : coefficient de partition du carbone organique (mgl/g)
$K_H$ : constante de Henry adimensionnemmelle (-)
$\theta_a$ : teneur en air dans les sols (-)
$\theta_w$ : teneur en eau dans les sols (-)

$$C_{wi} = X.\ S \quad \textbf{(c)}$$

$$C_w = \frac{C_{gds}}{H} \quad \textbf{(b)}$$

Équations utilisées en présence de phase résiduelle dans les sols ($C_w$>Solubilité)

Avec $C_{wi}$ : concentration de la substance i dans l'eau du sol (mg/l),
H : constante de Henry (-)
X : fraction molaire de la substance i dans le mélange (-)
S : solubilité de la substance i (mg/l)

### Coefficients de diffusion dans les gaz des sols

Le coefficient de diffusion réel dans le milieu poreux ($D_{sa}$ dans l'air et $D_{sw}$ dans l'eau) est calculé par la solution analytique développée par Millington and Quirk (1981) à partir de la porosité des sols, de la teneur en air et en eau et des coefficients de diffusion de la substance dans l'air et dans l'eau.

$$D_{sa} = D_a . \theta_a . \left(\frac{{\theta_a}^{7/3}}{\theta^2}\right) \quad \textbf{(d)}$$

$$D_{sw} = \frac{D_w}{H} . \theta_w . \left(\frac{{\theta_w}^{7/3}}{\theta^2}\right) \quad \textbf{(e)}$$

Avec :

H : constante de Henry adimensionnelle (-),
$D_a$ : coefficient de diffusion dans l'air libre (m²/s) , $D_w$ : coefficient de diffusion dans l'eau libre (m²/s)
□ : porosité totale (-),□□w teneur en eau du sol (-),□□a teneur en gaz des sols (-)

Le coefficient de diffusion effectif dans le milieu poreux correspond à la somme des deux termes précédents (d) et (e).

$$D_{eff} = D_{sa} + D_{sw} \quad \textbf{(f)}$$

En zone non saturée, le coefficient de diffusion dans la phase gazeuse est approximativement $10^4$ fois plus grand que le coefficient de diffusion dans la phase aqueuse, ce qui explique que certains modèles de transfert gazeux ne considèrent que l'équation (d). GINGER GINGER BURGEAP réalise cette sommation, excepté pour l'application du modèle VOLASOIL en application stricte des équations décrites dans (Waitz et al. 1996).

## Caractéristiques de la dalle béton (**commun à différents modèles air intérieur**)

### Béton

La perméabilité d'un matériau comme le béton est liée dans les modèles de transfert à sa fissuration. Dans le modèle développé par Johnson et Ettinger, seule la fissuration périphérique intervient considérant le reste de la dalle comme non poreuse et non perméable. Dans les autres modèles (Waitz et al, 1996, Bakker et al. 2008) la perméabilité de la dalle peut être exprimée en lien avec le taux de fissuration comme suit.

$$K_f = \frac{{f_{of}}^2}{8.n.\pi} \qquad \textbf{(g)}$$

Avec $K_f$ : perméabilité de la dalle (m²)
$f_{of}$ : taux de fissuration dans la dalle (-) = surface des fissures / surface de la dalle
n : nombre de fissures dans la dalle par unité de surface ($m^{-2}$). Le nombre de fissures dans la dalle par unité de surface est par défaut de Volasoil de 10 fissures pour 50 m², soit égal à 0,2 $m^{-2}$.

