



Saint-Nazaire (44) Diagnostic du milieu souterrain

Rapport n° PR.44EN.21.0084 – 002 – Ind. A – 01/06/2022

LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE

Projet de construction d'un atelier de préfabrication – projet PSI
Avenue Antoine Bourdelle
Saint-Nazaire

VOTRE AGENCE

Agence de Nantes

12 rue Léon Gaumont – ZA de la Pentecôte

44700 – ORVAULT

☎ 02.51.77.86.50




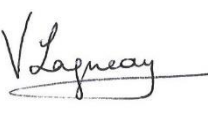

✉ environnement.nantes@fondasol.fr



RT 261-301- Indice H

SUIVI DES MODIFICATIONS ET MISES A JOUR

Le chef de projet de cette étude est : Julia SPORRI.

Rév.	Date	Nb pages	Modifications	Rédacteur	Vérificateur	Superviseur
-	21/04/2022	181 + annexes	1 ^{ère} diffusion	F. COURVOISIER  J. SPORRI 	Kévin ROUSSEAU 	Véronique LAGNEAU 
A	01/06/2022	191 + annexes	Modifications des profondeurs de terrassement et solutions de gestion (paragraphes O, P et Q) compte tenu de la non-faisabilité technique de celles-ci	J. SPORRI 	Véronique LAGNEAU	Véronique LAGNEAU
B						
C						

RESUME NON TECHNIQUE

Dans le cadre d'un projet de construction d'un atelier de préfabrication de bateaux et ferries, Les Chantiers de l'Atlantique souhaitent réaliser un diagnostic environnemental du milieu souterrain au droit du site localisé sur la commune de Saint-Nazaire (44).

Trois missions d'investigations sur les sols, les terres à excaver et les gaz du sol ont déjà été effectuées sur le site dans le cadre du projet. Ces études ont mis en évidence une pollution des sols par des hydrocarbures. Les analyses des gaz du sol ont montré la présence de composés volatils (hydrocarbures) à des concentrations supérieures aux valeurs de référence de la qualité de l'air intérieur. Au vu de ces résultats, il avait été jugé qu'il existait un risque potentiel d'exposition des futurs usagers du site via l'inhalation de vapeurs, ainsi qu'un risque de contamination des eaux souterraines par migration verticale.

De fait, il a été préconisé de réaliser un plan de gestion, avec la réalisation préalable d'un diagnostic environnemental complet : visite du site, étude historique, étude de vulnérabilité des milieux et investigations complémentaires sur les différents milieux (sols, eaux souterraines et gaz des sols).

Le site d'étude est divisé en 3 zones principales : un parking de véhicules légers (au sud et à l'est), un centre de tri des déchets (au centre nord) et une plateforme de tri de ferraille et métaux exploitée par la société GDE (à l'extrême nord). Un local de stockage de déchets dangereux, une zone de stockage de déchets dangereux ainsi qu'une plateforme de tri des métaux et ferraille ont été identifiés comme source potentielle de pollution.

L'étude de vulnérabilité des milieux a permis de mettre en évidence une nappe libre peu profonde vulnérable mais sans usage sensible recensé en aval hydrogéologique.

D'après l'étude historique, le site a été construit par remblaiement d'une partie de l'estuaire de la Loire entre 1975 et 1996. Le centre de tri des déchets a occupé la partie centrale du site pour le triage de déchets vers 1996, avant l'aménagement d'un parking entre 1999 et 2002 sur la partie sud et est du site. Une nouvelle plateforme de tri (encore en activité) a été aménagée entre 2009 et 2012 sur la partie nord du site.

Ainsi, trois sources potentielles de pollution ont été identifiées à l'issue de la visite de site et de l'étude historique. Il s'agit de l'apport de remblais de qualité vraisemblablement médiocre, de stockage de déchets liquides et dangereux ainsi que l'activité de la plateforme de tri des métaux.

Les investigations ont mis en évidence :

- dans les sols : des anomalies généralisées en métaux sur l'ensemble du site ainsi que des fortes teneurs en hydrocarbures C10-C40 et des impacts plus localisés en HAP (dont du naphthalène), en BTEX et en PCB ;
- dans les eaux souterraines : des anomalies en métaux, benzène et HAP ainsi que des teneurs significatives en hydrocarbures volatils C5-C16 ;
- dans les gaz du sol : des anomalies en benzène et hydrocarbures volatils C5-C16.

Les concentrations sont particulièrement élevées pour le cuivre, le plomb et le zinc mais cela est lié à un bruit de fond géochimique global attribuable au site. En revanche, des zones de pollution concentrée en hydrocarbures et en polychlorobiphényles ont été identifiées au droit du site. Sur la base des analyses disponibles (pollution non délimitée en profondeur), le volume de terre polluée a été estimé à environ 5 990 m³.

Le remblaiement par des sables sans mise en place de mesure constructive conduit à des risques inacceptables.

Afin de rendre compatibles les teneurs résiduelles avec le projet, il avait été étudié dans notre précédent rapport 2 solutions de gestion : un remblaiement des zones de pollution concentrée par des limons et le remblaiement des zones de pollution concentrée par des sables nécessitant également la mise en place d'un vide sanitaire. Toutefois, vous nous avez indiqué qu'aucune de ces deux solutions n'étaient envisageables d'un point de vue technique sur site compte tenu notamment de la mise en place d'inclusions rigides dans les sols sous le futur bâtiment afin de recevoir les descentes de charge.

Ainsi, **la solution retenue est l'excavation des terres impactées sous le futur bâtiment et confinement sur site en extérieur d'une partie des terres (1 200 m³ peuvent être réutilisées en merlon sous recouvrement semi-perméable).** Les autres terres polluées seront à évacuer en centre de traitement ou d'enfouissement.

Les seuils de réception en fond de fouille ont été définis à : 60 mg/kg en HAP, 0,8 mg/kg en naphthalène, 8 mg/ kg en BTEX et 0,8 mg/kg en PCB.

Sous le bâtiment, il conviendra de faire une réception en gaz des sols avec les seuils suivants : 261 µg/m³ en benzène, 103 µg/m³ en xylènes, 1 114 µg/m³ en hydrocarbures aliphatiques C8-C10, 297 µg/m³ en aliphatiques C10-C12, 482 µg/m³ en aromatiques C8-C10 et 71 µg/m³ en aromatiques C10-C12 dans les gaz du sol.

Cette solution a été estimée entre 1 430 et 1 460 k€.

En cas de non atteinte des seuils de réception sous le futur bâtiment, un drainage des gaz sous dalle pourra être mis en place. Cette mesure constructive a été estimée à environ 75 k€.

L'Analyse des Risques Résiduels montre que les risques induits sur le site et les seuils de dépollution définis, une fois les mesures de gestion mises en œuvre (excavation des terres polluées et validation des travaux avec des prélèvements en fond de fouille dans les sols et les gaz du sol conformes aux seuils, mise en place d'un drainage des gaz sous dalle si les seuils ne sont pas atteints), sont conformes ; les teneurs résiduelles seront donc compatibles avec un usage industriel.

Compte tenu des impacts mis en évidence au droit du site, FONDASOL Environnement recommande :

- **la gestion des zones de pollution concentrée par une entreprise spécialisée afin de remettre en état le site d'étude ;**
- **le suivi environnemental des travaux de dépollution** avec la réalisation de prélèvements de contrôle en cours de travaux, en fond et bords de fouille dans les sols ainsi que des prélèvements de gaz du sol en fond de fouille ;
- **le suivi de la qualité des eaux souterraines** en phase travaux afin de vérifier que les travaux n'influencent pas la qualité de ce milieu ;
- en cas de mise en place d'un drainage des gaz sous dalle :
 - la mise en place d'un drainage des gaz du sol par une entreprise spécialisée ;
 - le suivi des travaux de construction par une entreprise spécialisée ;
 - la réalisation d'un bilan quadriennal sur la mesure constructive mise en place.

En cas de confinement des terres polluées sur site, la mise en place d'une couverture multicouche semi-perméable (perméabilité comprise entre 10⁻⁶ et à 10⁻⁹ m/s) par une entreprise spécialisée.

Le maintien d'anomalies résiduelles dans les sols du site nécessitera de mettre en place des mesures de conservation de la mémoire du site (à travers une restriction d'usage de type SUP).

En cas de changement du projet d'aménagement, ces recommandations seraient à réévaluer.

RESUME TECHNIQUE

Client	LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	
Périmètre d'étude	Désignation usuelle du site	-
	Adresse	Avenue Antoine Bourdelle à Saint-Nazaire
	Parcelles cadastrales	Pas référencé
	Surface approximative	27 900 m²
	Altitude moyenne du site	+4 à +5 m NGF
Contexte de l'étude	Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de construction d'un atelier de préfabrication de bateaux et ferries.	
Synthèse des données acquises dans le cadre de cette étude		
A100 – Visite du site	<p>3 zones ont été identifiées :</p> <ul style="list-style-type: none">La zone du parking sert au stationnement de véhicules légers. Le sol est recouvert d'enrobé. Il n'y a pas de contrainte d'accès particulière hormis l'encombrement du parking.La zone de centre de tri des déchets est exploitée par Les Chantiers de l'Atlantique pour le tri des déchets industriels. Elle se compose d'espaces extérieurs, recouverts d'enrobé (à l'exception de quelques massifs d'arbres), et de 4 bâtiments dont un local de stockage de déchets dangereux en cuves et fûts, en partie sur rétention.La zone GDE située tout au nord du site d'étude est une plateforme bétonnée qui sert au démantèlement et au tri de ferraille et autres déchets métalliques. Les métaux y sont stockés en tas sur la dalle béton, et dans des bennes métalliques. L'accès à cette zone est contraint par l'encombrement au sol.	
A110 Étude historique	Consultation des photographies aériennes	<ul style="list-style-type: none">Jusqu'en 1975 : estuaire de la LoireDe 1975 à 1996 : remblaiement sur l'estuaire avec apport de remblais de qualité médiocre1996 : création du centre de tri des déchets1999-2002 : aménagement d'un parking de véhicules légers2009-2012 : aménagement d'une plateforme de tri au nord du site
	Consultation de Géorisques ¹	<ul style="list-style-type: none">Le site n'est pas référencé dans les bases de données CASIAS, ex-BASOL et SIS.Le site des Chantiers de l'Atlantique est soumis à autorisation et déclaration (arrêté préfectoral du 18/05/1998, modifié par les arrêtés du 17/03/2009 et 26/06/2014) pour diverses activités mais ne concernent pas spécifiquement l'emprise du site de la présente étude.
	Consultation des archives (préfecture, département, commune...)	<ul style="list-style-type: none">Documents consultés dans les locaux de la DREAL le 01/02/2022.D'après les documents consultés le site est concerné uniquement par la gestion des déchets des Chantiers de l'Atlantique et la plateforme de tri de métaux de la société GDE.

¹ bases de données CASIAS, des informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée, des SIS et des installations classées

A120 Étude de vulnérabilité des milieux	Géologie	<ul style="list-style-type: none">Les sols au droit du site sont modérément vulnérables en cas de déversement accidentel depuis les activités recensées, la majorité étant recouverte de dallage ou d'enrobé là où les activités sont exercées.Les sols sont constitués de remblais d'épaisseur variable (perméables) puis d'alluvions (perméables).	Vulnérabilité modérée	Usage non sensible
	Hydrogéologie	<ul style="list-style-type: none">Nappe libre peu profonde (<5 m) mais recouvrement des sols limitant l'infiltration depuis la surface ;Aucun captage n'a été recensé en aval hydrogéologique du site.	Vulnérabilité modérée	Usage non sensible
	Hydrologie	<ul style="list-style-type: none">Estuaire de la Loire en aval hydraulique. Compte tenu de leur volume très important (grand facteur de dilution), les masses d'eaux superficielles sont considérées modérément vulnérables (faible impact du site par rapport au volume de la masse d'eau).Pas d'usage sensible des eaux répertorié dans l'environnement proche du site.	Vulnérabilité modérée	Usage non sensible
	Zones naturelles	<ul style="list-style-type: none">Le site étudié n'est pas inclus dans une zone naturelle remarquable.Toutefois, l'estuaire de la Loire est référencé dans comme zone naturelle protégée.	Vulnérabilité modérée	Usage sensible (par définition)
	A200 Diagnostic des sols	<ul style="list-style-type: none">La campagne d'investigations des sols a été réalisée le 24/02/2022 et le 25/02/2022.15 sondages de sols à la tarière mécanique conduits jusqu'à 1,50 m/TA.		
A260 Diagnostic des terres à excaver	<ul style="list-style-type: none">La lithologie rencontrée est composée, sous une couche d'enrobé, de remblais de nature et granulométrie variable présentant des indices organoleptiques : couleur noire, déchets, ferraille jusqu'à la base des sondages.Aucun niveau d'eau n'a été rencontré en cours des sondages.15 échantillons ont été envoyés en laboratoire pour analyses type pack ISDI étendu (+ COHV, C5-C10, 12 ETM).			
A210 Diagnostic des eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none">Réseau piézométrique de 3 ouvrages.Niveau statique mesuré entre 1,83 et 2,26 m de profondeur en date du 09/03/2022.Sens d'écoulement dirigé vers le sud-ouest.			
A230 Diagnostic des gaz du sol	<ul style="list-style-type: none">Réseau de 4 piézairs répartis au droit des anomalies observées dans les sols lors des campagnes antérieures, au droit du futur bâtiment.Campagne de prélèvement réalisée le 31/01/2022.			
A270 Interprétation des résultats	Sols	<p>Les investigations des sols ont montré :</p> <ul style="list-style-type: none">des anomalies généralisées en métaux lourds, avec notamment de très fortes teneurs en cuivre, plomb et zinc,des anomalies généralisées en hydrocarbures C₁₀-C₄₀, et présence de fractions volatiles (C₅-C₁₆) corrélée à la présence de BTEX,des impacts en HAP et naphtalène dans une majorité de sondages,des impacts en PCB au sud-est du site (autour du sondage ST20 où un impact avait été identifié lors des études antérieures). <p>Les analyses n'ont pas mis en évidence de COHV dans les échantillons.</p>		

A270 Interprétation des résultats	Terres à excaver	<p>Les analyses ont mis en évidence la présence de dépassements de certains critères de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) :</p> <ul style="list-style-type: none">sur brut : COT, BTEX, HAP, HCT et PCB ;sur éluât : antimoine, arsenic, molybdène, fraction soluble, fluorures et sulfates. <p>4 filières de prises en charge des terres ont été retenues :</p> <table><tr><th>Filière :</th><th>Volume estimé</th></tr><tr><td>ISDI</td><td>2 824 m³</td></tr><tr><td>ISDI+</td><td>1 533 m³</td></tr><tr><td>ISDND</td><td>4 645 m³</td></tr><tr><td>ISDD</td><td>208 m³</td></tr></table> <p>Les surcoûts d'évacuation en ISDI+, ISDND et ISDD par rapport à une évacuation en ISDI sont estimées entre 680 et 780 k€ H.T.</p>	Filière :	Volume estimé	ISDI	2 824 m³	ISDI+	1 533 m³	ISDND	4 645 m³	ISDD	208 m³
	Filière :	Volume estimé										
	ISDI	2 824 m³										
	ISDI+	1 533 m³										
	ISDND	4 645 m³										
ISDD	208 m³											
Eaux souterraines	<p>Les résultats d'analyses mettent en évidence :</p> <ul style="list-style-type: none">un impact en BTEX et hydrocarbures volatils C5-C16 au droit du piézomètre PZI situé en aval, ainsi qu'une teneur significative en HAP dont 26 µg/l en naphtalène (composé volatil) ;des concentrations légèrement supérieures aux valeurs de références pour les HAP au droit de PZ2 – la somme de ces composés reste toutefois significativement inférieure à celle identifiée au droit de PZI et n'est donc pas représentative d'un impact ;des anomalies en arsenic au droit de PZ2 et PZ3 situé en latéral et en amont du site d'étude ainsi que des concentrations en zinc plus élevées en amont qu'en aval ;la présence de trace de trichlorométhane au droit de PZ3 situé en amont. <p>Au vu des résultats à l'aval du site, en comparaison avec l'amont, les sols au droit du site semblent dégrader la qualité des eaux souterraines.</p>											
Gaz du sol	<ul style="list-style-type: none">Les analyses effectuées sur les gaz du sol ont mis en évidence l'absence de dépassements des valeurs de référence choisies.La présence de xylènes a été mise en évidence sur l'ensemble des échantillons comme lors de la première campagne de prélèvement.La présence d'hydrocarbures aliphatiques C8-C10 a été mise en évidence au droit de trois échantillons. Ce composé avait été mis en évidence également lors de la première campagne de prélèvement avec une teneur supérieure à la valeur de référence.La présence d'hydrocarbures aliphatiques et d'éthylbenzène a été mise en évidence au droit d'un échantillon, respectivement PA1 et PA3.Les concentrations obtenues lors de cette campagne sont largement inférieures aux concentrations obtenues lors de la première campagne de prélèvement. Compte tenu des conditions météorologiques défavorables, ces résultats restent toutefois pertinents.											
Schéma conceptuel	Synthèse des risques retenus	<ul style="list-style-type: none">Risque d'inhalation de composés volatils.										

Délimitation de la zone impactée	<ul style="list-style-type: none"> Quatre zones de pollution ont été identifiées selon les seuils de coupure de 0,8 mg/kg en naphtalène, 0,8 mg/kg MS en PCB, 8 mg/kg en BTEX et de 60 mg/kg pour les HAP. La superficie des zones à traiter a été estimée à environ 5 500 m² sur une profondeur entre 0,5 et 1,5 m. Le volume total de terres impactées à traiter a été estimé à 5 990 m³.
Mesures de gestion	<ul style="list-style-type: none"> D'après le bilan coûts-avantages, la solution retenue est l'excavation des terres polluées et réception des travaux de terrassements avec des seuils de réception en fond de fouille sous bâtiment et en extérieur définis à : 60 mg/kg en HAP, 0,8 mg/kg en naphtalène, 8 mg/kg en BTEX et 0,8 mg/kg en PCB. Sous le bâtiment, il sera nécessaire de réaliser une réception des travaux de dépollution en gaz du sol avec : <ul style="list-style-type: none"> 261 µg/m³ en benzène, 103 µg/m³ en xylènes, 1 114 µg/m³ en hydrocarbures aliphatiques C8-C10, 297 µg/m³ en aliphatiques C10-C12, 482 µg/m³ en aromatiques C8-C10 et 71 µg/m³ en aromatiques C10-C12. <p>Cette solution a été estimée entre 1 430 et 1 460 k€.</p> <ul style="list-style-type: none"> Une partie des terres impactées (1 200 m³) pourraient être confinées sur site sous recouvrement multicouche semi-perméable (et mise en place d'un grillage avertisseur). Si le confinement ne peut être réalisé au-dessus du niveau de plus hautes eaux, alors il sera nécessaire de mettre en place un recouvrement sous le merlon. En cas de non atteinte des seuils de réception un drainage des gaz sous dalle pourra être mis en place. Cette mesure constructive a été estimée à environ 75 k€.
Restrictions d'usage	<ul style="list-style-type: none"> Compte tenu de la connaissance du site, nous recommandons de mettre en place une restriction d'usage de type SUP. Occupation des sols autorisée : industriel.
Analyse des Risques Résiduels	<ul style="list-style-type: none"> Risque d'inhalation acceptable pour un usage industriel une fois les mesures de gestion mises en œuvre (seuils de réception validés après excavation ou bien mise en place d'un drainage d'air sous dalle). Seuils à respecter : <ul style="list-style-type: none"> dans les sols : 60 mg/kg en HAP, 0,8 mg/kg en naphtalène, 8 mg/kg en BTEX et 0,8 mg/kg en PCB. dans les gaz du sol sous le bâtiment : 261 µg/m³ en benzène, 103 µg/m³ en xylènes, 1 114 µg/m³ en hydrocarbures aliphatiques C8-C10, 297 µg/m³ en aliphatiques C10-C12, 482 µg/m³ en aromatiques C8-C10 et 71 µg/m³ en aromatiques C10-C12.
Recommandations	<p>Compte tenu des impacts mis en évidence au droit du site, FONDASOL Environnement recommande :</p> <ul style="list-style-type: none"> la gestion des zones de pollution concentrée par une entreprise spécialisée afin de remettre en état le site d'étude ; le suivi environnemental des travaux de dépollution avec la réalisation de prélèvements de contrôle en cours de travaux, en fond et bords de fouille dans les sols ainsi que des prélèvements de gaz du sol en fond de fouille ; le suivi de la qualité des eaux souterraines en phase travaux afin de vérifier que les travaux n'influencent pas la qualité de ce milieu ; en cas de mise en place d'un drainage des gaz sous dalle : <ul style="list-style-type: none"> la mise en place d'un drainage des gaz du sol par une entreprise spécialisée ; le suivi des travaux de construction par une entreprise spécialisée ; la réalisation d'un bilan quadriennal sur la mesure constructive mise en place. <p>En cas de confinement des terres polluées sur site, la mise en place d'une couverture multicouche semi-perméable (perméabilité comprise entre 10⁻⁶ et 10⁻⁹ m/s) par une entreprise spécialisée.</p> <p>Le maintien d'anomalies résiduelles dans les sols du site nécessitera de mettre en place des mesures de conservation de la mémoire du site (à travers une restriction d'usage de type SUP).</p> <p>En cas de changement du projet d'aménagement, ces recommandations seraient à réévaluer.</p>

SOMMAIRE

A.	Contexte et objectif de notre mission	18
B.	Présentation du site et du projet	20
B.1.	Description générale du site	20
B.2.	Projet d'aménagement	21
C.	Synthèse des études antérieures	23
D.	Visite de site (A100)	32
D.1.	Déroulement de la visite	32
D.2.	Description de l'état actuel du site	32
D.3.	Description des environs du site	41
D.4.	Constat de danger immédiat et mesures de mise en sécurité	41
E.	Contexte environnemental et étude de vulnérabilité des milieux (A120)	42
E.1.	Sources d'informations	42
E.2.	Milieu « sols »	43
E.3.	Milieu « eaux souterraines »	45
E.4.	Milieu « eaux superficielles »	47
E.5.	Contexte écologique et naturel	49
E.6.	Contexte météorologique	50
E.7.	Registre des émissions polluantes	51
E.8.	Recensement des sites potentiellement pollués autour du site	51
E.9.	Bilan de la vulnérabilité et de la sensibilité des milieux	58
F.	Etude historique et documentaire (A110)	59
F.1.	Sources d'informations	59
F.2.	Evolution du site – consultation des photographies aériennes	60
F.3.	Consultation de la base de données Secteur d'Information sur les Sols (SIS)	64
F.4.	Etude de la fiche CASIAS correspondant à l'adresse du site	64
F.5.	Etude de la fiche d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée présente au droit du site	64
F.6.	Historique des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement	64
F.7.	Consultation des informations transmises par le client	67
F.8.	Accidents ou incidents environnementaux	68
F.9.	Synthèse historique de l'exploitation du site	69
F.10.	Conclusion sur l'étude historique du site	70
G.	Schéma conceptuel initial	72
G.1.	Rappel sur le schéma conceptuel	72
G.2.	Rappel sur le projet d'aménagement	72
G.3.	Source de pollution	72

G.4.	Récepteurs à protéger	72
G.5.	Voies de transfert	72
G.6.	Voies d'exposition	73
H.	Elaboration d'un programme prévisionnel d'investigations et de surveillance des différents milieux (A130)	75
H.1.	Contexte	75
H.2.	Stratégies d'investigations	75
I.	Sécurisation des investigations et déroulement des investigations	77
J.	Investigations sur les sols et les terres à excaver (A200 et A260)	78
J.1.	Stratégie d'investigations sur les sols	78
J.2.	Déroulement de la campagne de sol	80
J.3.	Observations de terrain	80
J.4.	Sélection des échantillons de sols	81
J.5.	Valeurs de référence pour les sols en place	84
J.6.	Valeurs de référence pour la gestion des terres qui seront excavées	84
J.7.	Présentation des résultats des terres qui resteront en place	84
J.8.	Interprétation des résultats des sols en place	87
J.9.	Présentation des résultats des terres qui seront excavées	90
J.10.	Interprétation des résultats des terres qui seront excavées dans le cadre du projet	92
K.	Investigations sur les eaux souterraines (A210)	94
K.1.	Rappel du contexte et objectifs des prélèvements des eaux souterraines	94
K.2.	Pose des ouvrages	94
K.3.	Définition du réseau piézométrique	94
K.4.	Déroulement de la campagne de prélèvements des eaux souterraines	95
K.5.	Programme analytique sur les eaux souterraines	96
K.6.	Valeurs de référence pour les eaux souterraines	96
K.7.	Présentation des résultats des eaux souterraines	97
K.8.	Interprétation des résultats sur les eaux souterraines	99
L.	Investigations sur les gaz du sol (A230)	100
L.1.	Rappel du contexte et objectifs des prélèvements sur les gaz du sol	100
L.2.	Stratégie d'investigations sur les gaz du sol	100
L.3.	Conditions météorologiques	103
L.4.	Programme analytique sur les gaz du sol	103
L.5.	Valeurs de référence pour les gaz du sol	104
L.6.	Présentation des résultats sur les gaz du sol	105
L.7.	Interprétation des résultats sur les gaz du sol	106
M.	Gestion des terres qui seront excavées	107
M.1.	Données disponibles	107

M.2.	Evaluation d'un plan prévisionnel d'évacuation des terres à excaver _____	107
M.3.	Estimation des surcoûts d'évacuation des terres _____	110
N.	Synthèse des résultats _____	113
N.1.	Bilan de l'état des milieux _____	113
N.2.	Schéma conceptuel actualisé _____	114
N.3.	Conclusions et recommandations _____	116
O.	Plan de gestion _____	117
O.1.	Principe et objectifs _____	117
O.2.	Définition des zones de pollution concentrées _____	119
O.3.	Revue des techniques disponibles _____	138
O.4.	Bilan coûts-avantages _____	143
P.	Contrôle de l'efficacité et de la pérennité des mesures de gestion _____	163
P.1.	Mesures proposées pour la gestion du risque en phase travaux _____	163
P.2.	Surveillance environnementale _____	164
P.3.	Mise en œuvre de restrictions d'usages _____	165
Q.	Analyse des enjeux sanitaires (A320) _____	168
Q.1.	Méthodologie - Présentation de la démarche _____	168
Q.2.	Sélection des substances et des concentrations _____	169
Q.3.	Etape 1 : Identification des dangers _____	171
Q.4.	Etape 2 : Estimation de la relation doses-réponses et choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) _____	172
Q.5.	Etape 3 : Estimation des expositions _____	174
Q.6.	Etape 4 : Calculs de risques sanitaires _____	181
Q.7.	Discussions sur les incertitudes et étude de sensibilité _____	184
R.	Conclusion et recommandations _____	189
R.1.	Conclusions _____	189
R.2.	Recommandations _____	190
S.	Limites de la méthode _____	191
S.1.	Etude documentaire _____	191
S.2.	Investigations _____	191
S.3.	Gestion d'une pollution identifiée _____	191
T.	Annexes _____	192

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Conditions générales de service

Annexe 2 : Abréviations

Annexe 3 : Normes et méthodologie

Annexe 4 : Synthèse des données disponibles

Annexe 5 : Compte-rendu de visite de site	
Annexe 6 : Documents recueillis lors des consultations dans les différentes administrations et transmis par le client	
Annexe 7 : Propriétés physico-chimiques des composés recherchés	
Annexe 8 : Méthodes analytiques, limites de quantification et flaconnage	
Annexe 9 : Fiches de prélèvement des sols et des terres à excaver	
Annexe 10 : Bordereaux d'analyses des essais de laboratoire sur les sols et les terres à excaver	
Annexe 11 : Fiches de prélèvement des eaux souterraines	
Annexe 12 : Bordereaux d'analyses des essais en laboratoire sur les eaux souterraines	
Annexe 13 : Fiches de prélèvement des gaz du sol	
Annexe 14 : Bordereaux d'analyses des essais de laboratoire sur les gaz du sol	
Annexe 15 : Matrice de polluants / techniques possibles de dépollution	
Annexe 16 : Sélection des VTR	
Annexe 17 : Paramètres physico-chimiques des substances	
Annexe 18 : Estimation des concentrations dans les différents milieux	
Annexe 19 : Estimation des doses (DJE) et des risques (QD et ERI)	

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Localisation géographique du site d'étude (source : IGN©)	21
Figure 2 : Plan de masse du projet d'aménagement (source : Les Chantiers de l'Atlantique, daté du 23/10/2021)	22
Figure 3 : Plan de coupe du projet d'aménagement (source : Les Chantiers de l'Atlantique, daté du 23/10/2021)	22
Figure 4 : Plan de maillage des filières d'évacuation des terres – de 0 à 0.80 m/TA (source : PR.44EN.21.0084 - 001)	29
Figure 5 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses des sols au droit des crépines des piézairs (source : PR.44EN.21.0084 – 001)	30
Figure 6 : Synthèse cartographique des résultats sur l'air ambiant estimé à partir de l'analyse des gaz du sol (source : PR.44EN.21.0084 – 001)	31
Figure 7 : Plan de localisation des observations faites lors de la visite de site – vue d'ensemble	37
Figure 8 : Plan de localisation des observations faites lors de la visite de site – zoom sur la partie nord	38
Figure 9 : Reportage photographique de la visite de site	41
Figure 10 : Extrait de la carte géologique n°479 de Saint-Nazaire (source : BRGM)	44
Figure 11 : Occupation des sols dans l'environnement du site (source : CORINE Land Cover)	45
Figure 12 : Localisation des captages et points d'eaux souterraines dans un rayon de 800 m autour du site d'étude (source : BRGM)	47
Figure 13 : Localisation des masses d'eau et des captages d'eaux superficielles dans un rayon de 2 km autour du site d'étude (source : BRGM)	48

Figure 14 : Localisation des zones écologiques dans un rayon de 1,5 km autour du site (source : INPN)	50
Figure 15 : Rose des vents de la station de Saint-Nazaire-Montoir Aéroport entre 2000 et 2022 / kts = viterre du vent en nœuds (source : Météo Windfinder)	50
Figure 16 : Localisation des sites CASIAS et disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (dans un rayon de 550 m)	57
Figure 17 : Photographies aériennes (source : IGN©)	63
Figure 18 : Photographie oblique de 1976 montrant des remblais de couleur noire au droit du site d'étude (source : rapport Arcadis n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006)	67
Figure 19 : Carte de synthèse des investigations sur les sols dans la zone d'étude (unité : mg/kg ; source : rapport Arcadis n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006)	68
Figure 20 : Plan de synthèse des sources potentielles de pollution recensées sur site	71
Figure 21 : Localisation des investigations sur les sols et des sources de pollution identifiées lors des études antérieures	79
Figure 22 : Synthèse cartographique des teneurs remarquables en métaux dans les sols en place	88
Figure 23 : Synthèse cartographique des teneurs remarquables dans les sols en place (hydrocarbures et PCB)	89
Figure 24 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses sur les terres qui seront excavées	93
Figure 25 : Plan de localisation des piézomètres et esquisse piézométrique	95
Figure 26 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses sur les eaux souterraines	99
Figure 27 : Localisation des piézairs	102
Figure 28 : Dispositif de prélèvement des gaz du sol (extrait du rapport BRGM RP-65870-FR et INERIS DCR-I6-156181-01401A, 2016)	103
Figure 29 : Plan de maillage des filières d'évacuation des terres – de 0 à 0.80 m/TA pour les futures plateformes et jusqu'à 4,25 m NGF pour le futur bâtiment.	109
Figure 30 : Stratégie des mesures de gestion d'un site et sol pollué (Nathanail et al., 2020)	117
Figure 31 : Schéma de principe du plan de gestion	118
Figure 32 : Délimitation de la zone de pollution concentrée via les constats de terrain	121
Figure 33 : Fréquence cumulée des teneurs en HAP	124
Figure 34 : Répartition des concentrations en HAP	124
Figure 35 : Répartition des concentrations en HAP – entre 0 et 100 mg/kg MS	125
Figure 36 : Fréquence cumulée des teneurs en naphtalène	127
Figure 37 : Répartition des concentrations en naphtalène	128
Figure 38 : Répartition des concentrations en naphtalène – entre 0 et 10 mg/kg MS	128
Figure 39 : Fréquence cumulée des teneurs en BTEX	130
Figure 40 : Répartition des concentrations en BTEX	130
Figure 41 : Fréquence cumulée des teneurs en PCB	132
Figure 42 : Répartition des concentrations en PCB	132
Figure 43 : Délimitation des zones de pollution concentrée via l'analyse statistique	133

Figure 44 : Cartes de pollution établies avec une méthode d'interpolation (krigeage – avec le logiciel surfer)	135
Figure 45 : Délimitation des zones polluées	136
Figure 46 : Famille de techniques de dépollution par lieu de traitement (source : Rapport BRGM RP-57708-FR, juin 2010)	140
Figure 47 : Schéma de principe d'excavation (source : selecdepol.fr)	146
Figure 48 : Couche de sable sous la membrane (Source : EVALSDS, 2018)	154
Figure 49 : Proposition de fixation d'une membrane à un mur (source : BRGM, 2014, d'après CFG, 1991)	155
Figure 50 : Exemple de conception dans le cas d'une dalle portée sur terre-plein (source : EVALSDS, 2018)	155
Figure 51 : Exemple de conception dans le cas d'un dallage indépendant sur terre-plein (source : EVALSDS, 2018)	155
Figure 52 : Schéma de principe d'un point de contrôle	157
Figure 53 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration dans des bâtiments de formes différentes (source : EVALSDS, 2018)	159
Figure 54 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration par drain (source : EVALSDS, 2018)	159
Figure 55 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration en cas de présence de longrines ou de fondations. (source : EVALSDS, 2018)	159
Figure 56 : Principe de l'Analyse des Risques Résiduels	168
Figure 57 : Choix du logiciel de calcul	175
Figure 58 : Schéma de principe du transfert des vapeurs du sol vers l'air intérieur des bâtiments (Source : INERIS)	176
Figure 59 : Schéma de principe du modèle Johnson & Ettinger	176
Figure 60 : Données d'entrée pour l'air intérieur depuis les sols	177
Figure 61 : Données d'entrée pour l'air extérieur depuis les sols	179
Figure 62 : Données d'entrée pour l'air intérieur depuis les eaux souterraines	186
Figure 63 : Données d'entrée pour l'air extérieur depuis les eaux souterraines	187
Figure 64 : Logigramme de sélection des VTR	234

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Prestations réalisées	19
Tableau 2 : Activités et installations potentiellement polluantes identifiées lors de la visite de site	36
Tableau 3 : Captages et points d'eaux souterraines présents dans un rayon de 800 m autour du site (source : ARS, ADES et BRGM)	46
Tableau 4 : Zones naturelles protégées présentes autour du site (dans un rayon de 1,5 km)	49
Tableau 5 : Inventaire des sites à émissions polluantes au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 800 m)	51
Tableau 6 : Inventaire des sites CASIAS recensés au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 550 m)	52

Tableau 7 : Inventaire des sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée recensés au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 550 m)	56
Tableau 8 : Degré de vulnérabilité et de sensibilité des milieux	58
Tableau 9 : Liste des clichés consultés (source : IGN©)	60
Tableau 10 : Liste des activités ICPE recensées sur le site des Chantiers de l'Atlantique par les arrêtés préfectoraux de 1998, 2009 et 2014 disponibles sur Géorisques	64
Tableau 11 : Informations relatives au site recueillies à la DREAL des Pays de la Loire	66
Tableau 12 : Synthèse de l'historique de l'exploitation du site	69
Tableau 13 : Sources potentielles de pollution identifiées au droit du site	70
Tableau 14 : Schéma conceptuel à l'issue de l'étude historique et documentaire	74
Tableau 15 : Définition de la stratégie d'investigations	76
Tableau 16 : Stratégie d'investigations	78
Tableau 17 : Coordonnées des points de prélèvements des sondages	80
Tableau 18 : Synthèse des observations organoleptiques dans les sols	81
Tableau 19 : Synthèse du programme analytique sur les sols	83
Tableau 20 : Résultats analytiques sur les sols en place (1/2)	85
Tableau 21 : Résultats analytiques sur les sols en place (2/2)	85
Tableau 22 : Résultats analytiques sur les terres qui seront excavées	91
Tableau 23 : Coordonnées de points de prélèvements des eaux souterraines	94
Tableau 24 : Mesures piézométriques	95
Tableau 25 : Descriptif du programme analytique sur les eaux souterraines	96
Tableau 26 : Résultats analytiques sur les eaux souterraines	98
Tableau 27 : Stratégie d'investigations sur les gaz du sol	100
Tableau 28 : Description des piézaires	101
Tableau 29 : Conditions météorologiques du 28/01/2022 au 01/02/2022	103
Tableau 30 : Légende utilisée pour la mise en forme des résultats sur les gaz du sol	105
Tableau 31 : Résultats analytiques dans les gaz du sol	106
Tableau 32 : Surcoûts moyens de prise en charge pour les différentes installations	110
Tableau 33 : Estimation des volumes de terres et des surcoûts d'évacuation dans le cadre de la mise en place du bâtiment	111
Tableau 34 : Estimation des volumes de terres et des surcoûts d'évacuation dans le cadre de la mise en place des plateformes	112
Tableau 35 : Synthèse des teneurs dans les différents milieux	113
Tableau 36 : Schéma conceptuel mis à jour à l'issue du diagnostic	115
Tableau 37 : Présentation des différentes méthodes (source : Guide UPDS « Pollution concentrée » - avril 2016)	119
Tableau 38 : Observations organoleptiques	120
Tableau 39 : Analyse statistique des données en métaux	122
Tableau 40 : Analyse statistique des données pour les HC C5-C40, HAP, naphtalène, BTEX et PCB	122

Tableau 41 : Fréquence d'occurrence des concentrations en HAP dans les sols– intervalle de 15 mg/kg _____	123
Tableau 42 : Fréquence d'occurrence des concentrations en naphthalène dans les sols– intervalle de 0,1 mg/kg _____	126
Tableau 43 : Fréquence d'occurrence des concentrations en BTEX dans les sols– intervalle de 1 mg/kg _____	129
Tableau 44 : Fréquence d'occurrence des concentrations en PCB dans les sols– intervalle de 0,2 mg/kg _____	131
Tableau 45 : Délimitation de la zone de pollution concentrée par maille sans prise en compte du projet d'aménagement _____	137
Tableau 46 : Revue des techniques disponibles (norme NFX31-620-4) _____	141
Tableau 47 : Implications juridiques possibles (source : « Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués ») _____	145
Tableau 48 : Estimation des coûts _____	151
Tableau 49 : Estimation des coûts pour l'étape 2 : drainage des gaz sous dalle _____	161
Tableau 50 : Synthèse des solutions de gestion proposées _____	162
Tableau 51 : Surveillance des milieux _____	164
Tableau 52 : Les différents types de servitudes possibles _____	165
Tableau 53 : Restriction d'usages _____	167
Tableau 54 : Substances et teneurs retenues dans l'Analyse des Risques Résiduels pour la voie inhalation depuis les sols (calcul principal) _____	170
Tableau 55 : Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation_	173
Tableau 56 : Paramètres du budget espace-temps _____	174
Tableau 57 : Concentrations calculées dans l'air intérieur _____	178
Tableau 58 : Concentrations calculées dans l'air extérieur _____	180
Tableau 59 : Résultats des calculs de risques sanitaires depuis les seuils de coupure définis dans les sols _____	182
Tableau 60 : Substances et teneurs retenues dans l'Analyse des Risques Résiduels pour la voie inhalation depuis les sols et les gaz du sol (seuils de réception à valider) _____	183
Tableau 61 : Résultats des calculs de risques sanitaires depuis les seuils de dépollution dans les sols et les gaz du sol _____	184
Tableau 62 : Substances et teneurs retenues pour la voie inhalation depuis les eaux souterraines et les gaz du sol (calculs présentés en incertitudes) _____	185
Tableau 63 : Résultats des calculs de sensibilité _____	188
Tableau 64 : Classification en termes de cancérogénicité _____	235
Tableau 65 : Classification en termes de mutagénicité (UE) _____	236
Tableau 66 : Classification en termes d'effets toxiques pour la reproduction (UE) ____	236
Tableau 67 : Sélection des Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation (effet à seuil) _____	238
Tableau 68 : Sélection des Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation (effet sans seuil) _____	239
Tableau 69 : Propriétés physico-chimiques des substances _____	241

A. CONTEXTE ET OBJECTIF DE NOTRE MISSION

Dans le cadre d'un projet de construction d'un atelier de préfabrication, Les Chantiers de l'Atlantique souhaitent réaliser un diagnostic environnemental du milieu souterrain au droit du site localisé sur la commune de Saint-Nazaire (44).

Trois missions d'investigations sur les sols, les terres à excaver et les gaz du sol ont déjà été effectuées sur le site dans le cadre du projet. Ces études ont mis en évidence une pollution des sols par des hydrocarbures. Les analyses des gaz du sol avaient montré la présence de composés volatils (hydrocarbures) à des concentrations supérieures aux valeurs de référence de la qualité de l'air intérieur. Au vu de ces résultats, il avait été jugé qu'il existait un risque potentiel d'exposition des futurs usagers du site via l'inhalation de vapeurs, ainsi qu'un risque de contamination des eaux souterraines.

De fait, il a été préconisé de réaliser un plan de gestion, avec la réalisation préalable d'un diagnostic environnemental complet : visite du site, étude historique, étude de vulnérabilité des milieux et investigations complémentaires sur les différents milieux (sols, eaux souterraines et gaz des sols).

FONDASOL Environnement a donc été missionné pour la réalisation de ces prestations, suite à l'acceptation de notre devis référencé SQ.44EN.21.12.026 en date du 22/12/2021.

Cette étude a pour objectif de :

- retracer, à l'aide des différents ressources à disposition, l'historique des activités exercées sur site et en déduire de potentielles sources de pollution ;
- d'évaluer la vulnérabilité des différents milieux au droit du site vis à vis d'une potentielle pollution en provenance de celui-ci ;
- de dimensionner plus finement la zone de pollution concentrée en hydrocarbures identifiée dans les sols au niveau de l'angle sud-ouest du futur bâtiment et en PCB au sud-est du site, notamment afin d'affiner le plan de maillage (le diagnostic initial estimait un surcoût de l'ordre de 800 à 920 k€) ;
- vérifier la qualité des eaux souterraines pour évaluer les voies de transfert potentielles hors site ;
- réaliser une deuxième campagne de mesure sur les gaz du sol, conformément au guide méthodologique FLUXOBAT ;
- d'étudier les différentes solutions de gestion de la pollution et d'établir un bilan coûts/avantages ;
- vérifier la compatibilité sanitaire entre les futurs usagers et l'état du sol.

Dans ce cadre, notre mission comprend les prestations globales et élémentaires suivantes.

Tableau I : Prestations réalisées

Code	Prestations globales
INFOS	Réalisation des études historiques, documentaires et de vulnérabilité afin d'élaborer un schéma conceptuel et, le cas échéant, un programme prévisionnel d'investigations
DIAG	Mise en œuvre d'un programme d'investigations et interprétation des résultats
PG	Plan de gestion dans le cadre d'un projet de réhabilitation ou d'aménagement d'un site pollué
Code	Prestations élémentaires
A100	Visite du site
A110	Études historiques, documentaires et mémorielles
A120	Etude de vulnérabilité des milieux
A130	Elaboration 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
A230	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les gaz du sol
A260	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les terres excavées ou à excaver
A270	Interprétation des résultats des investigations
A320	Analyse des enjeux sanitaires
A330	Identification des différentes options de gestion possibles et réalisation d'un bilan coûts/avantages

B. PRESENTATION DU SITE ET DU PROJET

B.1. Description générale du site

Le site d'étude est localisé avenue Antoine Bourdelle, au sein du site des Chantiers de l'Atlantique, sur la commune de Saint-Nazaire, dans le département de la Loire Atlantique (44).