Pour le taux de fissures dans la dalle $f_{of}$, dans *The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatils compounds*, le RIVM donne les informations reprise dans le tableau suivant. A titre d'information, nous avons reporté dans ce tableau les perméabilités de dalle calculées, en supposant un nombre de fissures dans la dalle par unité de surface de 0,2 $m^{-2}$.

| Taux de fissure dans la dalle fof (-) | Kdalle associée (m²) | Qualité de la dalle | Recommandation utilisation dans la modélisation |
|---|---|---|---|
| $2.10^{-4}$ | $8.10^{-9}$ | dalle de qualité « très mauvaise » selon Bakker et al. (2008) | Niveau de perméabilité non retenu équivalent à un plancher bois ou dalles fendues |
| $10^{-5}$ | $2.10^{-11}$ | dalle de qualité « normale » selon Bakker et al. (2008) | Perméabilité de la dalle après un vieillissement normal. Valeur analogue en perméabilité à un sable |
| **$10^{-6}$** | **$2.10^{-13}$** | **dalle de bonne qualité selon Bakker et al. (2008)** | **Perméabilité de la dalle retenue par défaut si non connue pour de nouvelles constructions.** |
| $10^{-7}$ | $2.10^{-15}$ | dalle de très bonne qualité selon Bakker et al. (2008) | Perméabilité de la dalle qui pourra être retenue en présence d'une géomembrane en base ou résine de type epoxy |

Concernant la diffusion des polluants à travers la dalle en béton, celle-ci est calculée par application des équations **(d), (e)** et **(f)** en prenant en compte des valeurs de porosité et teneur en eau spécifiques :

- Porosité de la dalle de 12 %. Cette valeur est déterminée pour un béton ordinaire de rapport E/C = 0,48, d'après « Caractérisation des pâtes de ciments et des bétons – Méthodes, analyse, interprétation ». Véronique BAROGHEL-BOUNY. LCPC, 1994.
- Teneur en eau de 7% (valeur par défaut choisie à partir des travaux spécifiques du département R&D de GINGER BURGEAP mettant en évidence des rapports entre la diffusion dans l'air libre et la diffusion dans le matériau (Da/Dsa) compris entre 370 et 15000.

Les caractéristiques retenues conduisent à un rapport entre la diffusion dans l'air libre et la diffusion dans le matériau de 312.

### Enrobé

Pour les aménagements extérieurs, le terrain naturel ou le remblai peut être recouvert par une couche d'enrobé. Dans ce cas les caractéristiques suivantes sont considérées pour le calcul de la diffusion des polluants par application des équations **(d), (e)** et **(f).** Les caractéristiques en termes de porosités et teneur en eau des enrobés asphaltés sont diverses, dépendant de la typologie des enrobés. Dans l'application des

calculs de risques à la réutilisation des terres excavées, Blanc et al. (2012) [9] retiennent pour l'enrobé extérieur (parking) une porosité de 3% et une teneur en eau nulle ; aucun argumentaire n'est cependant donné sur la source de ces valeurs. GINGER BURGEAP, sur la base d'une analyse de la bibliographie disponible (2019) retient les valeurs suivantes conduisant à un rapport entre la diffusion dans l'air libre et la diffusion dans le matériau de 414 :

- Porosité de l'enrobé de 3 % ;
- Teneur en eau de 1%

## Concentrations de vapeurs dans l'air intérieur – première approche

En l'absence de connaissance des caractéristiques constructives et de ventilation des futurs aménagements, le choix entre les différents modèles disponibles (J&E, Volasoil, Baker) ne peut être réalisé de manière pertinente pour évaluer les transferts (et in fine les risques sanitaires potentiels). Dans un tel contexte, GINGER BURGEAP retient pour évaluer la concentration dans l'air intérieur l'application d'un facteur d'atténuation entre les gaz des sols et l'air intérieur.

Plusieurs projets de recherche ont mis en évidence de grandes disparités entre les résultats de modélisation associés aux modes constructifs, aux hypothèses calculatoires et aux phénomènes considérés[10]. Par ailleurs, des retours d'expérience réalisés à partir de mesures de concentration ont conduit à des bases de données de facteur d'atténuation (US-EPA, France BRGM dans le cadre des diagnostics sur les établissements sensibles). Aux États-Unis, l'analyse du retour d'expérience conduit les différents États à recommander l'application de certains facteurs d'atténuation en fonction de la localisation des mesures. En France, l'application d'un facteur d'atténuation est énoncée dans la Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués du Ministère de l'Environnement d'avril 2017 et dans le guide méthodologique FLUXOBAT de novembre 2013.