La zone d'étude n'est pas référencée sur le cadastre de la ville de Saint-Nazaire, elle représente une superficie d'environ 27 900 m².

D'après la carte IGN, le site est implanté à une altitude comprise entre +4 et +5 m NGF et sa topographie est globalement plane. La partie nord du site est légèrement en contrebas par rapport au reste du site. Elle est séparée de la partie sud par un petit talus.

Le site est exploité par Les Chantiers de l'Atlantique, et il est occupé par des zones de tri des déchets et par des parkings. En l'état actuel, l'intégralité du site possède un recouvrement au sol (enrobé ou dalle béton).

Le site est bordé au sud, au nord, à l'est et à l'ouest par des bâtiments industriels, des voiries et des zones de stockage (port maritime de Saint-Nazaire).

La localisation géographique du site est présentée en Figure I.

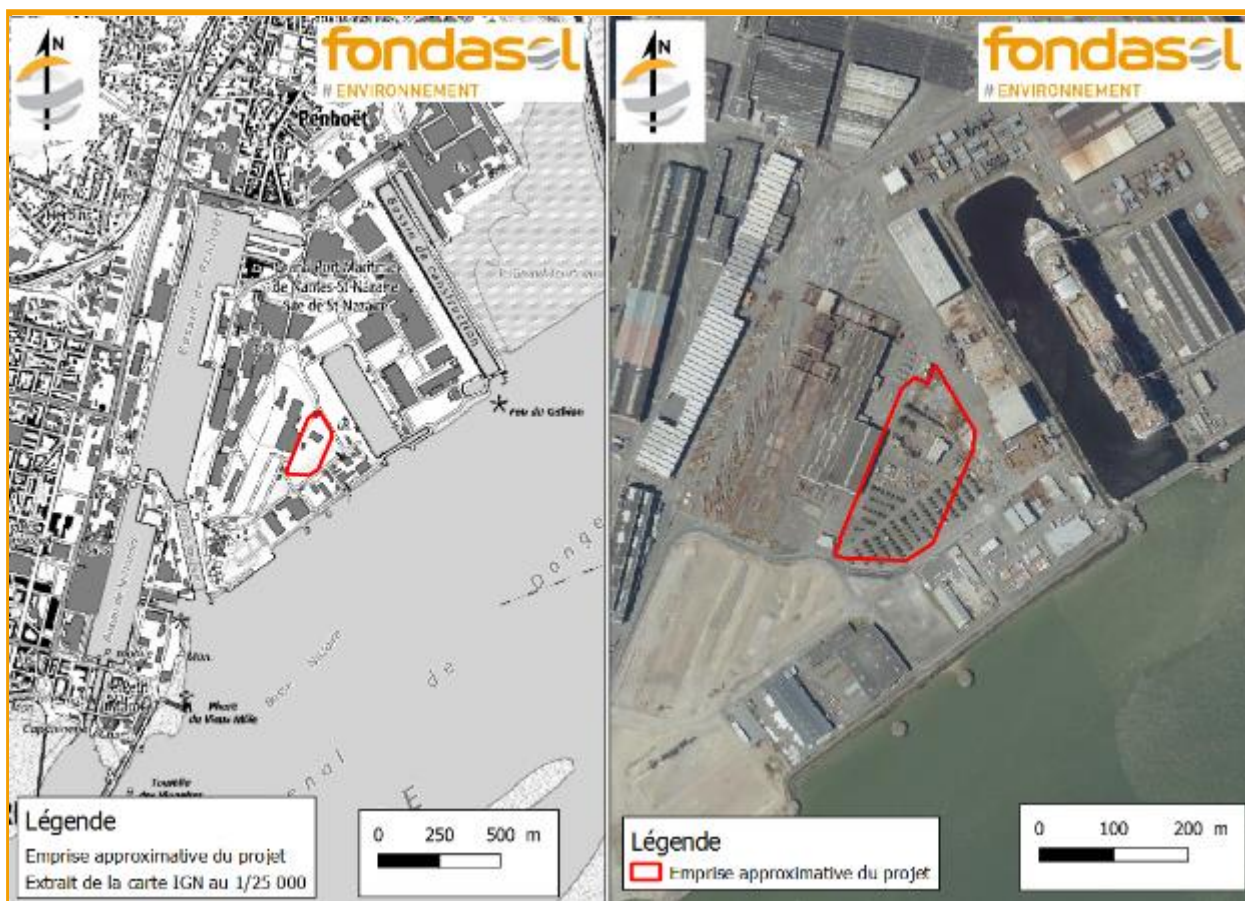


Figure 1: Localisation géographique du site d'étude (source : IGN©)

B.2. Projet d'aménagement

Le projet d'aménagement consiste en :

- la construction d'un atelier de préfabrication de bateaux et ferries d'une superficie d'environ 12 000 m². Le niveau fini du bâtiment sera calé à la cote de 4,77 m NGF et la cote de terrassement est estimée à 4,25 m NGF ;
- sur le reste du site, l'aménagement de plateformes en enrobé.

Il n'y a pas de niveau de sous-sol prévu au projet.

Le plan de masse du projet d'aménagement est présenté en Figure 2 et un plan de coupe en Figure 3.

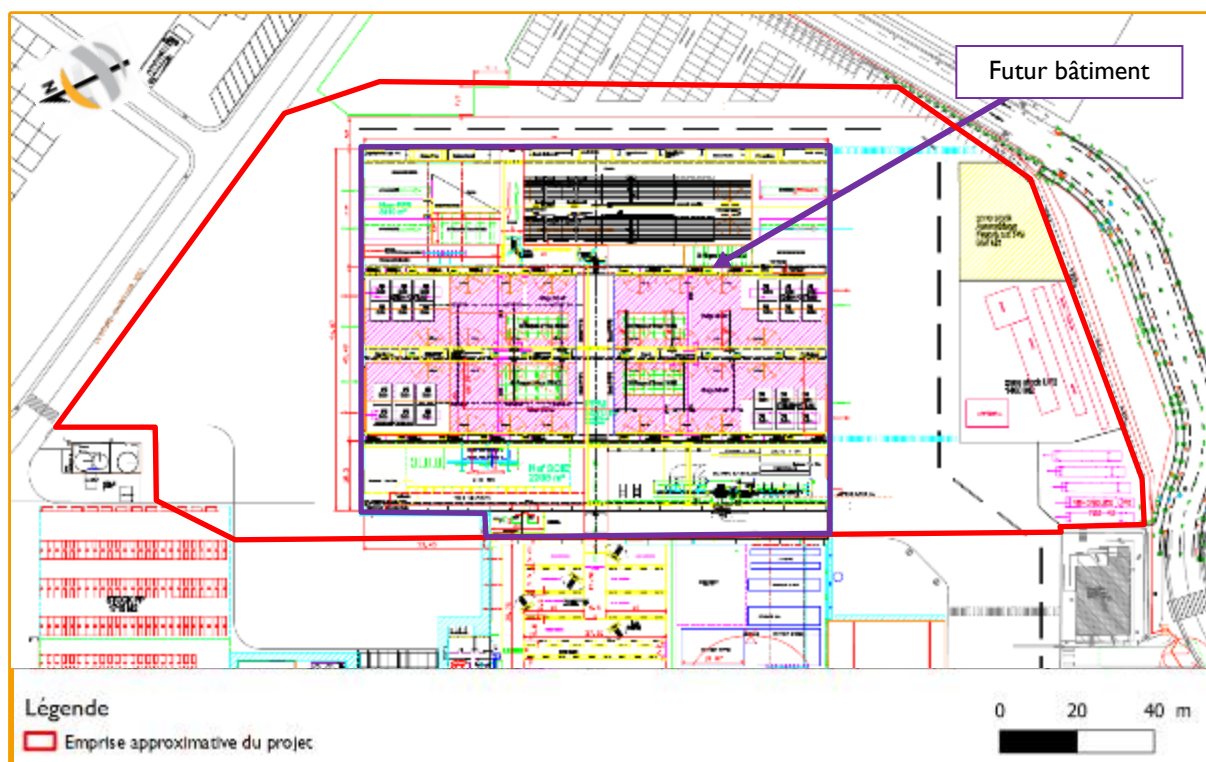


Figure 2 : Plan de masse du projet d'aménagement (source : Les Chantiers de l'Atlantique, daté du 23/10/2021)

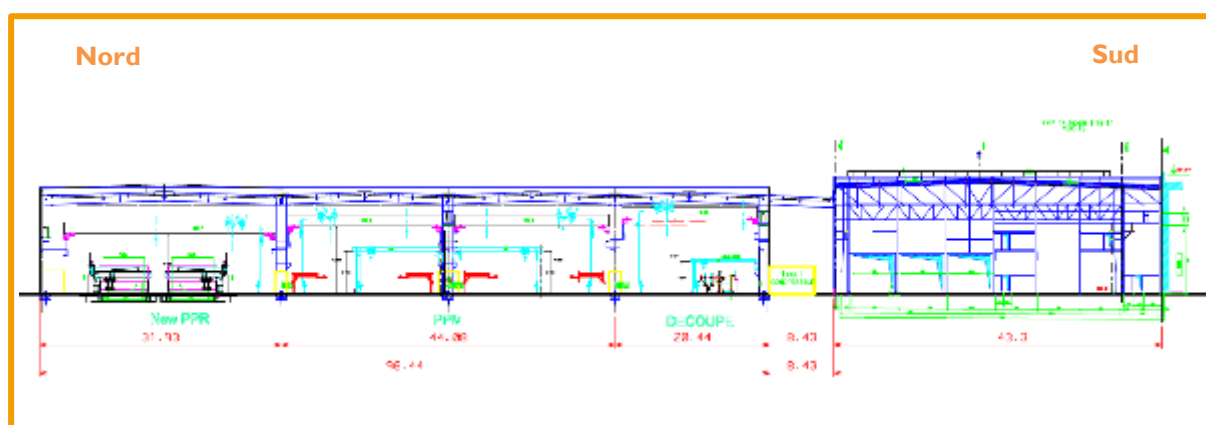


Figure 3 : Plan de coupe du projet d'aménagement (source : Les Chantiers de l'Atlantique, daté du 23/10/2021)

C. SYNTHÈSE DES ÉTUDES ANTERIEURES

Ce chapitre présente les résultats des études antérieures réalisées par FONDASOL Environnement. Des études antérieures ont également été réalisées au droit du site par DEKRA et ARCADIS. Cependant, seuls les extraits transmis par le client ont pu être consultés. Les informations issues de ces études antérieures sont présentées dans le paragraphe F.7.

Synthèse du rapport référencé PR.44GT.20.0069-44EN-002 du 24/04/2020.

Client	STX	
Périmètre d'étude	Désignation usuelle du site	Futur atelier de préfabrication
	Adresse	avenue Antoine Bourdelle à Saint-Nazaire (44)
	Parcelles cadastrales	Non précisé
	Surface approximative	5 000 m ²
	Altitude moyenne du site	+ 4-5 m NGF
Contexte de l'étude	Cette étude est réalisée dans le cadre du projet de construction d'un atelier de préfabrication de bateaux et ferries.	
A260 Diagnostic des terres à excaver	<p>La campagne d'investigations des sols a été réalisée le 7 avril 2020.</p> <ul style="list-style-type: none"> 10 sondages ont été réalisés jusqu'à une profondeur maximale de 1.50 m Les coupes ont montré la présence de remblais avec la présence de déchets au droit des sondages SD1 à SD7 ; Les 10 échantillons prélevés ont été envoyés au laboratoire AGROLAB pour analyse 	
A270 Interprétation des résultats	Terres à excaver	<p>Les analyses ont mis en évidence la présence de dépassements de certains critères de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) :</p> <ul style="list-style-type: none"> Sur brut : HAP, BTEX, HC C10-C40, Sur éluat : antimoine, fluorures et molybdène. <p>Les futurs déblais issus du site d'étude devront être envoyés vers des filières d'élimination adaptée.</p>

Synthèse du rapport référencé PR.44GT.20.0069-44EN-003 du 19/04/2021.

Client	LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE		
Périmètre d'étude	Désignation usuelle du site	-	
	Adresse	Avenue Antoine Bourdelle à Saint-Nazaire	
	Parcelles cadastrales	Non précisé	
	Surface approximative	12 000 m²	
	Altitude moyenne du site	+4 à +5 m NGF	
Contexte de l'étude	Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de construction d'un atelier de préfabrication.		
Synthèse des données acquises dans le cadre de l'étude			
A260 Diagnostic des terres à excaver	<p>Les investigations sur les terres à excaver ont été réalisées les 02/04/2021 et 06/04/2021 :</p> <ul style="list-style-type: none">15 sondages de sol (ST1 à ST15) à la tarière mécanique jusqu'à 1,50 m/TA ;Les sondages ont mis en évidence la présence de remblais (jusqu'à 1,5 m de profondeur au maximum), suivis localement de sables marron au droit de ST10 à ST15 ou d'argiles grises au droit de ST1 et ST3 ;La présence de déchets (ferraille, plastique) a été observée dans les horizons de remblais des sondages ST5, ST7 et ST8 et une odeur d'essence a été constatée dans l'échantillon ST6/I ;15 échantillons ont été envoyés au laboratoire AGROLAB pour analyses.		
A270 Interprétation des résultats	Terres à excaver	<p>Les analyses ont mis en évidence la présence de dépassements de certains critères de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) :</p> <ul style="list-style-type: none">Sur brut : HAP, BTEX, hydrocarbures totaux C10-C40, PCB ;Sur éluat : antimoine, molybdène, fluorures et indice phénol. <p>Les futurs déblais issus du site d'étude devront être envoyés vers des filières d'élimination adaptées. 4 filières de prises en charge des terres ont été retenues :</p>	
		Filière :	Surface estimée (m²)
		ISDI	4 610
		ISDI+	1 196
		ISDND	5 563
		ISDD	324

<p>Conclusions et recommandations</p>	<p>Les analyses réalisées sur les sols ont mis en évidence la présence :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de composés volatils au droit du futur atelier de préfabrication, • d'une pollution concentrée en HAP et hydrocarbures C₁₀-C₄₀ au droit du sondage ST6. <p>Dès lors, il conviendrait d'une part, au minimum, de vérifier la qualité des gaz des sols afin de vérifier que les polluants pouvant se volatiliser vers le futur atelier sont compatibles d'un point de vue sanitaire avec l'usage prévu.</p> <p>D'autre part, FONDASOL Environnement recommande le dimensionnement de la zone de pollution concentrée identifiée au droit du sondage ST6 et le retrait de cette pollution. En cas de non retrait, FONDASOL Environnement préconise la mise en œuvre d'un plan de gestion afin d'identifier et maîtriser les risques liés à cette pollution.</p>
---------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Synthèse du rapport référencé PR.44EN.21.0084-001 du 17/11/2021.

Client	LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	
Périmètre d'étude	Désignation usuelle du site	-
	Adresse	Avenue Antoine Bourdelle à Saint-Nazaire
	Parcelles cadastrales	Non défini
	Surface approximative	27 900 m²
	Altitude moyenne du site	+4 à +5 m NGF
Contexte de l'étude	Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de construction d'un atelier de préfabrication.	
Synthèse des données acquises dans le cadre de l'étude		
A200 Diagnostic des sols	<p>La campagne d'investigations des sols a été réalisée du 18/10/2021 au 20/10/2021.</p> <ul style="list-style-type: none">12 sondages à la tarière mécanique (ST16 à ST27), poursuivis jusqu'à 1.00 m/TA au maximum pour la détermination des filières d'évacuation des déblais de terrassement.4 sondages à la tarière mécanique, poursuivis jusqu'à 1.30 m/TA, pour la pose de piézairs (PA1 à PA4).La lithologie rencontrée est composée de matériaux de recouvrements (enrobé ou dalle béton, sur couche de forme) d'une épaisseur moyenne de 25 cm, suivis par des remblais limono-sableux ou sablo-graveleux jusqu'à la base des sondages.Des indices organoleptiques de la présence de polluants ont été mis en évidence dans les remblais dans la plupart des sondages : déchets (ferraille, gravats, plastique, ...) et localement des odeurs d'hydrocarbures.Aucun niveau d'eau n'a été rencontré en cours de sondage.	
A260 Diagnostic des terres à excaver		
A230 Diagnostic des gaz du sol	<p>Pose d'un réseau de piézairs de 4 ouvrages, répartis au droit de la zone de pollution concentrée identifiée lors des missions antérieures (autour de ST6).</p> <p>Une campagne de prélèvement des gaz des sols a été réalisée le 27/10/2021.</p> <p>Le programme d'analyse a été établi en fonction des composés identifiés dans les sols lors des campagnes antérieures d'investigations sur les sols : TPH, BTEXN.</p>	
A270 Interprétation des résultats	Sols	<p>Les investigations menées sur les sols dans le cadre de la mise en place des piézairs mettent en évidence la présence de contaminations au droit des sondages PA1, PA2 et PA4 avec la présence :</p> <ul style="list-style-type: none">d'impacts en hydrocarbures C10-C40 ;d'hydrocarbures volatils, de HAP (dont du naphthalène) et de BTEX.

	Terres à excaver	Les analyses ont mis en évidence la présence de dépassements de certains critères de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) :										
		<ul style="list-style-type: none">sur brut : hydrocarbures totaux, PCB ;sur éluat : antimoine, cuivre, fraction soluble, fluorures, sulfates.										
		Au vu des résultats d'analyses, 4 filières de prises en charge des terres ont été retenues. En considérant une profondeur de terrassement de 0.80 m/TA au droit des futures plateformes, et jusqu'à la cote de 4,25 m NGF au droit du futur bâtiment, les volumes de terres estimés par filières sont les suivants :										
		<table><tr><td>Filière :</td><td>Volume estimé (m³)</td></tr><tr><td>ISDI</td><td>3 581</td></tr><tr><td>ISDI+</td><td>125</td></tr><tr><td>ISDND</td><td>5 088</td></tr><tr><td>ISDD</td><td>1 089</td></tr></table>	Filière :	Volume estimé (m³)	ISDI	3 581	ISDI+	125	ISDND	5 088	ISDD	1 089
		Filière :	Volume estimé (m³)									
		ISDI	3 581									
ISDI+	125											
ISDND	5 088											
ISDD	1 089											
Les surcoûts d'évacuation en ISDI+, en ISDND et ISDD par rapport à une évacuation en ISDI sont estimées entre 800 et 920 k€ H.T.												
Un plan de maillage des filières d'évacuation a été établi.												
	Gaz du sol	<p>Les analyses sur les gaz du sol ont montré des impacts en hydrocarbures C8-C10 (aromatiques et aliphatiques) et en benzène au droit de plusieurs des piézairs, avec des concentrations qui dépassent les bornes R1, R2 et R3 de qualité de l'air intérieur.</p> <p>Après application d'un facteur d'atténuation pour l'estimation des teneurs dans l'air ambiant à partir de teneurs dans les gaz du sol, la concentration estimée en benzène dans l'air ambiant du futur bâtiment dépasse les bornes R1 et R2 de qualité de l'air intérieur au droit des piézairs PA2 et PA1 respectivement, situés dans l'emprise ou à proximité immédiate du futur bâtiment.</p>										
Schéma conceptuel	Synthèse des risques retenus	<p>Au vu de la présence de benzène dans les gaz du sol à des concentrations supérieures aux valeurs de comparaison, les risques retenus pour les cibles potentielles sur site sont l'inhalation de polluants sous forme gazeuse.</p> <p>Etant donné le recouvrement de l'intégralité du site par un enrobé ou un dallage (à l'état actuel comme dans le projet futur), aucune autre voie d'exposition sur site n'est retenue.</p> <p>Les risques d'exposition potentiels en dehors du site sont les suivants : inhalation de polluant sous forme gazeuse (via transfert par les eaux souterraines), ingestion d'eau contaminée et ingestion de poisson (pêche).</p>										

Recommandations	<p>Etant donné les fortes contaminations en hydrocarbures observées dans les sols, FONDASOL Environnement préconise la mise en œuvre de mesures de protections collectives ou d'équipements de protection individuelle afin d'empêcher le contact direct avec les sols et l'ingestion de poussières lors des travaux d'excavation.</p> <p>Compte tenu des résultats des investigations (pollution concentrée en hydrocarbures dans les remblais, impact en benzène dans les gaz du sol), FONDASOL Environnement recommande la réalisation d'un plan de gestion, intégrant notamment une visite du site au sens de la norme, une étude historique, une étude de vulnérabilité des milieux, et des investigations complémentaires sur les différents milieux (sols, gaz, eaux souterraines).</p>
-----------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Les Figure 4 et Figure 6 présentent les résultats obtenus lors des études antérieures.

L'ensemble des résultats d'analyses des études antérieures sont présentées en Annexe 4.

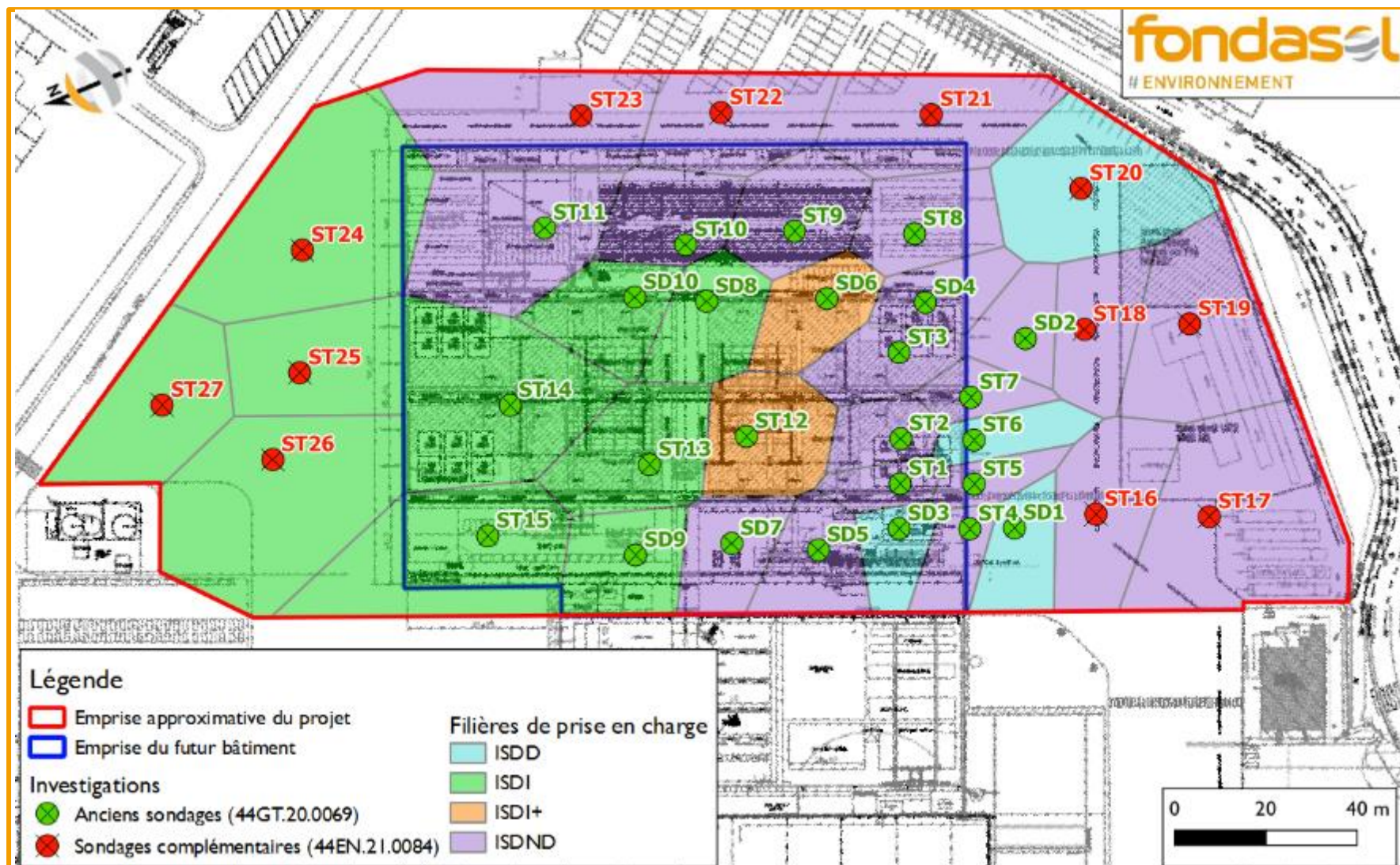


Figure 4 : Plan de maillage des filières d'évacuation des terres – de 0 à 0.80 m/TA (source : PR.44EN.21.0084 - 001)

Nota : les matériaux de recouvrement (revêtement et couche de forme) ne sont pas pris en compte dans ce plan de maillage.

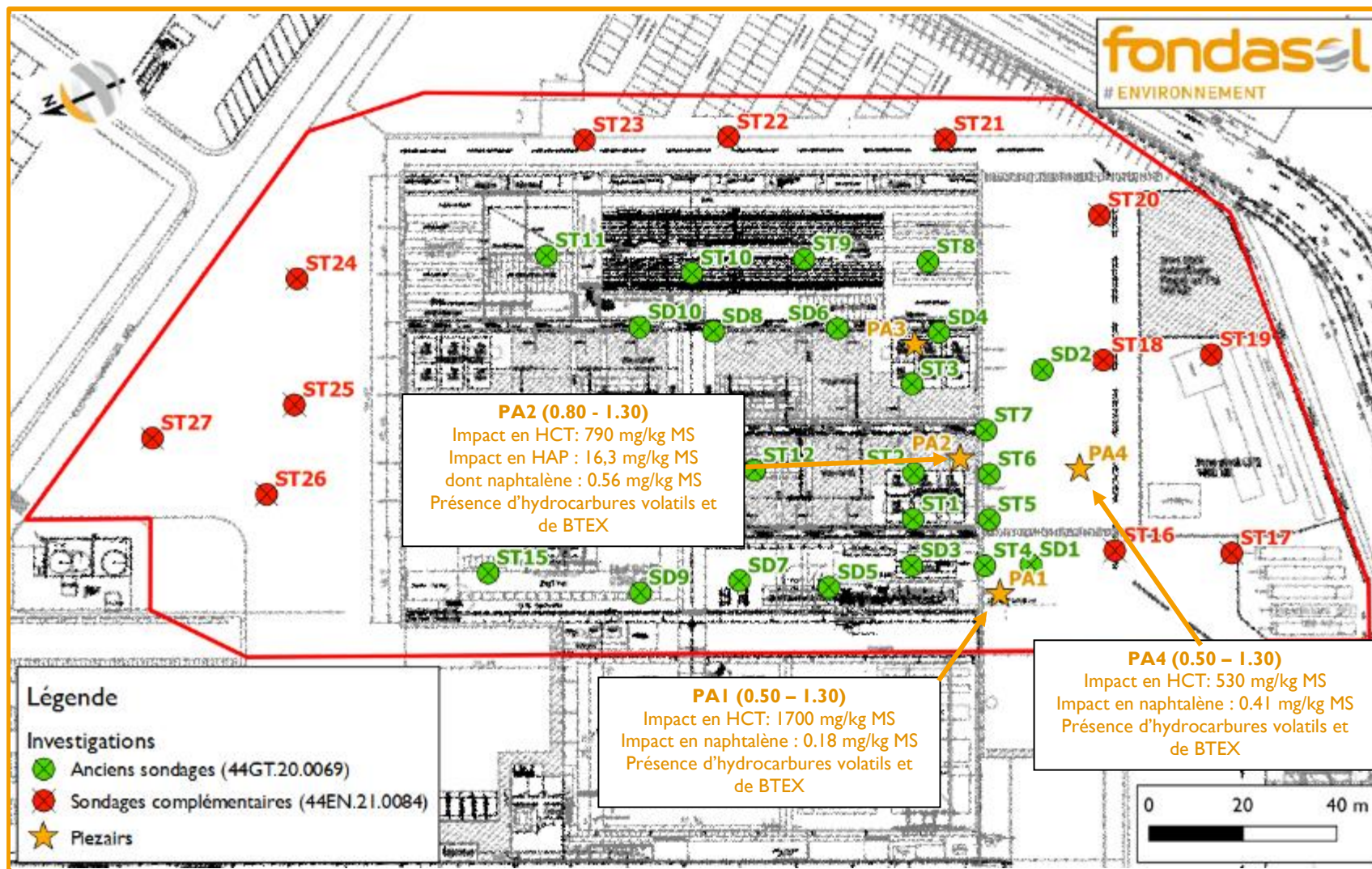


Figure 5 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses des sols au droit des crépines des piezairs (source : PR.44EN.21.0084 – 001)

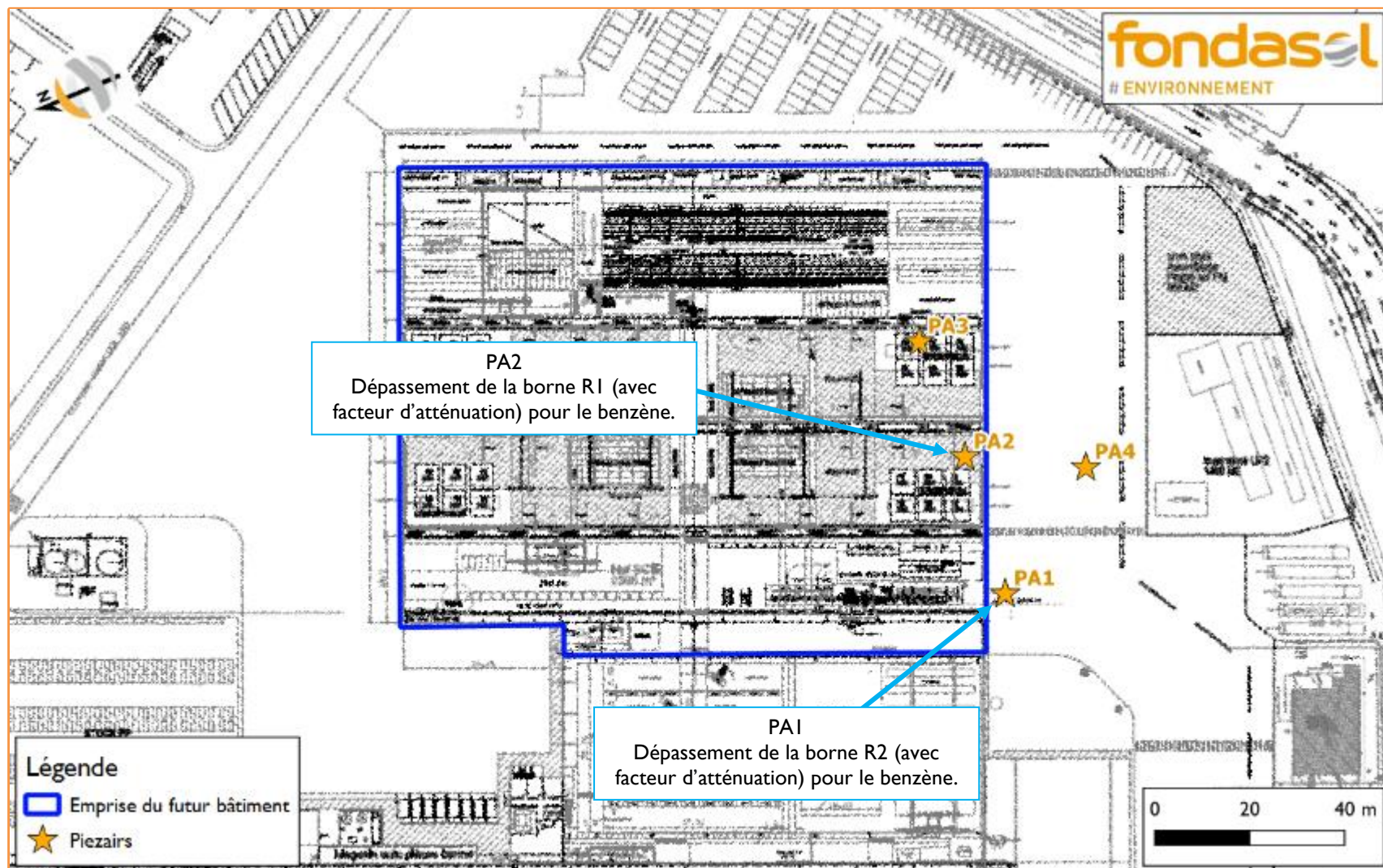


Figure 6 : Synthèse cartographique des résultats sur l'air ambiant estimé à partir de l'analyse des gaz du sol (source : PR.44EN.21.0084 – 001)

D. VISITE DE SITE (A100)

La visite du site permet de procéder à une analyse préliminaire des enjeux liés à la présence des polluants (état des lieux), de mettre en place les premiers éléments du schéma conceptuel, de décider des actions d'urgence qui pourraient s'avérer nécessaires au niveau des sources, des transferts ou des usages pour réduire les risques immédiats et organiser les actions ultérieures.

D.1. Déroulement de la visite

Une visite de site a été effectuée le 25/02/2022 par Nicolas CHEVALIER (technicien). L'environnement du site a également été visité dans un rayon de 50 m.

D.2. Description de l'état actuel du site

Le compte-rendu et le reportage photographique de la visite de site sont présentés respectivement en Annexe 5 et en

Photographie n°9 : centre de tri : fûts de déchets dangereux (peinture) sur palette et local de stockage (absence de rétention)	Photographie n°10 : centre de tri : fûts et cuves de stockage de déchets sur bac de rétention
	
Photographie n°11 : centre de tri : stockage de fûts et cuves de déchets	Photographie n°12 : centre de tri : intérieur du local de stockage de déchets dangereux (absence de rétention)
	
Photographie n°13 : centre de tri : en premier plan : pont-basculateur et bâtiment B (préfabriqué)	Photographie n°14 : zone GDE





Figure 9.

Le site d'étude est divisé en 3 zones principales : un parking de véhicules légers (au sud et à l'est), un centre de tri des déchets (au centre nord), et une plateforme de tri de ferraille et métaux exploitée par la société GDE (à l'extrême nord).

Zone : parking

La zone du parking sert au stationnement de véhicules légers. Le sol est recouvert d'enrobé (en mauvais état). Il n'y a pas de contrainte d'accès particulière hormis l'encombrement du parking.

Zone : centre de tri des déchets

Cette zone est exploitée par Les Chantiers de l'Atlantique pour le tri des déchets industriels. Elle se compose d'espaces extérieurs, recouverts d'enrobé (à l'exception de quelques massifs d'arbres), et de 4 bâtiments. L'accessibilité de cette zone est contrainte par la présence du bâti et par l'encombrement au sol (stockages).

Le plus grand bâtiment (n°A sur la Figure 7 et la Figure 8) n'a pas pu être visité car il était fermé lors de la visite. Les bâtiments B et C sont des préfabriqués qui servent de bureaux et vestiaires. Le bâtiment D est un local de stockage de déchets dangereux en cuves et fûts : peintures, huiles usagées, eaux usées, solvants. Ces fûts et cuves sont en partie stockés sur bacs de rétention. Le sol du local est recouvert par une dalle béton en bon état. Dans la zone extérieure autour de ce local, d'autres fûts et cuves sont stockés, en partie sur bacs de rétention.

Les espaces extérieurs servent également au stockage de divers déchets dans des bennes métalliques : plastiques, cartons, bois, palettes, déchets souillés... Le sol est couvert d'un enrobé en état moyen.

Un pont-bascule est présent dans la zone pour la pesée des véhicules entrants et sortants.

Zone GDE

La zone située tout au nord du site d'étude est une plateforme bétonnée qui sert au démantèlement et au tri de ferraille et autres déchets métalliques. Les métaux y sont stockés en tas sur la dalle béton, et dans des bennes métalliques. L'accès à cette zone est contraint par l'encombrement au sol.

Les informations recueillies sont synthétisées dans le Tableau 2 et sur la Figure 7 et la Figure 8.

Tableau 2 : Activités et installations potentiellement polluantes identifiées lors de la visite de site

Zone d'étude	Bâtiment / Installation	N° sur la Figure 7	N° de photos (Figure 9)	Caractéristique	Présence d'une couverture – Type de couverture et état	Typologie de pollution suspectée	Milieux potentiellement impactés
Centre de tri des déchets	Hangar	A	5 et 6	Non visité (bâtiment fermé lors de la visite)	Dalle béton	?	?
	Algeco de bureaux et vestiaires	B et C	3 et 4	Bureaux et vestiaires - chauffage électrique	-	-	-
	Local de stockage de déchets dangereux	D	12	Stockage de déchets dangereux sous forme liquide en fûts et cuves (peintures, huiles usagées, eaux usées, solvants), partiellement sur bacs de rétention	Dalle béton – état bon	Hydrocarbures, solvants, métaux	Sols et indirectement eaux souterraines
	Stockage de déchets dangereux	-	9, 10 et 11		Enrobé – état moyen		
	Bennes de stockages	-	7 et 8	Stockage de déchets divers en bennes : plastiques, cartons, bois, déchets souillés, ...	Enrobé – état moyen (déchets stockés dans des bennes métallique en bon état)	-	-
	Pont-basculé	-	13	Pesée des véhicules entrants/sortants	Dalle béton	-	-
Plateforme GDE	-	-	14 à 18	Plateforme de tri des métaux et ferraille	Dalle béton – état moyen	Métaux	Sols et indirectement eaux souterraines
Parking	-	-	1 et 2	Stationnement de véhicules légers	Enrobé – état moyen	-	-

En orange : les installations potentiellement polluantes.

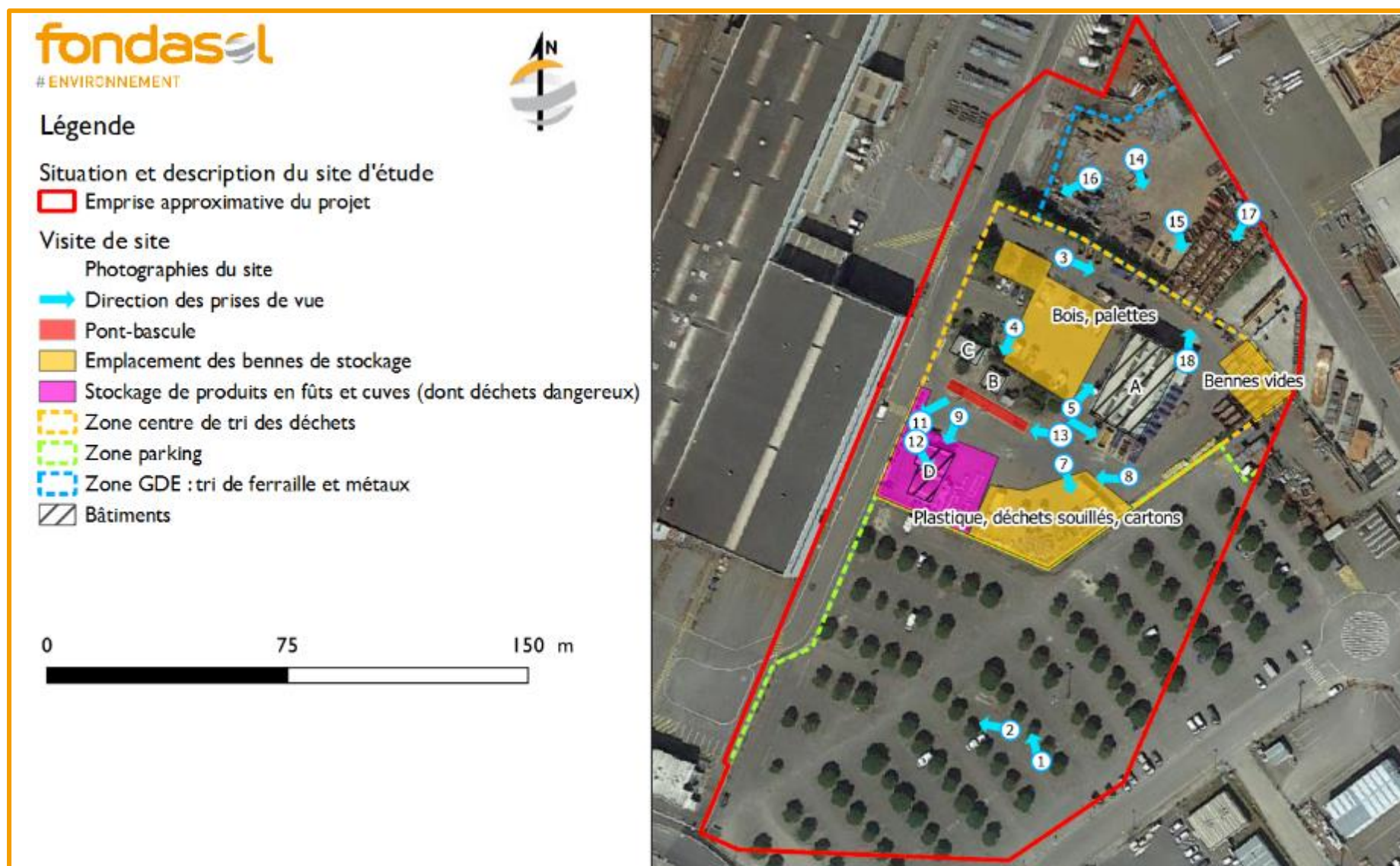


Figure 7 : Plan de localisation des observations faites lors de la visite de site – vue d'ensemble

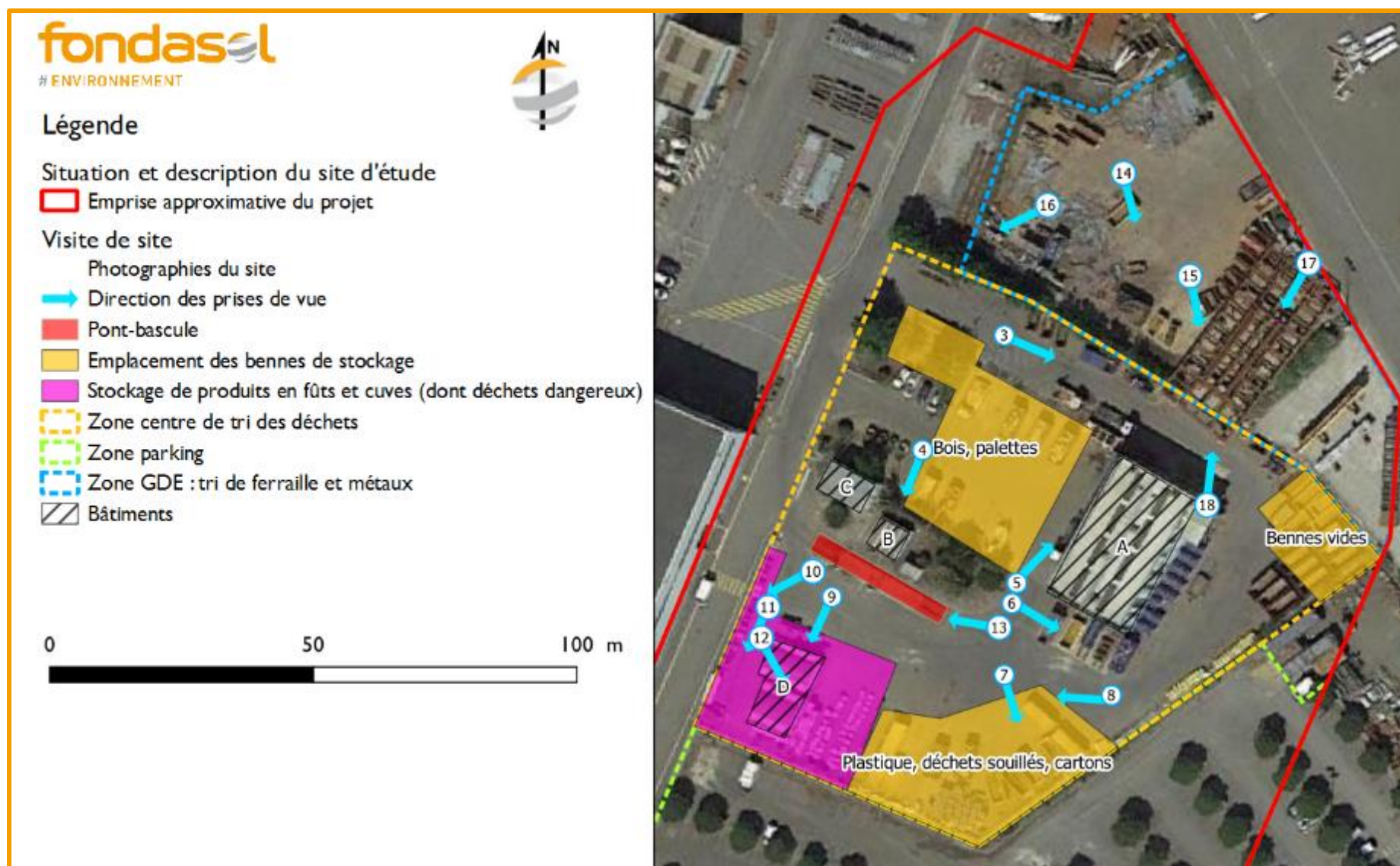


Figure 8 : Plan de localisation des observations faites lors de la visite de site – zoom sur la partie nord

<p>Photographie n°1 : parking</p> 	<p>Photographie n°2 : parking</p> 
<p>Photographie n°3 : centre de tri</p> 	<p>Photographie n°4 : centre de tri</p> 
<p>Photographie n°5 : centre de tri : bâtiment A</p> 	<p>Photographie n°6 : centre de tri : bâtiment A</p> 
<p>Photographie n°7 : centre de tri : bennes de stockage dont déchets souillés</p> 	<p>Photographie n°8 : centre de tri : bennes de stockage en premier plan et fûts en arrière-plan</p> 


<p>Photographie n°9 : centre de tri : fûts de déchets dangereux (peinture) sur palette et local de stockage (absence de rétention)</p>	<p>Photographie n°10 : centre de tri : fûts et cuves de stockage de déchets sur bac de rétention</p>
	
<p>Photographie n°11 : centre de tri : stockage de fûts et cuves de déchets</p>	<p>Photographie n°12 : centre de tri : intérieur du local de stockage de déchets dangereux (absence de rétention)</p>
	
<p>Photographie n°13 : centre de tri : en premier plan : pont-bascule et bâtiment B (préfabriqué)</p>	<p>Photographie n°14 : zone GDE</p>
	



Figure 9 : Reportage photographique de la visite de site

D.3. Description des environs du site

Le site est bordé au sud, au nord, à l'est et à l'ouest par des bâtiments industriels, des voiries et des zones de stockage (port maritime de Saint-Nazaire).