Ainsi, la concentration dans l'air intérieur est calculée à partir de la concentration dans l'air des sols à la source comme suit :

$$C_{ai} = \alpha . C_{GdS} \qquad \textbf{(1)}$$

Avec

$C_{ai}$ : concentration en polluant dans l'air intérieur (mg/m$^3$)
a : facteur d'atténuation entre le sol et l'environnement intérieur considéré (-)
$C_{gds}$ : Concentration dans les gaz des sols

Le facteur d'atténuation retenu est a = 0,05. Cette valeur est issue de l'analyse du retour d'expérience réalisé par l'agence de l'environnement des États-Unis (US-EPA) sur la base de mesures réalisées (il s'agit de la valeur appliquée par l'État de Californie), il est cohérent avec l'analyse statistique des mesures réalisées en France sur les établissements sensibles donnant un percentile 95 de 0,037[11] .

Si pour de nouvelles constructions, ce facteur est précautionneux, il ne peut être réduit compte tenu de l'absence de données techniques relatives à la future construction.

[9] Blanc C. avec la participation de F.Lefevre (MEDDTL), G.Boissard, M.Scamps (BRGM) et B.Hazebrouck (INERIS) – (2012) - Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement. BRGM/RP-60013-FR, 53p

[10] Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Gay G., Quintard M., Pepin L. (2013). Projet FLUXOBAT, Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur. Guide méthodologique. Novembre 2013. 257 pp (accessible sur www.fluxobat.fr )

[11] Derycke V., Coftier A., Zornig C. Leprond H., Scamps M., Gilbert D. Environmental assessments on schools located on or near former industrial facilities : feedback on attenuation factors for the prediction of indoor air quality. Juin 2018. Science of total environment (vol 626 pp 754-761)

## Concentrations de vapeurs dans l'air intérieur - bâtiment de plain-pied sur dallage indépendant (étudié en incertitude)

**Description du modèle utilisé**

La modélisation des expositions aux vapeurs est conduite sur la base des équations de **Johnson & Ettinger** (1991), dont les équations et les phénomènes considérés sont donnés ci-après.

La diffusion (équations de Millington and Quirck et équation de Fick) entraîne les polluants à travers le sol jusqu'à la zone d'influence du bâtiment où le phénomène convectif intervient. Le mouvement convectif, dû à une différence de pression entre l'air du sol et l'air intérieur des bâtiments (occasionnée par la combinaison du vent, du chauffage et des mécanismes de ventilation), transporte les vapeurs par les fissures des fondations et de la dalle béton.

Le modèle utilisé considère une source de pollution infinie (pas de diminution au cours du temps).




Johnson & Ettinger, 1991
**Dallage indépendant**
Yao et al., 2011

**La concentration dans l'air intérieur** en régime permanent (source infinie) est calculée à partir de la concentration dans l'air des sols à la source comme suit:

$$C_{ai} = \alpha . C_{GdS} \quad \textbf{(1)}$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\left[\frac{Deff \times AB}{QB \times LT}\right] \times \left[exp\left(\frac{Qsol \times Lcrack}{Dcrack \times Acrack}\right)\right]}{\left[exp\left(\frac{Qsol \times Lcrack}{Dcrack \times Acrack}\right) + \left[\frac{Deff \times AB}{QB \times LT}\right] + \left[\frac{Deff \times AB}{Qsol \times LT}\right] \times \left[exp\left(\frac{Qsol \times Lceack}{Dcrack \times Acrack}\right) - 1\right]\right]} \quad \textbf{(2)}$$