On note également la présence de l'estuaire de la Loire à environ 200 m au sud-est du site.

D.4. Constat de danger immédiat et mesures de mise en sécurité

FONDASOL Environnement n'a pas fait de constat de danger immédiat.

En revanche, il conviendrait de stocker la totalité des fûts et cuves de produits dangereux sur des bacs de rétention.

E. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ETUDE DE VULNERABILITE DES MILIEUX (A120)

L'étude de vulnérabilité des milieux consiste à décrire le contexte environnemental du site d'étude pour identifier les possibilités de transfert des pollutions et les usages réels des milieux concernés.

E.1. Sources d'informations

Cette synthèse du contexte environnemental du site s'appuie sur la consultation :

- de la carte IGN© ;
- de la carte géologique n°479 de Saint-Nazaire du BRGM ;
- de la base de données BSS du BRGM consultable sur Infoterre ;
- des études antérieures réalisées sur le site par FONDASOL : rapport PR.44GT.20.0069-001 du 30/04/2020, rapport PR.44GT.20.0069-44EN-002 du 24/04/2020, rapport PR.44GT.20.0069-44EN-003 du 19/04/2021, et rapport PR.44EN.21.0084-001 du 17/11/2021 ;
- de la base de données géographiques CORINE Land Cover de 2012 de l'Institut Français de l'Environnement ;
- de la base de données Géorisques pour
 - les sites CASIAS (ex BASIAS) ;
 - les sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (ex BASOL) ;
 - les sites disposant d'obligations réglementaires liées aux parcelles cadastrales : Secteurs d'Information sur les Sols (SIS) ;
 - le registre d'émissions polluantes,
- du système d'information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES) ;
- de la base de données de l'ADES ;
- de l'Agence Régionale de la Santé des Pays de la Loire ;
- de la base de données des sites de baignades du Ministère de la Santé,
- des zones de pêche référencées par la Fédération Départementale de pêche de Loire-Atlantique ;
- de la rose des vents pour la station de Saint-Nazaire-Montoir Aéroport entre 2000 et 2022 issue du site Windfinder ;
- de la base de données Infoclimat consultable sur internet (moyennes des données climatologiques relevées à Saint-Nazaire - Montoir entre 1981 et 2010) ;
- des données diffusées par l'INPN.

E.2. Milieu « sols »

E.2.1. Contexte géologique

D'après la carte géologique n°479 de Saint-Nazaire au 1/50 000 établie par le BRGM, et des informations issues des études géotechniques et environnementales réalisées par FONDASOL au droit du site (références rappelées au paragraphe E.1), la lithologie supposée au niveau du site, de la surface vers la profondeur, est la suivante :

- un recouvrement superficiel (enrobé ou dalle béton, sur couche de forme) sur une épaisseur moyenne de 25 cm ;
- des remblais anciens de granulométrie variable (à tendance limono-sableuse ou sablo-graveleuse) jusqu'à 3 à 4 m/TA ;
- les alluvions argilo-sableuses de la Loire, composées :
 - d'argiles sableuses à graveleuses molles grises jusqu'à 5 à 9,5 m/TA, et/ou :
 - de sables argileux marron à gris foncé jusqu'à 5 à 11,5 m/TA ;
- un substratum de gneiss marron à gris au-delà, altéré voire décomposé en tête, compact en profondeur.

La Figure 10 positionne le site d'étude dans son contexte géologique local.



Figure 10 : Extrait de la carte géologique n°479 de Saint-Nazaire (source : BRGM)

E.2.2. Occupation des sols

La base de données CORINE Land Cover permet de dresser un bilan de l'occupation des sols à proximité du site. L'occupation des sols dans le secteur du site est présentée en Figure 11.



Figure 11 : Occupation des sols dans l'environnement du site (source : CORINE Land Cover)

Les sites industriels dans l'environnement du site sont décrits dans le paragraphe E.8.

Sur la base de ces informations, les usages recensés dans l'environnement immédiat du site sont de type industriel et portuaire. Les usages sont donc considérés comme faiblement sensibles.

E.2.3. Synthèse de la sensibilité et vulnérabilité des sols

Sur la base de ces informations, les sols sont considérés modérément vulnérables en cas de pollution provenant de la surface (recouvrement des sols sur l'ensemble du site). Les usages des sols sont considérés comme faiblement sensibles.

E.3. Milieu « eaux souterraines »

E.3.1. Contexte hydrogéologique

D'après les masses d'eaux de l'ADES et des données disponibles sur les sites du SIGES, la principale nappe d'eaux souterraines rencontrées au droit du site est la nappe du bassin versant de l'estuaire de la Loire (réf. de la masse d'eau : FRGG022).

E.3.2. Description de la nappe du bassin versant de l'estuaire de la Loire

Compte tenu de la géologie du secteur, la nappe du bassin versant de l'estuaire de la Loire est vraisemblablement contenue, au niveau du site d'étude, dans les alluvions argilo-sableuses de la Loire et dans la partie altérée du substratum de gneiss sous-jacent. La nappe est a priori à écoulement libre dans le secteur. Etant donné la proximité du site avec l'estuaire de la Loire (200 m), l'influence des marées sur le niveau de la nappe est probable.

D'après les données piézométriques disponibles dans la Banque de Données du Sous-Sol, le niveau de nappe a été mesuré entre 5,59 et 5,90 m NGF dans le secteur d'étude fin

novembre/début décembre 1997 (voir Tableau 3). Sur la base de ces données, et compte-tenu de l'altimétrie du site et de la proximité avec l'estuaire de la Loire, les eaux souterraines sont donc attendues à faible profondeur (< 5 m). D'après les piézomètres de la BSS, les eaux s'écoulent en direction de l'estuaire de la Loire, c'est à dire vers le sud-est. Cet écoulement pourrait cependant être influencé par les marées.

E.3.3. Usages des eaux souterraines

D'après l'e-mail reçu le 04/01/2022 de la part l'Agence Régionale de Santé (ARS) du département de Loire-Atlantique (44), la commune de Saint-Nazaire n'est concernée par aucun captage d'alimentation en eau potable (AEP) ou périmètre de protection associé.

Le recensement des usages du secteur a été réalisé par la consultation de la base Infoterre du BRGM. La carte de répartition des usages et les principales caractéristiques des points d'eau sont présentées dans la Figure 12 et le Tableau 3.

La banque de données du sous-sol (BSS) recense 5 points d'eau au droit du site ou à proximité. D'après les informations de la BSS, ces points d'eaux sont des piézomètres installés en 1997 par Antéa dans le but de surveiller le niveau de la nappe et sa qualité (sur et à proximité immédiate du site). Ces piézomètres n'ont pas été observés lors de la visite de site.

Tableau 3 : Captages et points d'eaux souterraines présents dans un rayon de 800 m autour du site (source : ARS, ADES et BRGM)

N° BRGM	Utilisation	Cote de l'ouvrage	Profondeur du niveau d'eau	Cote de la nappe	Distance par rapport au centre du site	Position hydraulique ²
		(en m NGF)	(en m/TN)	(en m NGF)		
BSS001GJFC	Surveillance (piézométrie et qualité)	7,57	1,81	5,76	60 m (dans l'emprise du site)	Aval
BSS001GJFD	Surveillance (piézométrie et qualité)	12,42	6,83	5,59	110 m (dans l'emprise du site)	Aval
BSS001GJFB	Surveillance (piézométrie et qualité)	8,13	2,23	5,90	180 m	Aval
BSS001GJFE	Surveillance (piézométrie et qualité)	10,10	4,49	5,61	230 m	Aval
BSS001GJFF	Surveillance (piézométrie et qualité)	Non renseigné	Non renseigné	-	230 m	Aval

La cote NGF des ouvrages est significativement plus élevée que la cote du terrain actuel (situé entre +4 et +5 m NGF). Il est probable que le terrain ait été remodelé (et les piézomètres détruits) depuis la pose des piézomètres en 1997.

La Figure 12 présente la localisation des captages référencés à proximité du site d'étude.

² Par rapport au sens d'écoulement de la première nappe.



Figure 12 : Localisation des captages et points d'eaux souterraines dans un rayon de 800 m autour du site d'étude (source : BRGM)

A l'examen du recensement des points d'eau du secteur, aucun captage à proximité du site n'est jugé sensible.

Aucune information n'est disponible concernant d'autres puits privés potentiellement présents à proximité du site, notamment ceux situés en aval hydraulique qui sont sensibles à une potentielle contamination des eaux souterraines. En effet, la visite des environs du site s'est effectuée en restant sur les voies publiques.

E.3.4. Synthèse de la sensibilité et vulnérabilité des eaux souterraines

Sur la base de ces informations, les eaux souterraines sont considérées modérément vulnérables. Les usages des eaux souterraines en aval du site sont non sensibles.

E.4. Milieu « eaux superficielles »

E.4.1. Contexte hydrologique

Les masses d'eaux à proximité du site sont les suivantes :

- l'estuaire de la Loire à environ 200 m au sud-est ;
- le bassin de Penhoët (port de Saint-Nazaire) à environ 400 m à l'ouest;
- le bassin C (port de Saint-Nazaire) à environ 150 m au nord-est.

La localisation des masses d'eaux dans un rayon de 2 km autour de la zone d'étude est présentée en Figure 13.

Compte tenu de leurs distances au site, les eaux superficielles sont potentiellement vulnérables à une pollution provenant du site (via un transfert par les eaux souterraines ou ruissellement direct). La sensibilité de leur usage est étudiée au paragraphe suivant.

E.4.2. Usage des eaux superficielles

E.4.2.1. Baignade – Activités récréatives

D'après la base de données des sites de baignades du Ministère de la Santé, il n'existe pas de zone de baignade dans un rayon de 1,5 km autour du site d'étude. La zone de baignade la plus proche est la Grande Plage de Saint-Nazaire, située à environ 1,6 km au sud-ouest, dont la qualité de l'eau a été évaluée comme insuffisante sur les années 2019, 2020 et 2021.

E.4.2.2. Pêche

D'après la Fédération Départementale de Pêche du département de Loire-Atlantique (44), il n'y a pas de zones de pêches dans les masses d'eaux recensées ci-dessus. Le site d'étude se trouve également à proximité de l'océan présentant des zones de pêche, cependant, compte tenu du facteur de dilution, cette activité ne sera pas retenue.

E.4.2.3. Captages

D'après l'e-mail reçu le 04/01/2022 de la part l'Agence Régionale de Santé (ARS) du département de Loire-Atlantique (44), la commune de Saint-Nazaire n'est concernée par aucun captage d'alimentation en eau potable (AEP) ou périmètre de protection associé.

La Figure 13 présente la localisation des masses d'eau et des captages d'eaux superficielles référencés à proximité du site d'étude.

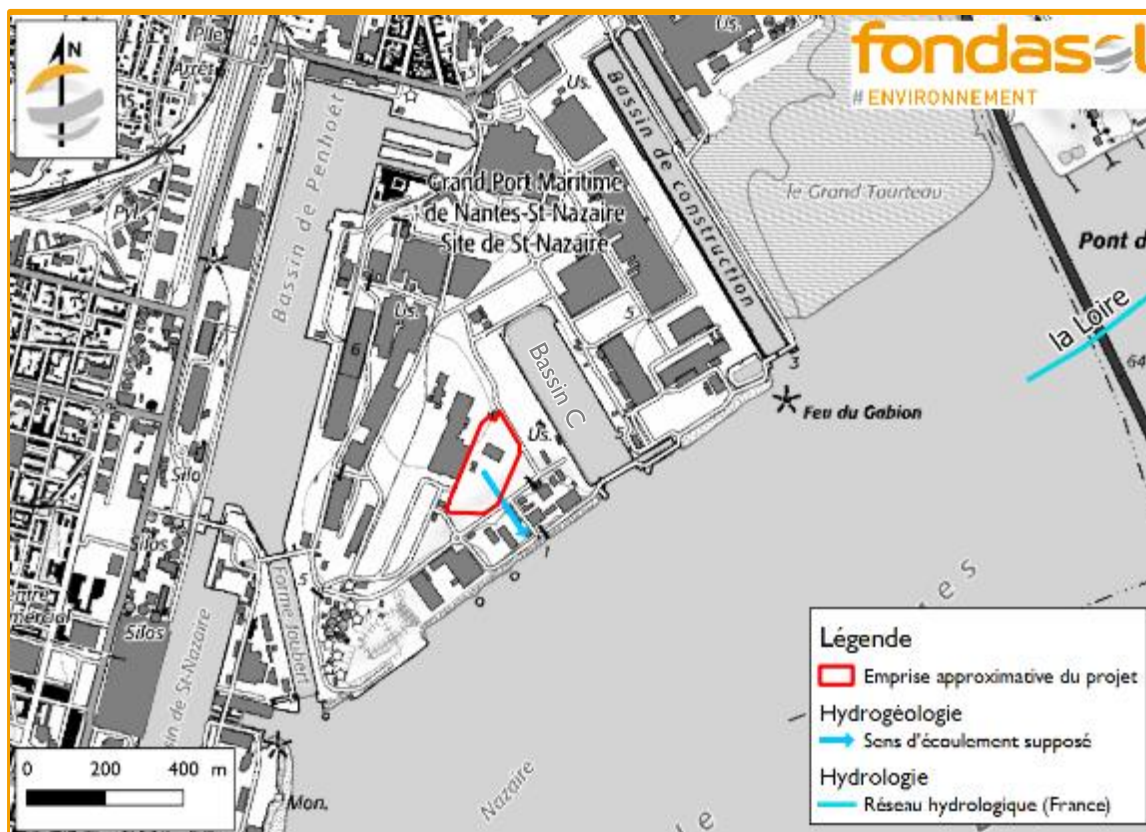


Figure 13 : Localisation des masses d'eau et des captages d'eaux superficielles dans un rayon de 2 km autour du site d'étude (source : BRGM)

E.4.3. Synthèse de la sensibilité et vulnérabilité des eaux superficielles

Sur la base de ces informations, la vulnérabilité est considérée comme élevée. Toutefois, compte tenu de leur volume très important (grand facteur de dilution), le risque d'impact est considéré comme faible. Les usages des eaux superficielles en aval du site sont non sensibles.

E.5. Contexte écologique et naturel

Il existe 7 zones inventoriées pour leur valeur écologique dans un rayon de 1,5 km autour du site ; elles sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Zones naturelles protégées présentes autour du site (dans un rayon de 1,5 km)

Référence	Nom de la zone naturelle (Figure 14)	Distance par rapport au centre du site	Position hydrogéologique par rapport au site ³
<u>Natura 2000</u>			
<u>Zone de protection spéciale</u>			
FR5212014	Estuaire de la Loire – Baie de Bourgneuf	300 m au sud-est	Aval
FR5210103	Estuaire de la Loire	900 m au nord-est	Amont
<u>Site d'intérêt communautaire</u>			
FR5202011	Estuaire de la Loire Nord	300 m au sud-est	Aval
FR5200621	Estuaire de la Loire	900 m à l'est	Amont
<u>Inventaires</u>			
<u>Zones importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO)</u>			
00089	Estuaire de la Loire	300 m au sud-est	Aval
<u>ZNIEFF de type 1 de deuxième génération</u>			
520014631	Vasière de Méan	900 m au nord-est	Amont
<u>ZNIEFF de type 2 de deuxième génération</u>			
520616267	Vallée de la Loire à l'aval de Nantes	900 m à l'est	Amont

Aucun autre site naturel de type site RAMSAR, parcs nationaux, réserves naturelles ou zones concernées par un Arrêté de Protection de Biotope n'est recensé dans l'environnement de la zone d'étude.

Etant donné la situation géographique à l'embouchure de la Loire, la position hydrogéologique des zones recensées ci-dessus est dépendante des phénomènes de marées. Cette position peut se retrouver inversée à marée montante.

Au vu du facteur de dilution important dans les eaux superficielles, le site n'a pas vraisemblablement de forte influence sur les zones naturelles protégées citées ci-dessus. En tout état de cause, l'emprise du site n'abrite pas d'écosystème à haute valeur biologique rare, sensible ou contenant des espèces menacées à protéger.

Les éléments cités ci-dessus sont présentés en Figure 14.

³ Par rapport au sens d'écoulement de la première nappe.

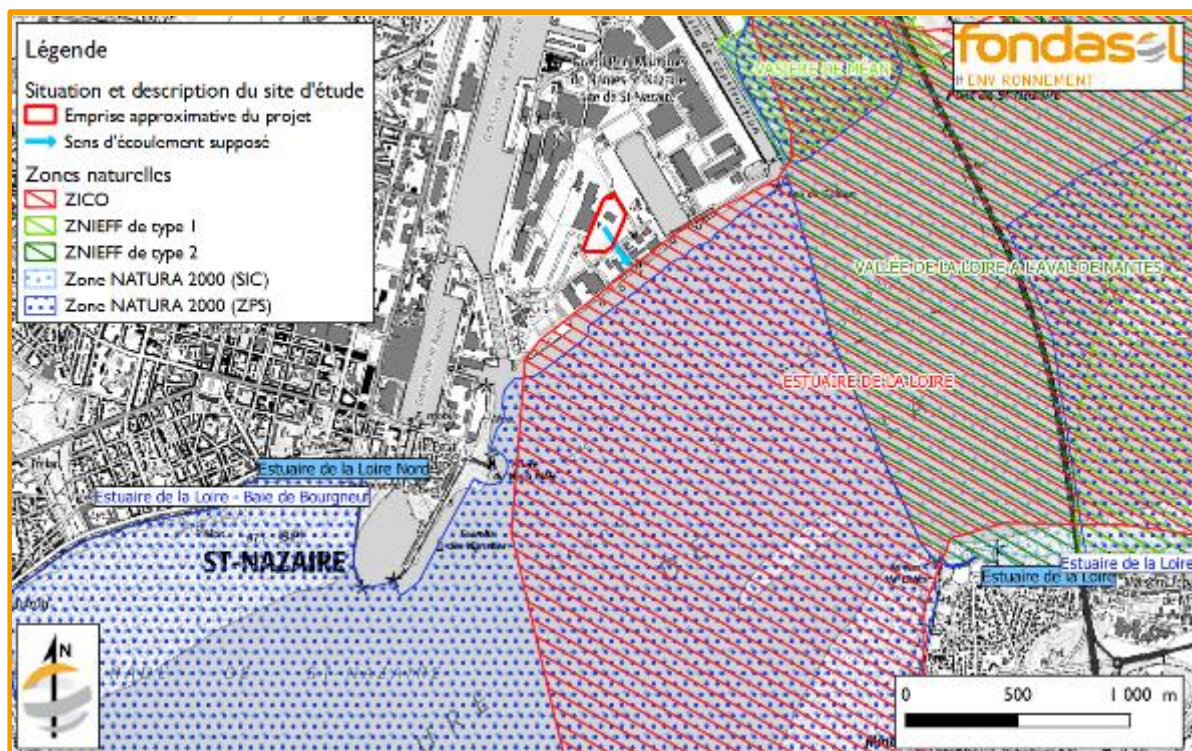


Figure 14 : Localisation des zones écologiques dans un rayon de 1,5 km autour du site (source : INPN)

E.6. Contexte météorologique

La ville de Saint-Nazaire bénéficie d'un climat océanique nord-ouest. Des précipitations importantes sont enregistrées toute l'année, y compris lors des mois les plus secs. La température moyenne annuelle y est de 12,3°C. La moyenne du cumul annuel des précipitations est de 774 mm.

L'examen des données météorologiques disponibles sur le site Windfinder révèle que les vents dominants proviennent majoritairement de l'ouest.