$D_{eff}$ : coefficient de diffusion effectif (m²/s) calculé à partir de la porosité et de la teneur en eau des différents horizons de sols, voir équations (d), (e) et (f)
$C_{vs}$ : concentration de vapeur dans la source (mg/m$^3$)
$Q_{sol}$ : débit de gaz en provenance du sol dans le bâtiment (m$^3$/s), calculé à partir de la différence de pression et de la perméabilité des sols sous dallage
$D_{crack}$ : coefficient de diffusion effectif dans les fondations (m²/s), calculé à partir de la porosité et de la teneur en eau des sols sous dallage par application des équations de Millington et Quirck détaillées ci-après
$A_{crack}$ : surface de fissures à travers lesquelles les vapeurs rentrent dans le bâtiment (m²), correspondant au produit entre le taux de fissuration et la surface du dallage
Lcrack : épaisseur de la dalle (m)
$A_B$ : surface des bâtiments (m$^2$)
$L_T$ : distance de la source au dallage (m)
$Q_b$ : Débit de renouvellement d'air du bâtiment (m$^3$/s), calculé à partir du nombre d'échanges d'air par jour et du volume du bâtiment

Le débit $Q_{sol}$ ($m^3/s$) est calculé à partir de l'équation suivante :

$$Qsol = \frac{2 \times \Pi \times (\Delta P) \times kv \times Xcrack}{\eta \, ln[2 \times Zcrack / rcrack]} \quad \textbf{(3)}$$

Avec ΔP : gradient de pression entre le bâtiment et l'extérieur (Pa)
$k_v$ : perméabilité intrinsèque des sols ($m^2$)
η : viscosité dynamique des gaz (Pa.s)
$X_{crack}$ : longueur du cylindre représentant la fissure, correspondant au périmètre du bâtiment considéré (m)
$r_{crack}$ : rayon équivalent de la fissure (m), calculé par le rapport entre (fraction des fissures dans le dallage x surface du dallage) et le périmètre du bâtiment considéré
Zcrack : profondeur des fissures sous le sol (m), correspond à Lcrack en l'absence de sous-sol ou à la hauteur du sous-sol en présence de sous-sol
π : 3.14159

Le terme en exponentiel dans l'équation **(2)** suivant :

$$\left(\frac{Qsol \times Lcrack}{Dcrack \times Acrack}\right)$$

représente le nombre de Péclet Equivalent pour le transport à travers les fondations du dallage, quand ce terme tend vers l'infini, la résolution de l'équation **(2)** approche :

$$\alpha = \frac{\left[\frac{Deff \times AB}{QB \times LT}\right]}{\left[\left[\frac{Deff \times AB}{Qsol \times LT}\right] + 1\right]} \quad \textbf{(4)}$$

Lorsque l'environnement intérieur au contact des sols correspond à un parking ou sous-sol, les caractéristiques de cet espace sont utilisées pour l'application des équations ci-dessus. La concentration calculée est ainsi la concentration dans l'air intérieur du parking ou sous-sol. Dans ce cas, la concentration dans les lieux de vie sus-jacents est calculée en appliquant un facteur d'atténuation β entre ces deux niveaux comme suit :

$$C_{ai}(lieu\ de\ vie) = \beta . C_{ai}\,(ssol, parking) \quad \textbf{(5)}$$

Avec $C_{ai}$ : concentration en polluant dans l'air intérieur ($\mu g/m^3$) de chacun des niveaux
β : facteur d'atténuation entre le sous-sol ou parking et le niveau de vie sus-jacent (-)
$C_{ai\ (ssol,\ parking)}$ = concentration en polluant dans les sous-sol ou parking ($\mu g/m^3$)

La différence de pression entre l'air des bâtiments et l'air du sol ΔP : 4 Pa (valeur conservatoire définie par Johnson et Ettinger). Cette différence de pression varie dans la littérature de 0 à 20 Pa. L'effet du vent et de la température (chauffage) induit des variations de pression comprises typiquement entre 4 et 5 Pa (Loureiro et al. 1990 ; Grimsrud et al. 1983).

Les autres paramètres utilisés dans le modèle sont précisés soit en début d'annexe (diffusion) soit dans le corps du rapport.

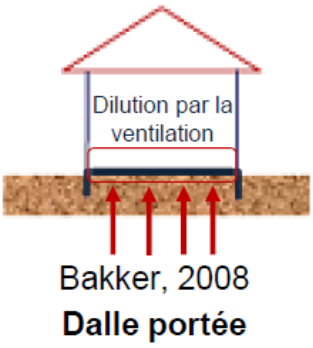
Les équations utilisées sont présentées dans la norme ASTM E 1739-95 et consultables dans le document suivant : USER'S GUIDE FOR EVALUATING SUBSURFACE VAPOR INTRUSION INTO BUILDINGS, U.S. EPA OFFICE OF EMERGENCY AND REMEDIAL RESPONSE ; EPA Contract Number: 68-W-01-058 ; June 19, 2003. Elles ont été réécrites sous excel par nos soins.

## Concentration de vapeurs dans l'air intérieur - bâtiment de plain-pied sur dalle portée

Les équations reprises ci-après sont tirées de **Bakker et al**. 2008 (RIVM Report 711701049/2008) pour un bâtiment de plain-pied avec une dalle portée, elles ont été réécrites sous excel par nos soins.

Le flux de polluant gazeux venant du sol vers l'air intérieur $J_T$ combine le transport convectif et diffusif à travers les différents horizons de sols et la dalle considérée ici comme un milieu poreux équivalent. Les équations proposées par Waitz et al. (1996) pour chaque couche sont reprises par Bakker et al. (2008).

Le modèle utilisé considère une source de pollution infinie (pas de diminution au cours du temps).




**Le flux convectif $F_T$** d'air du sol vers l'air intérieur ($m^3/m^2/s$) s'écrit comme suit :

$$F_T = \frac{dP_T}{{Ls}/{Ks} + {Lf}/{Kf}} \qquad (1)$$

Avec $dP_T$ : différence de pression entre l'intérieur du bâtiment et les sols (jusqu'à la source) (Pa)
$F_T$ : flux convectif total à travers le système sol+dalle ($m^3/m^2/s$)
Ls : hauteur de sol entre la source et la base de la dalle (m)
Lf : épaisseur de la dalle (m)
Ks : conductivité équivalente du sol entre la source et la dalle ($m^2/Pa/s$)
Kf : conductivité équivalente de la dalle ($m^2/Pa/s$)

Pour une succession de lithologies présentant des perméabilités différentes, le coefficient de conductivité équivalent Ks est calculé comme suit :

$$K_s = \frac{L_s}{\sum_{(0 \text{ à } Ls)} \left[ {L_h}/{k_h} \right]} \cdot \frac{1}{\eta} \qquad (2)$$

Avec : $L_h$ : épaisseur de l'horizon h (m)
$L_s$ : profondeur de la source considérée (m)
$k_h$ : perméabilité au gaz de l'horizon h ($m^2$)
η : viscosité dynamique du gaz (Pa.s)

**Le flux de polluant $J_T$** du sol vers l'air intérieur ($mg/m^2/s$) s'écrit :

$$J_T = \frac{-F_T . C_{gds}}{exp\left[ -F_T \, {L_T}/{D_{eff}} \right] - 1} \qquad (3)$$

Avec $J_T$ : flux total du polluant du sol vers l'air intérieur ($mg/m^2/s$)
$F_T$ : flux convectif total à travers le système sol+dalle ($m^3/m^2/s$)
$L_T$ : longueur totale du système considéré entre la source et l'air intérieur (m) : hauteur de sols (Ls) + de dalle (Lf)
Deff : coefficient de diffusion effectif intégrant les sols et la dalle ($m^2/s$) calculé à partir des caractéristiques des différentes couches de sol, voir équations (d), (e) et (f)
Cgds : concentration dans les gaz des sols à la source ($mg/m^3$)

NB : Les équations sont simplifiées par l'auteur considérant que la concentration dans l'air intérieur à la surface de la dalle est négligeable devant celle dans les gaz des sols.