La Figure 15 présente la rose des vents de la station de Saint-Nazaire-Montoir Aéroport entre 2000 et 2022.

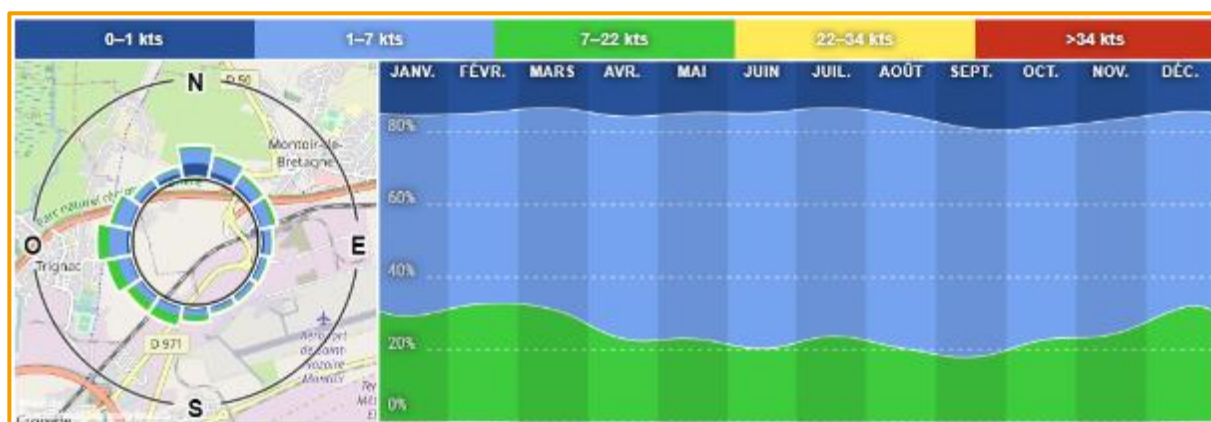


Figure 15 : Rose des vents de la station de Saint-Nazaire-Montoir Aéroport entre 2000 et 2022 / kts = vitesse du vent en nœuds (source : Météo Windfinder)

E.7. Registre des émissions polluantes

Le registre des émissions polluantes a été consulté sur Géorisques. Il montre dans les environs immédiats du site d'étude, la présence de 2 sites à émissions polluantes.

Tableau 5 : Inventaire des sites à émissions polluantes au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 800 m)

Identifiant	Exploitant (adresse du site)	Activité du site	Nature des émissions polluantes / quantités	Distance par rapport au centre du site	Position éolienne par rapport au site ⁴
0006301213	MAN Diesel & Turbo France SAS (Avenue de Chatonay porte n°7, BP 427 44600 Saint-Nazaire)	Fabrication de moteurs et turbines, à l'exception des moteurs d'avions et de véhicules	Oxydes d'azote / 106 t en 2019	500 m au nord-ouest	Amont / latérale
			Trichloroéthylène / 834 kg en 2004		
			Déchets dangereux / 474 t en 2020		
0006301770	Chantiers de l'Atlantique (Avenue Bourdelle, BP 90180 44600 Saint-Nazaire)	Construction de navires et de structures flottantes	COVNM / 143 t en 2020	750 m au nord	Aval
			Déchets dangereux / 2485 t en 2020		
			Déchets non dangereux / 10692 t en 2020		

E.8. Recensement des sites potentiellement pollués autour du site

E.8.1. Consultation de la base de données CASIAS

La base de données Géorisques fait l'inventaire des anciens sites industriels et activités de services.

13 sites CASIAS sont référencés dans un périmètre de 550 m autour du site d'étude. Ils sont présentés dans le Tableau 6 et localisés sur la Figure 16.

⁴ Par rapport à la direction dominante du vent dans le secteur

Tableau 6 : Inventaire des sites CASIAS recensés au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 550 m)

Identifiant	Exploitant	Activité du site	Etat	Date de début d'activité	Date de fin d'activité	Stockages, Utilisation de produits	Distance par rapport au centre du site (m)	Position hydrogéologique par rapport au site ⁵
PAL4403154	CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	Chaudronnerie, tonnellerie Construction navale, travaux de finition (plâtrier, menuisier bois, PVC, métaux, serrurier, revêtement sols et murs, peintre, vitrier) Dépôt et application peinture	Activité terminée	1973	09/1995	Absence d'informations	200	Amont
PAL4403218	CHANTIERS ET ATELIERS DE SAINT-NAZAIRE S.A.	Dépôt de liquides inflammables (D.L.I.) - Dépôts de mazout	En activité	?	-	Absence d'informations	350	Amont
PAL4403170	ALSTHOM ATLANTIQUE S.A.	Dépôt de liquides inflammables (D.L.I.), production et distribution de vapeur (chaleur) et d'air conditionné, installations de combustion	En activité	1981	-	Absence d'informations	350	Amont
PAL4403139	CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	Construction navale Fabrication d'autres machines d'usage général (pompe, moteur, turbine, compresseur, robinets, organe mécanique de transmission) - Banc essais moteur	En activité	1968	-	Absence d'informations	370	Latéral-Amont
PAL4405084	PIELSTICK S.E.M.T	Garages, ateliers, mécanique et soudure	?	06/05/1988	-	Absence d'informations	380	Latérale

⁵ Par rapport à un sens d'écoulement dirigé vers le sud-est. Toutefois, notons qu'en fonction des marées, ce sens d'écoulement est susceptible de varier.

Identifiant	Exploitant	Activité du site	Etat	Date de début d'activité	Date de fin d'activité	Stockages, Utilisation de produits	Distance par rapport au centre du site (m)	Position hydrogéologique par rapport au site ⁵
PAL4403168	CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	Traitement et revêtement des métaux (traitement de surface, sablage et métallisation, traitement électrolytique, application de vernis et peintures), fabrication d'autres produits chimiques inorganiques de base n.c.a. - Installation de décapage, phosphatation d'acier	En activité	1979	-	Phosphéral en bidons de 30 L	390	Latéral-Amont
PAL4403225	S.E.M.T PIELSTICK	Travaux de finition (plâtrier, menuisier bois, PVC, métaux, serrurier, revêtement sols et murs, peintre, vitrier) Application de peinture (et compression)	En activité	1992	-	Absence d'informations	400	Latérale
PAL4403214	CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE	Fabrication de gaz industriels - Fabrique d'acétylène et oxygène	Activité terminée	1929	?	Absence d'informations	450	Amont
PAL4405009	CHANTIERS ET ATELIERS DE SAINT-NAZAIRE S.A.	Dépôt de liquides inflammables (D.L.I.)	Activité terminée	?	?	500 bidons métalliques hermétiques de 20L	450	Latérale
PAL4403105	SOUDURE AUTOGENE FRANCAISE / CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE ALSTHOM	Métallurgie, construction navale	En activité	?	-	Absence d'informations	460	Latérale
PAL4403080	CHANTIERS ET ATELIERS DE SAINT-NAZAIRE S.A.	Construction navale	En activité	?	-	Absence d'informations	470	Amont
PAL4405004	SOCIETE GENERALE DES DOCKS MARITIMES	Dépôt de liquides inflammables (D.L.I.)	?	1924	-	Absence d'informations	470	Amont

Identifiant	Exploitant	Activité du site	Etat	Date de début d'activité	Date de fin d'activité	Stockages, Utilisation de produits	Distance par rapport au centre du site (m)	Position hydrogéologique par rapport au site ⁵
PAL4403156	PORT AUTONOME NANTES - ST NAZAIRE	Dépôt de liquides inflammables (D.L.I.), collecte et traitement des eaux usées (station d'épuration) - Station réception eaux polluées Dépôt résidus pétroliers	Activité terminée	1965	?	Absence d'informations	550	Latérale

6 sites CASIAS se trouvent en amont hydrogéologique du site étudié dans un rayon de 550 m. Les activités pratiquées sur ces sites (majoritairement des activités industrielles des Chantiers de l'Atlantique et des dépôts d'hydrocarbures) sont susceptibles d'avoir influencé la qualité des eaux souterraines au droit du site étudié (via transport par la nappe). Les polluants potentiels associés à ces activités sont les suivants : hydrocarbures, métaux, solvants.

E.8.2. Consultation de la base de données des sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée

La base de données Géorisques recense les informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (ex BASOL).

Le site ne dispose pas d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée.

Le site disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée est présent à proximité du site d'étude dans un périmètre de 550 m. Il est présenté dans le Tableau 7 et localisé sur la Figure 16.

Tableau 7 : Inventaire des sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée recensés au droit et dans l'environnement du site (dans un rayon de 550 m)

Identifiant	Exploitant et adresse du site	Activité du site	Impacts mis en évidence dans les différents milieux	Travaux effectués / Situation technique du site	Distance par rapport au centre du site	Position hydrogéologique par rapport au site ⁶
			Sols	Sols		
SSP000704501	Station de déballastage – Grand Port Maritime de Saint-Nazaire	Recueil des boues chargées en hydrocarbures des navires en transit dans le port de Saint-Nazaire	Impact en indice phénol, en hydrocarbures totaux, en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), en éléments traces métalliques et en hydrocarbures mono-aromatiques volatils	Des travaux de dépollution ont été effectués et ont consisté en l'évacuation de 6000 tonnes de terres souillées. Une pollution résiduelle en hydrocarbures persiste au niveau des sols après ces travaux de dépollution. L'ensemble du site a été recouvert avec des matériaux sains sur une épaisseur de 10 cm. Une Analyse des Risques Résiduels (ARR) a conclu à l'absence de risque sanitaire pour un usage du site en tant que hub logistique destiné à la réception, à l'entreposage et à l'assemblage d'éoliennes.	525 m	Latérale

⁶ Par rapport à un sens d'écoulement dirigé vers le sud-est. Toutefois, notons qu'en fonction des marées, ce sens d'écoulement est susceptible de varier.

[illegible]

FONDASOL – PR.44EN.21.0084 – 002 – Ind. A
Projet de construction d'un atelier de préfabrication – Saint-Nazaire (44) – Diagnostic du milieu souterrain

E.9. Bilan de la vulnérabilité et de la sensibilité des milieux

Le Tableau 8 dresse un bilan de la vulnérabilité et la sensibilité des différents compartiments environnementaux vis-à-vis du site.

Tableau 8 : Degré de vulnérabilité et de sensibilité des milieux

Milieux	Vulnérabilité	Sensibilité
Sols	Modérée	Usage non sensible
	Les sols au droit du site sont modérément vulnérables en cas de déversement accidentel depuis les activités recensées, la majorité étant recouverte de dallage ou d'enrobé là où les activités sont exercées.	Le site et son environnement sont à usage industriel et portuaire.
Eaux souterraines	Modérée	Usage non sensible
	Nappe libre peu profonde (<5 m) mais les sols recouverts par de l'enrobé protègent les infiltrations pouvant provenir de la surface.	Aucun captage n'a été recensé en aval hydrogéologique du site.
Eaux superficielles	Modérée	Usage non sensible
	Estuaire de la Loire en aval hydraulique. Compte tenu de leur volume très important (grand facteur de dilution), les masses d'eaux superficielles sont considérées modérément vulnérable (faible risque d'impact).	Pas d'usage sensible répertorié dans l'environnement proche du site.
Zones sensibles	Modérée	Usage sensible
	Le site étudié n'est pas inclus dans une zone naturelle remarquable. Toutefois, l'estuaire de la Loire est référencé dans comme zone naturelle protégée.	Par définition d'une zone sensible.

F. ETUDE HISTORIQUE ET DOCUMENTAIRE (AII10)

L'étude historique a pour but de reconstituer, à travers l'histoire des pratiques industrielles et environnementales du site, d'une part les zones potentiellement polluées et d'autre part les types de polluants potentiellement présents au droit du site concerné.

F.1. Sources d'informations

Cette étude historique s'appuie sur :

- la consultation de la base de données Géorisques pour :
 - les sites **CASIAS** (ex BASIAS),
 - les sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (ex BASOL),
 - les sites disposant d'obligations réglementaires liées aux parcelles cadastrales : Secteurs d'Information sur les Sols (SIS),
 - les sites ICPE ;
- l'étude de photographies aériennes disponibles sur le site de l'IGN© ;
- l'étude de la photographie aérienne disponible sur Géoportail.gouv.fr ;
- l'étude des images satellites disponibles sur GoogleEarth ;
- les documents disponibles à la DREAL des Pays de la Loire ;
- des extraits de plan de synthèse de rapport de diagnostic environnemental d'Arcadis référencé n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006 ;
- un extrait de plan de synthèse de rapport de mission environnementale INFOS de Dekra Industrial SAS référencé n°53479722 – version A du 02/12/2021 ;
- la base de données ARIA du BARPI.






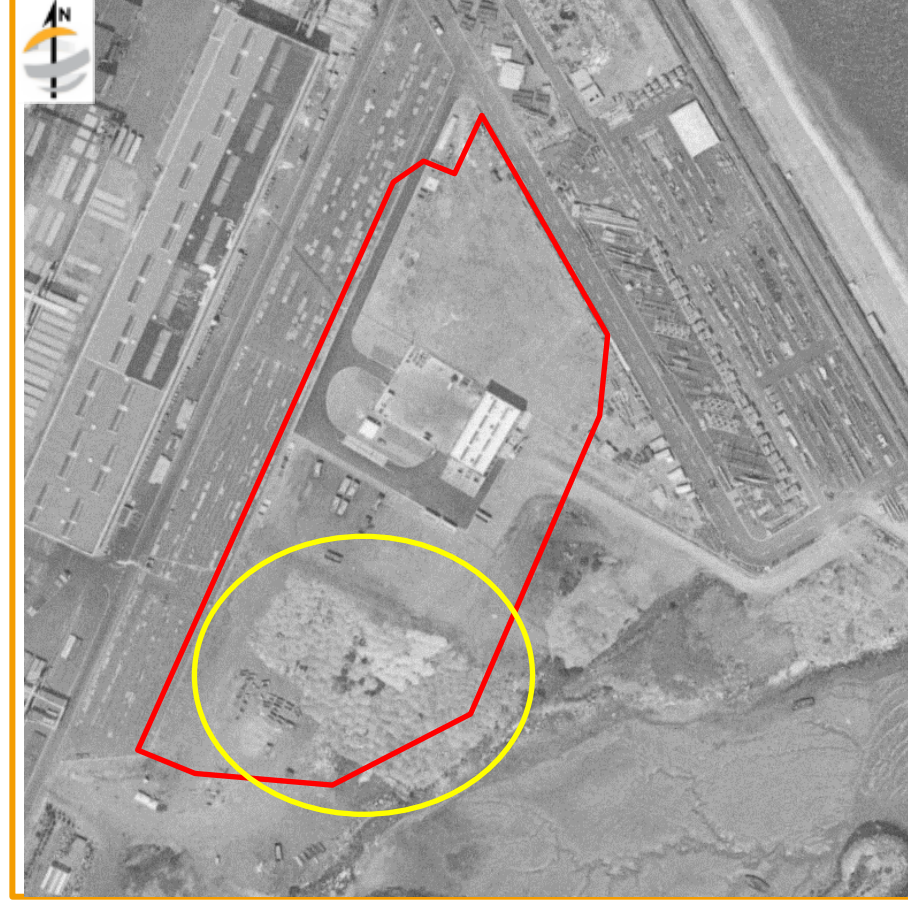
F.2. Evolution du site – consultation des photographies aériennes

Les clichés consultés sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Liste des clichés consultés (source : IGN©)

Date	Référence	N° cliché
1932	C0721-0071_1932_NP10_1011	1011
1945	C0615-1121_1945_FRANCESUD-OUEST9019_0015	15
1965	C1023-0051_1965_FR895_0015	15
1966	C1023-0591_1966_CDP7251_9977	9977
1967	C92PHQ2351_1967_CDP9158_1950	1950
1971	C1121-0171_1971_FR2114_0659	659
1973	C1023-0571_1973_CDP6764_9904	9904
1975	C3636-0173_1975_FR2715IR_0080	80
1978	C1023-0661_1978_CDP8443_4170	4170
1982	CIPLI-0121_1982_IPLI12_0612	612
1985	C1223-0031_1985_F0823-1223_0114	114
1993	C93SAA0762_1993_FD44_0236	236
1996	CA98P00171_1996_IFN44_0835	835
1999	CA99S00512_1999_FD44-56_1858	1858
2002	CN02000031_2002_CDP9783_9412	9412
2004	CP04000012_FD4456.7_1128	1128
2009	CP09000292_FD44x016_01556	1556
2012	CPI2000242_FD44x00024_00861	861
2020	Géoportail	

La synthèse des observations réalisées au droit du site et dans l'environnement proche, ainsi qu'une sélection des photographies jugées les plus représentatives de l'évolution de l'histoire du site et de son environnement, sont présentées dans la Figure 17.

<div>1966</div> <div></div> <div>Le site d'étude se trouve dans les eaux de l'estuaire de la Loire. Le port maritime de Saint-Nazaire se trouve à l'ouest du site.</div>	<div>1973</div> <div></div> <div>D'importants travaux d'aménagement sont entrepris dans l'environnement du site. Le port maritime gagne du terrain sur la mer par remblaiement.</div>
<div>1975</div> <div></div> <div>L'ensemble du site d'étude est en cours de remblaiement sur la mer. En l'ouest du site, un nouveau bâtiment industriel a été construit.</div>	<div>1985</div> <div></div> <div>Le remblaiement de la zone d'étude et l'aménagement du terre-plein se poursuit.</div>
<div>1993</div> <div></div> <div>Le remblaiement de la zone d'étude se poursuit. Les terres apportées dans la moitié sud du site sont de couleur noirâtre.</div>	<div>1996</div> <div></div> <div>En partie centrale du site, un hangar et des plateformes ont été construits dans l'actuelle zone du centre de tri des déchets. Des tas de terre sont entreposés en partie sud du site (cercle jaune).</div>

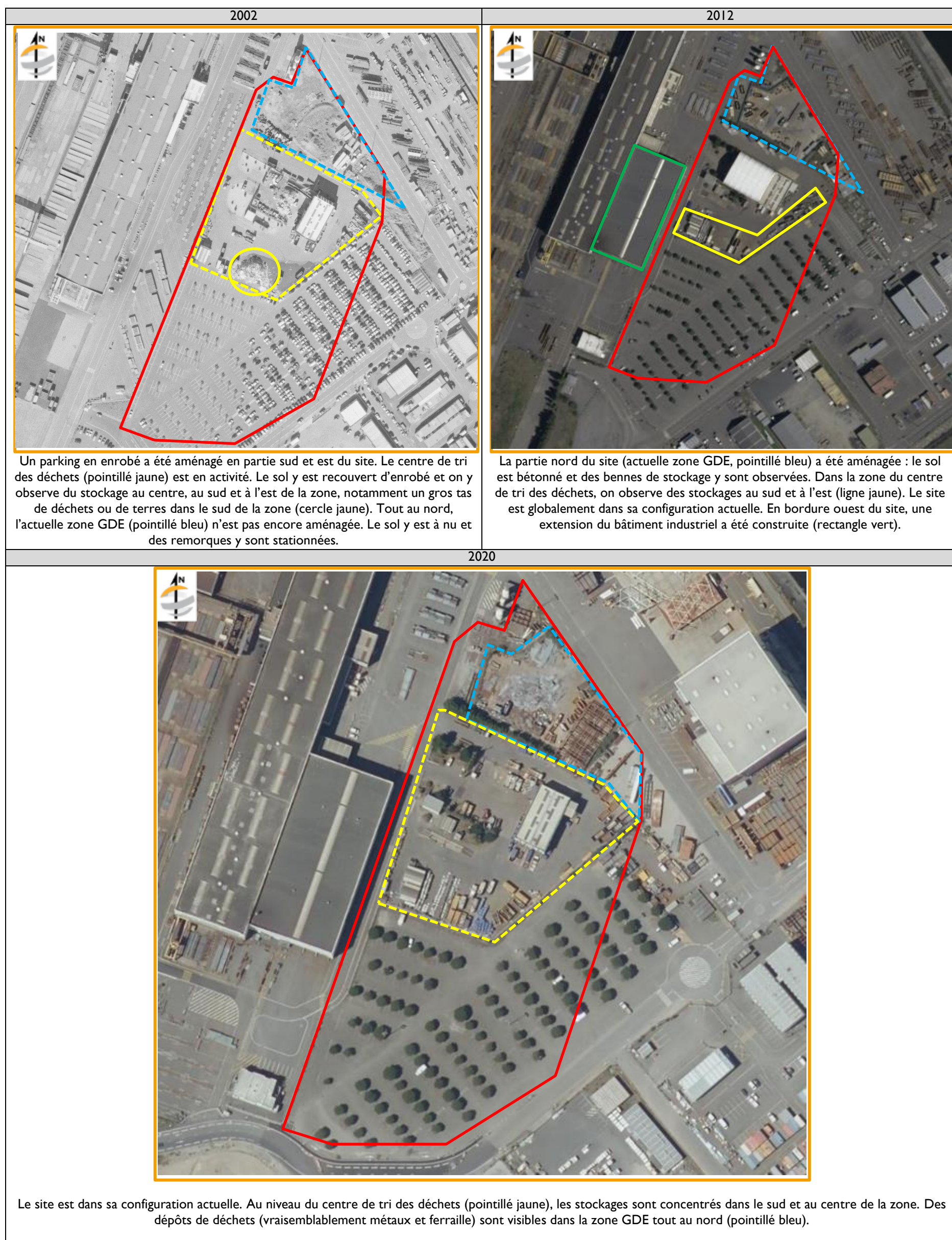


Figure 17 : Photographies aériennes (source : IGN©)

F.3. Consultation de la base de données **Secteur d'Information sur les Sols (SIS)**

Le site d'étude n'est pas référencé dans la base de données SIS.

F.4. Etude de la fiche CASIAS correspondant à l'adresse du site

Le site d'étude n'est pas référencé dans la base de données CASIAS (ex BASIAS) accessible sur le site internet Géorisques.

En revanche, plusieurs sites CASIAS sont présents dans l'environnement du site. Ils sont étudiés au paragraphe E.8.1.