La concentration dans l'air intérieur $C_{ai}$ est dépendante du débit massique de polluant $J_T$ et du taux de renouvellement d'air de l'environnement intérieur considéré $RA_{ai}$. D'un point de vue théorique, le renouvellement d'air $RA_{ai}$ dépend du taux de ventilation $\tau_i$ mais également du flux d'air provenant des sols, même si ce dernier est généralement négligeable devant le débit de ventilation.

$$C_{ai} = \frac{J_T}{h_{ai}.RA_{ai}} \quad \textbf{(4)}$$

avec

$$RA_{ai} = \tau_i + \frac{F_T}{h_{ai}} \quad \textbf{(5)}$$

Avec $C_{ai}$ : concentration en polluant dans l'air intérieur (mg/m$^3$)
$h_{ai}$ : hauteur de l'environnement intérieur considéré (m)
$RA_{ai}$ : taux de renouvellement de l'environnement intérieur considéré (s$^{-1}$)
$\tau_i$ : taux de ventilation d'air de l'environnement intérieur considéré (s$^{-1}$)
$J_T$ : flux total du polluant du sol vers l'air intérieur (m$^3$/s)
$F_T$ : flux convectif total à travers le système sol+dalle (m$^3$/m²/s)

Lorsque l'environnement intérieur au contact des sols correspond à un parking ou sous-sol, les caractéristiques de cet espace sont utilisées pour l'application des équations ci-dessus. La concentration calculée est ainsi la concentration dans l'air intérieur du parking ou sous-sol. Dans ce cas, la concentration dans les lieux de vie sus-jacents est calculée en appliquant un facteur d'atténuation β entre ces deux niveaux comme suit :

$$C_{ai}(lieu\ de\ vie) = \beta.C_{ai}\ (ssol, parking) \quad \textbf{(6)}$$

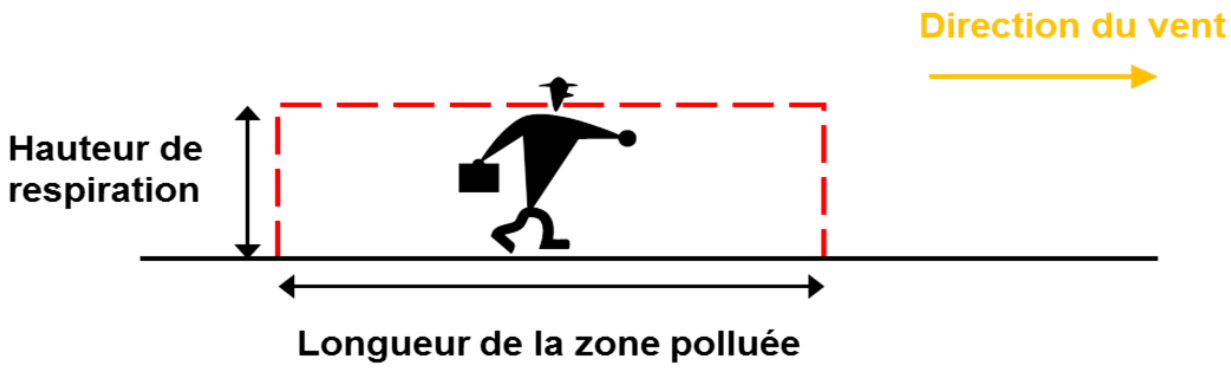
Avec $C_{ai}$ : concentration en polluant dans l'air intérieur (µg/m$^3$) de chacun des niveaux
β : facteur d'atténuation entre le sous-sol ou parking et le niveau de vie sus-jacent (-)

Les équations utilisées sont tirées de Bakker et al. 2008 (RIVM Report 711701049). Elles ont été écrites sous excel par nos soins.

## Concentration de vapeur dans l'air extérieur

Dans l'air extérieur, la modélisation des expositions est conduite sur la base des équations **de Millington and Quirck et de l'équation de Fick.** La dilution par le vent est ensuite calculée dans une boite de taille fixée. Comme pour l'air intérieur, la source de pollution est considérée comme infinie.

Le calcul des concentrations diluées par le vent est effectué à l'aide de l'équation générique utilisée dans le logiciel RISC (modèle boite).




La concentration moyenne dans l'air extérieur est calculée de la façon suivante :

$$C_{ae} = \frac{Jae}{v} \cdot \frac{L}{H} \quad \textbf{(1)}$$

Avec $C_{ae}$: concentration moyenne dans l'air extérieur (µg/m$^3$) à la hauteur de l'organe respiratoire (H)
$J_{ae}$ : flux de polluant à l'interface sol/air extérieur (µg/m²/s)
L : longueur de la zone de mélange (correspondant à la longueur de la zone polluée) (en m)
v : vitesse moyenne du vent (m/s)
H : hauteur de la zone de mélange (m) correspondant à la hauteur de l'organe respiratoire de la cible

Le flux vers l'air extérieur $J_{ae}$ (µg/m²/s) est calculé à partir de l'équation de Fick, comme suit :

$$J_{ae} = D_{eff} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad \textbf{(2)}$$

Avec dC/dz : gradient de concentration (g/m$^3$-m) entre la concentration à la source et la surface
Deff (ici m²/j) en le coefficient de diffusion effectif dans le sol .

La concentration dans les gaz des sols est si nécessaire calculée avec les équations (a), (b) et (c) présentées en début d'annexe. La diffusion effective est calculée à partir des caractéristiques des différentes couches de sol avec les équations (d), (e), (f) présentées en début d'annexe.

Enfin, en présence de recouvrement, ses caractéristiques diffusives sont prises en compte comme une couche de matériau poreux complémentaire.

# Annexe 8. Détails des calculs de dose et de risque

Cette annexe contient 1 page.

**Détail des quotients de danger et Excès de risque individuelle sur la zone 3**

| | Inhalation air intérieur - Bakker - air intérieur des lieux de vie | | Inhalation air extérieur avec recouvrement | |
|---|---|---|---|---|
| | Effets toxiques sans seuil Excès de risques individuels (ERI) | Effets toxiques à seuil non cancérigènes Quotient de danger (QD) | Effets toxiques sans seuil Excès de risques individuels (ERI) | Effets toxiques à seuil non cancérigènes Quotient de danger (QD) |
| | Adulte Travailleur | Adulte Travailleur | Adulte Travailleur | Adulte Travailleur |
| **SUBSTANCES** | | | | |
| **COMPOSES AROMATIQUES MONOCYCLIQUES** | | | | |
| Benzène | 8.08E-10 | 8.00E-05 | 3.03E-12 | 3.00E-07 |
| **COMPOSES ORGANO-HALOGENES VOLATILS** | | | | |
| Tétrachloroéthylène (PCE) | 3.61E-08 | 6.00E-04 | 1.15E-10 | 2.00E-06 |
| Trichloroéthylène (TCE) | 2.02E-07 | 1.00E-04 | 6.95E-10 | 3.00E-07 |
| Dichloroéthylène (cis 1,2-DCE) | *non calculé* | 3.00E-04 | *non calculé* | 8.00E-07 |
| Dichloroéthylène (trans 1,2-DCE) | *non calculé* | 2.00E-05 | *non calculé* | 7.00E-08 |
| **TOTAL** | 2.39E-07 | 1.10E-03 | 8.13E-10 | 3.47E-06 |