F.5. Etude de la fiche d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée présente au droit du site

Le site d'étude n'est pas référencé dans la base de données des sites disposant d'informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée.

F.6. Historique des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

F.6.1. Consultation de la base de données Géorisques

D'après la consultation de la base de données des ICPE accessible sur <https://www.georisques.gouv.fr/dossiers/installations>, le site des Chantiers de l'Atlantique est soumis à autorisation ou déclaration pour les activités suivantes (arrêté préfectoral du 18/05/1998, modifié par les arrêtés du 17/03/2009 et 26/06/2014).

Tableau 10 : Liste des activités ICPE recensées sur le site des Chantiers de l'Atlantique par les arrêtés préfectoraux de 1998, 2009 et 2014 disponibles sur Géorisques

N° rubrique	Activité
2920-2-a	Installation de réfrigération/compression d'air
2940-2-a	Application de peinture, vernis à base de liquides inflammables de 1 ^{ère} catégorie, de liquides halogénés dénommés A, par pulvérisation
2910-A-I	Installations de combustion
253 (déf. 1430)	Dépôt de liquides inflammables ($V > 100 \text{ m}^3$)
211-B-I / 1412-2-b	Dépôt de crylène en réservoirs fixes (12 à 120 m^3)
2560-I	Travail mécanique des métaux
2575	Emploi de matières abrasives
2925	Atelier de charge d'accumulateurs
1720-2°b (déf. 1700)	Dépôt et utilisation de sources radioactives sous forme de sources scellées
1180-I	Utilisation de composants, matériel... contenant plus de 30 L de PCB
1220-3	Dépôt et emploi d'oxygène (2 à 200 t)
1434-I-b	Distribution de liquides inflammables
2930-b	Atelier de réparation et d'entretien de véhicules à moteur
1418-3	Dépôt et emploi d'acétylène dissous
2221-2	Préparation ou conservation de produits alimentaires d'origine animale, par découpage, cuisson, ...
2220-2	Préparation ou conservation de produits alimentaires d'origine végétale, par cuisson, appertisation, surgélation, ...

Les activités recensées ci-dessus concernent l'ensemble du site des Chantiers de l'Atlantique, et ne concernent pas nécessairement spécifiquement la zone d'étude.

F.6.2. Consultation de la préfecture de Loire-Atlantique et de la DREAL des Pays de la Loire

Le service des installations classées de la préfecture de Loire-Atlantique (44) et la DREAL des Pays de la Loire ont été contactés par e-mail le 07/01/2022. D'après leur mail de réponse du 13/01/2022, la DREAL dispose de plusieurs boîtes d'archives concernant les Chantiers de l'Atlantique. Ces documents ont été consultés dans les locaux de la DREAL le 01/02/2022.

Les documents consultés concernent :

- l'arrêté préfectoral du 26 septembre 2013 relatif aux installations classées ;
- les postes électriques et transformateurs aux PCB présents sur site ;
- l'installation de réfrigération/compression d'air (rubrique 2920-2-a) ;
- les alvéoles de peinture, la grenailleuse à tôle et la grenailleuse à profilés (2940-2-a) ;
- le travail mécanique des métaux (2560-1) ;
- l'emploi de matières abrasives (grenailleuses) (2575) ;
- l'état des lieux et les stratégies de réduction des émissions atmosphériques de COV ;
- l'évaluation des risques sanitaires des émissions atmosphériques liées aux peintures et solvants ;
- la gestion des déchets des Chantiers de l'Atlantique et la mise en sécurité des stockages de produits polluants ;
- la plateforme de la société GDE pour le tri des métaux.

D'après les informations contenues dans ces documents (notamment les plans de repérage des installations), seuls les deux derniers points listés ci-dessus concernent spécifiquement la zone d'étude. Les autres activités mentionnées ne se trouvent pas dans l'environnement immédiat du site et n'ont vraisemblablement pas d'impact sur la qualité du milieu souterrain au droit du site d'étude.

Les informations pertinentes en rapport avec le site d'étude sont résumées dans le Tableau II.

Tableau I I : Informations relatives au site recueillies à la DREAL des Pays de la Loire

Date	Nature du document	Informations relatives au document
30/06/2002	Dossier de présentation du programme des actions relatives aux prescriptions additionnelles de l'arrêté préfectoral complémentaire du 22 mai 2002 – source : ALSTOM / Chantiers de l'Atlantique	<p>Gestion des déchets (d'après le rapport d'activité de 2001 du centre de tri, localisé au droit du site d'étude) :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le centre de tri des déchets comprend : <ul style="list-style-type: none"> une chaîne de tri mécanisé surélevée dans le bâtiment central, sous laquelle sont placés 9 casiers ou bennes pour réceptionner les déchets triés, un local DIS (Déchet Industriel Spécial) sur rétention, une zone de stockage clôturée des déchets en attente de tri, sur dalle béton, une zone de stockage du bois, une zone de stockage des bennes ; Les déchets sont triés en plusieurs étapes puis évacués en bennes vers différentes filières de valorisation. <p>Mise en sécurité des stockages de produits polluants (d'après le bilan établi par les Chantiers de l'Atlantique en juin 2002) :</p> <ul style="list-style-type: none"> L'arrêté préfectoral du 18/05/1998 stipule que les produits liquides susceptibles de créer une pollution des sols ou des eaux doivent être stockés sur rétention ; Les principaux DIS (Déchet Industriel Spécial) générés par les Chantiers de l'Atlantique sont les suivants : <ul style="list-style-type: none"> huiles de coupe et hydrauliques, graisse moteurs, graisse marine, solvants chlorés et non chlorés, dégraissants, liquide anticorrosion, liquide de refroidissement, peintures et diluants, mélanges divers ; Selon le bilan datant de 2002, le local DIS, localisé dans la zone du centre de tri des déchets, est conforme à l'arrêté préfectoral. Les produits (huiles, solvants, peinture, résine, ...) sont stockés dans des fûts et bidons sur bacs de rétention.
12/01/2012	Rapport de l'inspection des Installations Classées – demande de bénéfice d'antériorité de la société GDE au titre des rubriques 27xx.	<p>La société GDE est sous-traitante de STX (les Chantiers de l'Atlantique) pour les prestations de regroupement et traitement des déchets métalliques dans l'enceinte du site des Chantiers de l'Atlantique :</p> <ul style="list-style-type: none"> Entreposage des métaux et déchets de métaux, tri, déconditionnement et reconditionnement, sur une surface d'environ 2 500 m² ; Traitement de déchets non dangereux à raison d'en moyenne 200 t/j de métaux oxycoupés ; La demande d'antériorité de GDE a été refusée par les Installations Classées car non-fondée réglementairement.

Les activités mentionnées dans le tableau ci-dessus concernent respectivement le centre de tri des déchets et la plateforme GDE, tels que décrits dans le paragraphe D.

F.7. Consultation des informations transmises par le client

Dans le cadre de la présente étude, le client nous a transmis les éléments suivants :

- des extraits du rapport de diagnostic environnemental d'Arcadis référencé n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006 concernant l'ensemble du site des Chantiers de l'Atlantique, comprenant des photographies aériennes historiques et une carte de synthèse des résultats d'investigations sur les sols ;
- un extrait du rapport de mission environnementale INFOS de Dekra Industrial SAS référencé n°53479722 – version A du 02/12/2021, concernant l'ensemble du site des Chantiers de l'Atlantique ;

Les documents transmis sont fournis en Annexe 6.

F.7.1. Informations extraites du rapport d'Arcadis

Les extraits qui nous ont été transmis proviennent du rapport de diagnostic environnemental d'Arcadis référencé n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006.

Ces extraits montrent une sélection de photographies aériennes obliques prises par avion. Les photographies prises entre 1950 et 1997 confirment le remblaiement du site d'étude par des terres d'apport d'origine et de qualité inconnue, potentiellement contaminées.

La Figure 18 ci-dessous est un exemple de photographie montrant des remblais de couleur noire (potentiellement contaminés) au droit du site.



Figure 18 : Photographie oblique de 1976 montrant des remblais de couleur noire au droit du site d'étude (source : rapport Arcadis n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006)

Par ailleurs, les extraits transmis contiennent ce qui semble être une carte de synthèse des investigations environnementales effectuées sur les sols, à l'échelle de l'ensemble des activités des Chantiers de l'Atlantique.

D'après ce document, les investigations réalisées au droit de la zone d'étude mettent en évidence des impacts en métaux lourds (cuivre, arsenic, plomb et nickel) dans les sols. La Figure 19 présente ces résultats. Les unités sont exprimées en mg/kg.

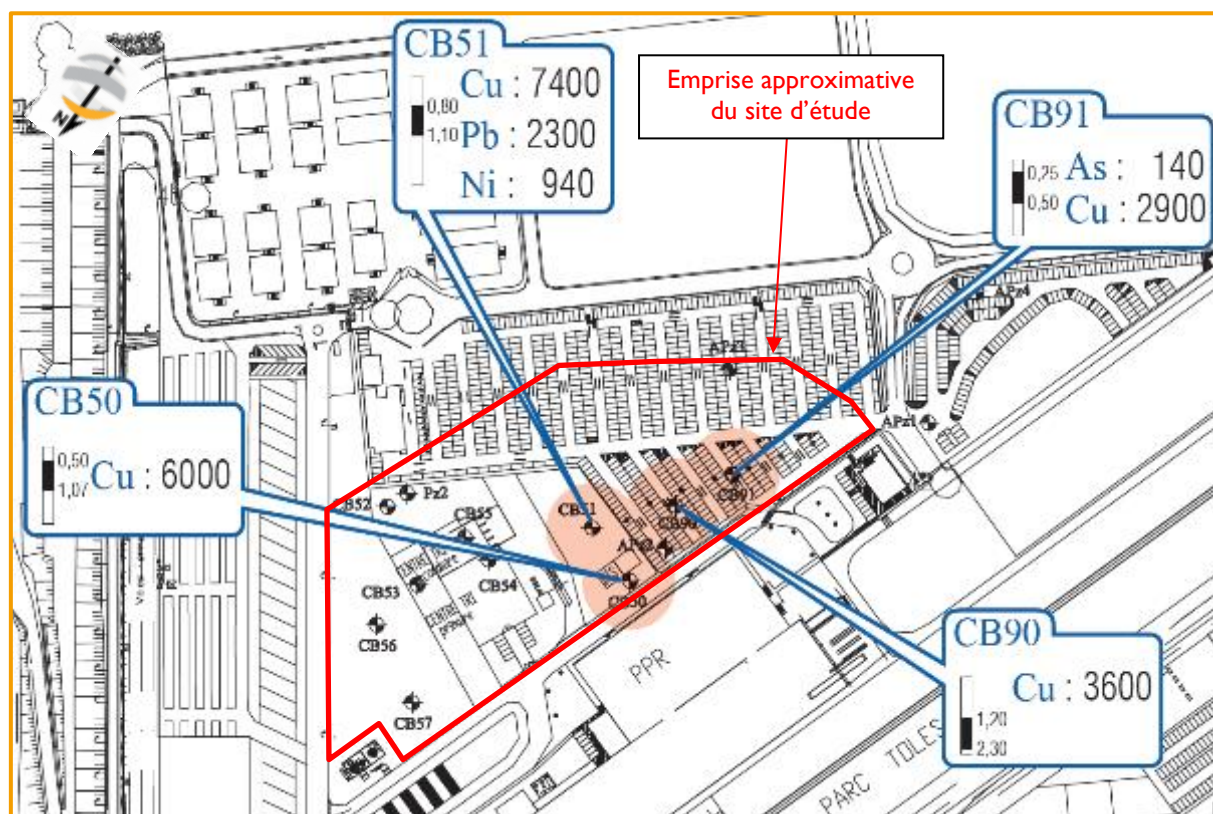


Figure 19 : Carte de synthèse des investigations sur les sols dans la zone d'étude (unité : mg/kg ; source : rapport Arcadis n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006)

F.7.2. Informations extraites du rapport de Dekra Industrial

L'extrait transmis provient du rapport de Dekra Industrial SAS référencé n°53479722 – version A du 02/12/202, et concerne une mission environnementale de type A110 selon la norme NF X 31-620.

L'extrait en question concerne l'ensemble du site des Chantiers de l'Atlantique et n'apporte pas d'information nouvelle spécifique à la zone d'étude. Le recensement des sites BASIAS dans l'environnement du site a toutefois été réutilisé dans le cadre de notre mission A120 au paragraphe E.8.1.

F.8. Accidents ou incidents environnementaux

D'après la base de données ARIA gérée par le BARPI, 38 accidents environnementaux sont recensés sur la commune de Saint-Nazaire (44). D'après les informations disponibles sur les fiches d'accident, la majorité d'entre eux ne concerne vraisemblablement pas le site d'étude. Toutefois, il est recensé quelques accidents pouvant se rapporter au site d'étude :

- un dégagement gazeux dans un centre de tri des déchets dangereux ;
- plusieurs feux sur des navires dans un chantier naval ;












- un incendie dans un entrepôt de solvants et peintures ;
- un incendie dans un broyeur dans un centre de transit de déchets industriels spéciaux (DIS) ;
- des pollutions des eaux aux hydrocarbures dans le port de Saint-Nazaire et au large de l'estuaire de la Loire.

Compte tenu des descriptions disponibles dans les fiches concernées, il paraît peu probable que les incidents ci-dessus aient influencé la qualité des sols ou des eaux souterraines au droit du site étudié. Toutefois, l'incendie dans l'entrepôt de solvants et peinture peut potentiellement concerner le site d'étude. Les polluants associés sont les solvants et les métaux.

F.9. Synthèse historique de l'exploitation du site

Le Tableau 12 présente la synthèse de l'historique du site.

Tableau 12 : Synthèse de l'historique de l'exploitation du site

Exploitant	Années	Activités / installations	Source
-	Jusqu'en 1975	Le site se trouve dans les eaux de l'estuaire de la Loire	
-	1975 – 1996	Le site est en cours de remblaiement sur l'estuaire – les remblais d'apport sont a priori de qualité médiocre et potentiellement contaminés	 
Les Chantiers de l'Atlantique	Vers 1996	Création du centre de tri des déchets au droit du site (partie centrale) – plusieurs types de déchets sont triés et stockés temporairement dans la zone, dont des déchets industriels spéciaux (huiles, solvants, peintures, résines, eaux usées, ...) – toujours en activité aujourd'hui	  
?	Entre 1999 et 2002	Aménagement d'un parking de véhicules légers au droit du site (au sud et à l'est) – toujours en activité aujourd'hui	 
GDE (sous-traitant des Chantiers de l'Atlantique)	Entre 2009 et 2012	Aménagement d'une plateforme de tri et de traitement des métaux au droit du site (partie nord), sur dalle béton – toujours en activité aujourd'hui	  

	Anciennes photographies aériennes		Documents consultés à la DREAL
	Visite de site		Extrait du rapport d'Arcadis transmis par le client

F.10. Conclusion sur l'étude historique du site

La synthèse des sources potentielles de pollution recensées dans le cadre de l'étude historique et documentaire est présentée sur le plan en Figure 20 et dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Sources potentielles de pollution identifiées au droit du site

Source potentielle de pollution	Profondeur des sources	Localisation sur le site	Polluants potentiels	Milieux potentiellement impactés
Remblais d'apport de qualité vraisemblablement médiocre	Plusieurs mètres d'épaisseur	Tout le site, et plus particulièrement la moitié sud	Tous types de polluants	Sols, nappe
Stockages de déchets liquides dangereux en fûts et cuves	Surface	Partie centrale du site : centre de tri des déchets : local de stockage et autour	Hydrocarbures, solvants, métaux	Sols, nappe
Plateforme de tri des métaux (GDE)	Surface	Partie nord du site : zone GDE	Hydrocarbures, solvants, métaux	Sols, nappe

Par ailleurs, il est à noter que le diagnostic environnemental d'Arcadis référencé n°615.05.5229.E en date du 01/02/2006 a mis en évidence des impacts en métaux lourds (cuivre, arsenic, plomb et nickel) dans les sols en partie centre-ouest du site d'étude.

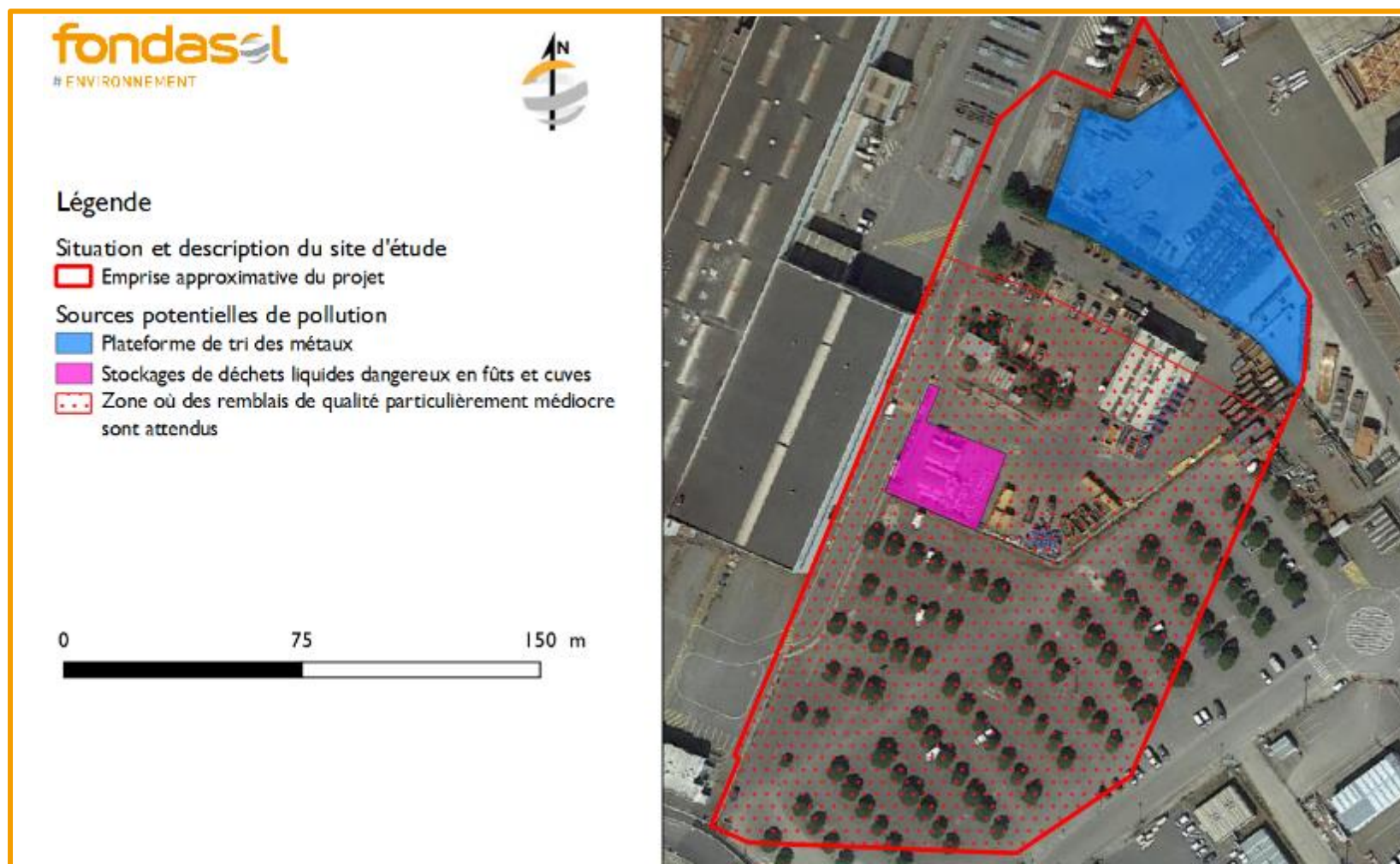


Figure 20 : Plan de synthèse des sources potentielles de pollution recensées sur site

Nota : des remblais de qualité inconnue, potentiellement contaminés, sont attendus sur l'intégralité du site. N'est représentée sur le plan ci-dessus que la zone où les remblais semblent de particulièrement mauvaise qualité d'après les photographies aériennes historiques (couleur noirâtre).

G. SCHEMA CONCEPTUEL INITIAL

G.1. Rappel sur le schéma conceptuel

Le schéma conceptuel a pour objectif de définir les enjeux sanitaires et environnementaux en illustrant les relations entre les sources potentielles de pollution, les voies de transfert, les milieux d'exposition susceptibles d'être atteints et les cibles concernées.

Véritable état des lieux du milieu ou du site considéré, le schéma conceptuel doit, d'une manière générale, permettre de préciser les relations entre :

- les sources de pollution ;
- les voies de transferts possibles, incluant les divers mécanismes de transport dans chaque milieu et leurs caractéristiques, ce qui détermine l'étendue des pollutions ;
- les récepteurs existants et/ou futurs à protéger : les populations riveraines, les usages des milieux et de l'environnement, les milieux d'exposition, et les ressources naturelles à protéger.

Si cette combinaison n'est pas réalisée, la pollution ne présente pas de risque dans la mesure où sa présence est identifiée et conservée dans les mémoires.

Les modes d'exposition peuvent être directs (ingestion des sols et de poussières, ingestion d'eau, inhalation de gaz provenant du sol ou de la nappe, ou de poussières) ou indirects (ingestion de produits de consommation susceptibles d'être eux-mêmes pollués, comme les produits du jardin).

G.2. Rappel sur le projet d'aménagement

Le projet d'aménagement consiste en :

- la construction d'un atelier de préfabrication d'une superficie d'environ 12 000 m². Le niveau fini du bâtiment sera calé à la cote de 4,77 m NGF et la cote de terrassement est estimée à 4,25 m NGF ;
- sur le reste du site, l'aménagement de plateformes en enrobé.

Il n'y a pas de niveau de sous-sol prévu au projet.

G.3. Source de pollution

Les sources de pollution et les composés traceurs sont présentés dans le Tableau 13 ci-avant.

G.4. Récepteurs à protéger

Les récepteurs existants et futurs à protéger sont les travailleurs sur site et hors site.

G.5. Voies de transfert

Les voies de transfert potentielles à considérer sont la volatilisation et la remontée de vapeurs et l'infiltration / percolation à travers la zone non saturée du sol puis transfert vers les eaux souterraines.

En l'état actuel comme à l'état futur, l'intégralité des sols du site est ou sera recouverte par un enrobé ou un dallage en béton. Il n'existe aucune zone où le sol est à nu.

La seule voie de transfert potentielle hors site est la migration par les eaux souterraines.

Ainsi, les milieux d'exposition susceptibles d'être atteints sont l'air ambiant et les eaux souterraines.

G.6. Voies d'exposition

Au droit des zones recouvertes (voiries, plateformes et bâtiment actuels et futurs, qui occupent la totalité du site), la seule voie d'exposition potentielle à considérer pour les cibles retenues est l'inhalation de polluant sous forme gazeuse.

Il n'existe pas de zones non recouvertes au droit du site.

Au vu des résultats de l'étude de vulnérabilité des milieux, il n'y a pas d'usages sensibles des eaux souterraines ou des eaux superficielles dans l'environnement du site. Aucune voie d'exposition hors site n'est donc retenue.

Le schéma conceptuel initial est présenté ci-après sous forme de matrice dans le Tableau I4.

Tableau 14 : Schéma conceptuel à l'issue de l'étude historique et documentaire

Source de pollution potentielle	Cibles / enjeux	Voies de transfert	Milieux concernés par le transfert	Commentaire	Voies d'exposition	Milieu d'exposition	Commentaire
Remblais d'apport de qualité vraisemblablement médiocre (confirmée par les résultats d'analyses précédents) Stockages de déchets liquides dangereux en fûts et cuves Plateforme de tri des métaux (GDE) Site référencés CASIAS, en amont hydrogéologiques	Sur site						
	Travailleurs actuels et futurs	Volatilisation	Sols / gaz des sols → Air ambiant	Voie de transfert retenue	Inhalation de polluant sous forme gazeuse	Air ambiant	Risque retenu à ce stade étant donné la nature des polluants potentiels identifiés et les résultats des études antérieures (présence de polluants volatils dans les sols et les gaz du sol)
		Infiltration / percolation	Sols → Eaux souterraines → Air ambiant	A évaluer en fonction des investigations sur les eaux souterraines.	Inhalation de polluant sous forme gazeuse	Air ambiant	A évaluer en fonction des investigations sur les eaux souterraines.
	Hors site						
	Usagers de l'environnement du site (travailleurs actuels et futurs)	Migration par les eaux souterraines	Eaux souterraines → Air ambiant	A évaluer en fonction des investigations sur les eaux souterraines.	Inhalation de polluant sous forme gazeuse (via la nappe)	Air ambiant	Non retenu : au vu des résultats de l'étude de vulnérabilité des milieux, il n'y a pas d'usages sensibles des eaux souterraines ou des eaux superficielles dans l'environnement du site.
			Eaux souterraines		Ingestion d'eau contaminée (puits privé)	Eaux souterraines	
			Eaux souterraines → Eaux superficielles		Ingestion de poisson (pêche)	Poissons	

H. ELABORATION D'UN PROGRAMME PREVISIONNEL D'INVESTIGATIONS ET DE SURVEILLANCE DES DIFFERENTS MILIEUX (AI30)

L'élaboration du programme prévisionnel d'investigations consiste à identifier ou caractériser les sources potentielles de pollution, apporter des éléments de connaissance d'un vecteur de transfert ou d'un milieu, infirmer ou confirmer certaines hypothèses du schéma conceptuel.

H.1. Contexte

H.1.1. Objectifs

Les objectifs des investigations sont :

- de dimensionner plus finement la zone de pollution concentrée en hydrocarbures (HC C₁₀-C₄₀ et HAP) identifiée dans les sols au niveau de l'angle sud-ouest du futur bâtiment (sondages SD1, SD3 et ST6), en BTEX (sondages SD7 et ST5) et en PCB au sud-est du site (sondage ST20), notamment afin d'affiner le plan de maillage (le diagnostic initial⁷ établissait un surcoût de l'ordre de 800 à 920 k€) ;
- de délimiter les impacts en hydrocarbures totaux et HAP identifiés dans les sols au droit des piézaires PA1, PA2 et PA4, au niveau de l'angle sud-ouest du futur bâtiment ;
- de vérifier la qualité des eaux souterraines pour évaluer les voies de transfert potentielles hors site ;
- confronter les résultats des investigations sur les gaz du sol avec une deuxième campagne de mesure, conformément au guide méthodologique FLUXOBAT.

H.1.2. Examen des contraintes

Les contraintes identifiées au droit du site sont :

- la présence de réseaux enterrés au droit du site ;
- l'encombrement au sol sur l'ensemble du site : zones de stockages (centre de tri des déchets et plateforme GDE) et zones de stationnement (parking) ;
- les contraintes administratives et préparatoires (accès restreint dans l'enceinte des Chantiers de l'Atlantique).

H.2. Stratégies d'investigations

La stratégie d'investigations des milieux issue de l'étude historique et documentaire et de l'examen des études antérieures est présentée dans le Tableau 15.

⁷ Rapport FONDASOL Environnement référencé PR.44EN.21.0084 – Pièce n°001 – 1^{ère} édition du 17/11/2021

Tableau 15 : Définition de la stratégie d'investigations

Examen de la qualité des terres qui seront excavées						
Objectif	Source potentielle de pollution	Typologie de pollution suspectée	Nombre de sondages à réaliser et technique utilisée	Profondeur adaptée	Mesures in situ à réaliser	Programme analytique proposé
Caractériser la qualité des terres à excaver – dimensionner les impacts identifiés dans les sols lors des études préalables	Remblais d'apport de qualité médiocre (confirmé par les résultats d'analyse des études antérieures)	Tous types de polluants	15 sondages à la tarière mécanique	1,5 m/TA (échantillonnage des terres superficielles qui seront excavées et des sols sous-jacents)	Observation des indices organoleptiques Mesures PID	15 x Pack ISDI étendu (+12 ETM + COHV + HC C ₅ -C ₁₀)
	Stockages de déchets liquides dangereux en fûts et cuves	Hydrocarbures, solvants, métaux	Sondages déjà réalisés au droit de la zone lors du diagnostic PR.44GT.20.0069-44EN			
	Plateforme de tri des métaux (GDE)	Métaux	Sondages déjà réalisés au droit de la zone lors du diagnostic PR.44EN.21.0084-001			
Examen de la qualité des eaux souterraines						
Objectif	Impact identifié dans le milieu sol	Typologie de pollution suspectée	Nombre de piézomètres à installer et fréquence de prélèvements	Profondeur adaptée et hauteur de crépine à prévoir	Mesures in situ à réaliser	Programme analytique proposé
Vérifier l'absence de transfert de polluant vers les eaux souterraines	Remblais de mauvaise qualité, présentant notamment des impacts en hydrocarbures C ₁₀ -C ₄₀ et en HAP	Tous types de polluants	3 piézomètres – a minima 1 prélèvement par piézomètre	6 m/TA – crépinés de 1 à 6 m/TA	Paramètres physico-chimiques (ph, potentiel redox, conductivité électrique)	3 x Pack « bilan du sous-sol » : 8 ETM + COHV + HC C ₅ -C ₁₀ + HC C ₁₀ -C ₄₀ + HAP + PCB + BTEX
Examen de la qualité des gaz du sol						
Objectif	Impact identifié dans les gaz du sol	Typologie de pollution suspectée	Nombre de piézairs à installer et fréquence de prélèvements	Profondeur adaptée et hauteur de crépine à prévoir	Mesures in situ à réaliser	Programme analytique proposé
Confronter les résultats de la première campagne d'investigations sur les gaz du sol, conformément à la méthodologie	Impact en benzène et dans une moindre mesure en HC C ₅ -C ₁₀ dans l'angle sud-ouest du futur bâtiment	BTEX, HC C ₅ -C ₁₀	4 piézairs déjà en place – a minima 1 prélèvement par piézair	4 piézairs déjà en place – crépinés de 0,8 à 1,3 m/TA	PID	Hydrocarbures C ₅ -C ₁₆ (méthode TPH), naphtalène, BTEX

Les abréviations des composés / packs analytiques proposés sont décrites en Annexe 2.

Les propriétés physico-chimiques de ces composés sont présentées en Annexe 7 et les méthodes analytiques, limites de quantification et flaconnage en Annexe 8.

Les conditions de gestion des déchets issus de ces investigations sont décrites dans les paragraphes dédiés aux différents milieux.

I. SECURISATION DES INVESTIGATIONS ET DEROULEMENT DES INVESTIGATIONS

Dans le but de sécuriser l'intervention vis-à-vis des réseaux enterrés, FONDASOL a géré les DICT. Les DT/DICT conjointes ont été lancées le 07/01/2022 sous les n°2022010706090D et 2022010706097D.

Le planning pour cette mission a été le suivant :

- La campagne d'investigations sur les sols a été réalisée le 24/02/2022 et le 25/02/2022 par la société FONDASOL.
- Les piézairs ont été mis en place le 18/10/2021 par la société FONDASOL lors de l'étude antérieure (rapport PR.44EN.21.0084 – Pièce 001 en date du 17/11/2021).
- Les piézomètres ont été mis en place le 28/02/2022 et le 01/03/2022 par la société FONDASOL.
- La campagne de prélèvement sur les eaux souterraines a été réalisée le 09/03/2022 par la société FONDASOL.
- La campagne de prélèvement sur les gaz du sol a été réalisée le 31/01/2022 par la société FONDASOL.
- Les échantillons de sols sélectionnés ont été pris en charge par transporteur express le 25/02/2022 et réceptionnés par le laboratoire le 26/02/2022.
- Les échantillons d'eaux souterraines ont été pris en charge par transporteur express le 10/03/2022 et réceptionnés par le laboratoire le 11/03/2022.
- Les échantillons de gaz du sol ont été pris en charge par transporteur express le 01/02/2022 et réceptionnés par le laboratoire le 02/02/2022.
- Les derniers résultats d'analyses ont été réceptionnés le 16/03/2022.

J. INVESTIGATIONS SUR LES SOLS ET LES TERRES A EXCAVER (A200 ET A260)

Du fait des sources potentielles de contamination des sols identifiées dans l'étude historique et documentaire et des résultats des investigations initiales, des investigations complémentaires sur les sols ont été menées afin d'en caractériser la qualité environnementale.

J.1. Stratégie d'investigations sur les sols

Les investigations menées sur le secteur d'étude ont consisté en la réalisation de 15 sondages de sols à la tarière mécanique conduits jusqu'à 1,50 m/TA de profondeur.

La stratégie d'investigations est rappelée dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Stratégie d'investigations

Sondages	Enjeu		Profondeur prévisionnelle	Profondeur atteinte
	Source potentielle de pollution	Objectifs		
ST28	Remblais de qualité médiocre	Délimiter / dimensionner l'impact en hydrocarbures totaux et HAP identifié au niveau de l'angle sud-ouest du futur bâtiment (sondages SD1, SD3, ST6, PA1, PA2 et PA4)	1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST29			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST30			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST31			1,50 m/TA	1,00 m/TA
ST32			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST33			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST34			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST36			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST40			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST41			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST42			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST31		Dimensionner l'impact en PCB identifié au sud-est du site (sondage ST20)	1,50 m/TA	1,00 m/TA
ST35			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST37			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST38			1,50 m/TA	1,50 m/TA
ST39			1,50 m/TA	1,50 m/TA

Le sondage ST31 n'a pas pu être réalisé à la profondeur prévisionnelle compte tenu de refus à l'avancement liés à la présence vraisemblable de blocs ou de gros éléments métalliques.

La localisation des sondages est présentée dans la Figure 21. L'ensemble des données de terrain a été consigné et est présentée en Annexe 9.

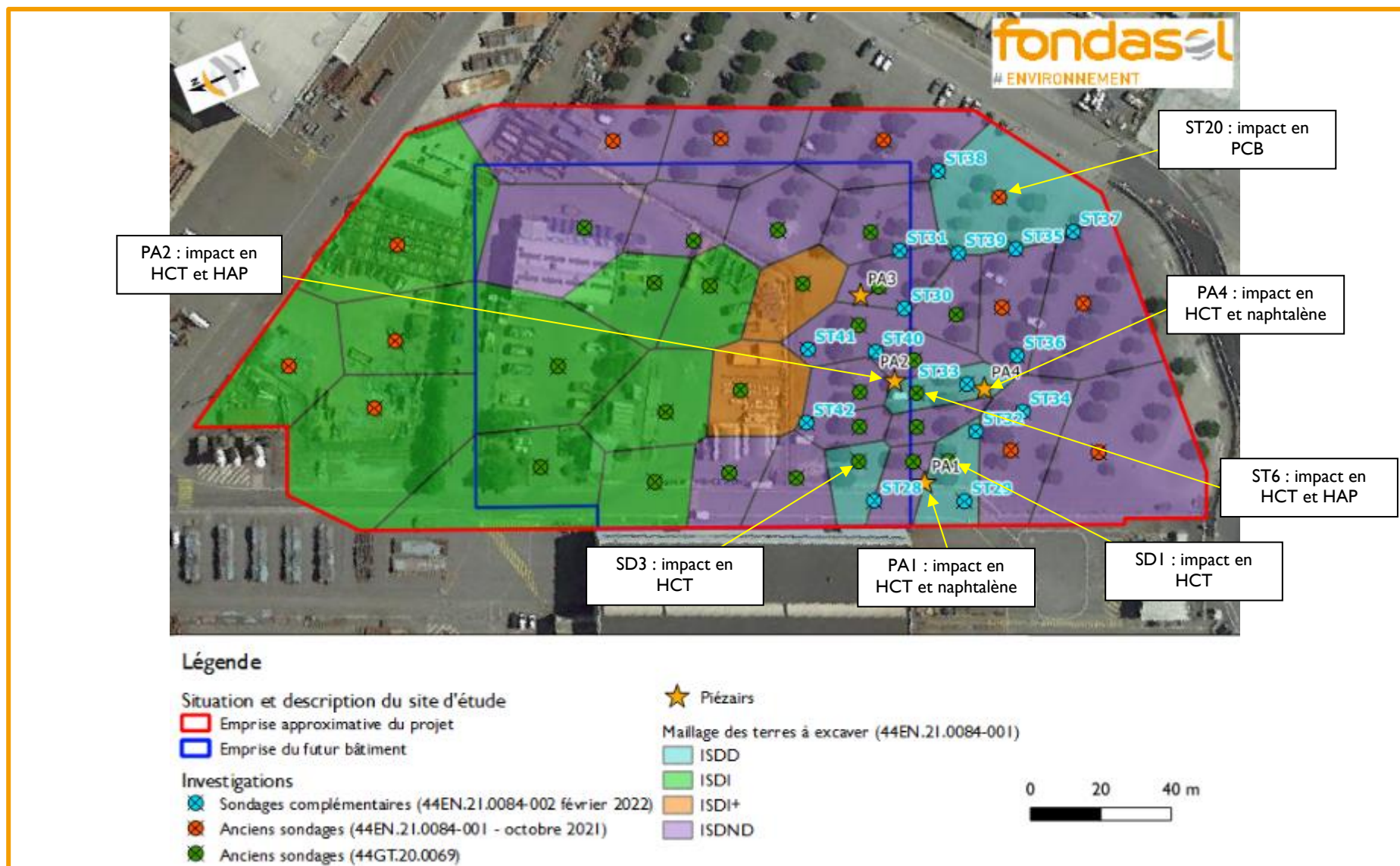


Figure 21 : Localisation des investigations sur les sols et des sources de pollution identifiées lors des études antérieures

J.2. Déroulement de la campagne de sol

Les coordonnées géographiques des sondages sont précisées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Coordonnées des points de prélèvements des sondages

Points de prélèvement	Coordonnées géographiques en Lambert 93	
	X	Y
ST28	307816.1	6699637.4
ST29	307805.9	6699613.9
ST30	307863.0	6699608.2
ST31	307878.2	6699603.1
ST32	307822.8	6699603.1
ST33	307836.2	6699600.2
ST34	307822.8	6699588.6
ST35	307865.8	6699572.6
ST36	307838.1	6699583.9
ST37	307863.9	6699555.7
ST38	307894.8	6699584.3
ST39	307871.1	6699588.1
ST40	307854.9	6699620.5
ST41	307863.0	6699637.9
ST42	307843.9	6699646.5

FONDASOL a veillé au bon état du matériel utilisé pour la réalisation des sondages et a nettoyé les outils avant et entre chaque utilisation. Les sondages ont été immédiatement rebouchés avec les cuttings de forage. Aucun matériau excédentaire n'a été laissé sur site.

Les prélèvements ont été réalisés par un technicien du Département Environnement de FONDASOL qui a procédé au relevé des coupes lithologiques et au prélèvement d'échantillons, à raison d'au moins un échantillon par mètre linéaire de terrains traversés et par faciès géologique rencontré, ou moins en cas d'identification d'indices organoleptiques. De plus, il a reporté toutes les observations utiles à la sélection des échantillons (aspect, couleur, ...) dans les fiches de prélèvements présentées en Annexe 9.

Dès leur prélèvement, les échantillons ont été conditionnés dans des flacons spécifiques fournis par le laboratoire, étiquetés sur site afin d'en assurer la traçabilité et stockés en atmosphère réfrigérée afin d'assurer leur bonne conservation jusqu'à leur arrivée au laboratoire d'analyses.

Les échantillons ont été analysés par le laboratoire AGROLAB, accrédité par le RvA – Raad voor Accreditatie – conformément aux critères des laboratoires d'analyses ISO/IEC 17025:2017, accréditation reconnue par le COFRAC.

J.3. Observations de terrain

De manière générale, les relevés lithologiques ont mis en évidence la présence :

- d'une couche superficielle d'enrobé d'environ 5 cm d'épaisseur ;
- de remblais de nature et granulométrie variable, à dominante sableuse, avec quelques passages argileux localement, jusqu'à la base des sondages (soit 1,50 m/TA). Ces remblais contiennent localement divers déchets (ferraille, plastique, bois, câbles, ...).

Aucun niveau d'eau n'a été rencontré lors des sondages. Cette information est donnée à titre indicatif, seul un suivi piézométrique permettrait de connaître les fluctuations de niveau des eaux souterraines.

Les échantillons prélevés ont fait l'objet de mesures PID (référence de l'appareil : 44EN.030) sur le terrain, afin d'évaluer le potentiel de dégazage des sols en composés organiques volatils. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 18 ci-dessous.

Le Tableau 18 ci-dessous présente une synthèse des indices organoleptiques de pollution rencontrés au droit des sondages environnementaux.

Tableau 18 : Synthèse des observations organoleptiques dans les sols

Échantillon	Observations organoleptiques	Lithologie	Mesures de terrain PID (ppm)
ST28 (0,05 - 0,40)	-	Remblais limono-sableux	1
ST28 (0,55 - 1,00)	-	Remblais sableux	1
ST28 (1,00 - 1,50)	-		0,7
ST29 (0,10 - 0,40)	-	Remblais sableux	1
ST29 (0,40 - 1,10)	-	Remblais sableux avec quelques cailloux	1
ST29 (1,10 - 1,50)	Couleur noire	Remblais sablo-graveleux	2
ST30 (0,05 - 1,00)	Couleur noire, ferraille	Remblais sableux	1,7
ST30 (1,00 - 1,50)	-	Remblais sableux	0,7
ST31 (0,05 - 1,00)	Couleur noire	Remblais sablo-graveleux	0,4
ST32 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Remblais graveleux-limoneux	7
ST32 (1,00 - 1,50)			27
ST33 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Remblais graveleux-limoneux	3,4
ST33 (1,00 - 1,50)			2,6
ST34 (0,05 - 1,00)	Couleur noire, beaucoup de ferraille	Remblais graveleux-limoneux	1,6
ST34 (1,00 - 1,50)			1,4
ST35 (0,05 - 1,00)	Couleur noire et déchets : ferraille, verre, bois, fibre	Remblais sableux	4
ST35 (1,00 - 1,50)			0,5
ST36 (0,05 - 1,00)	Couleur noire	Remblais graveleux / graveleux-limoneux	0,3
ST36 (1,00 - 1,50)		Remblais graveleux-limoneux	0,3
ST37 (0,05 - 0,50)	Couleur noire	Remblais limono-sableux	0,3
ST37 (0,50 - 1,50)	Quelques déchets	Remblais argileux	0,1
ST38 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : ferraille, fibres, bois	Remblais sableux	6
ST38 (1,00 - 1,50)			13
ST39 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : bois, ferraille, verre, fibres	Remblais sablo-graveleux	6
ST39 (1,00 - 1,50)			4
ST40 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : fibres, verre, ferraille, bois	Remblais sablo-graveleux	2
ST40 (1,00 - 1,50)			0,7
ST41 (0,05 - 1,00)	Couleur noire + déchets : plastique, ferraille, fibres, cuivre, câbles	Remblais sableux avec quelques cailloux	0,7
ST41 (1,00 - 1,50)			2
ST42 (0,10 - 0,50)	Couleur noire + déchets : ferraille, bloc, bois	Remblais graveleux / sablo-caillouteux	2
ST42 (0,50 - 1,50)	Couleur noire + déchets : ferraille, bloc, bois, fibres	Remblais sablo-graveleux	1,2

J.4. Sélection des échantillons de sols

Sur la base des observations de terrain et du projet d'aménagement prévu au droit du site, 15 échantillons de sols ont été sélectionnés afin d'obtenir une caractérisation des horizons superficiels, destinés à être excavés.

Ainsi, les échantillons envoyés en analyses et les paramètres recherchés sont présentés dans le Tableau 19.

Les propriétés physico-chimiques des composés recherchés sont présentées en Annexe 7 et les méthodes analytiques, les limites de quantification et le descriptif du flaconnage utilisé en Annexe 8.

Tableau 19 : Synthèse du programme analytique sur les sols

Sondages	Echantillons (profondeur)	Enjeu		Paramètres recherchés			
		Source potentielle de pollution	Objectifs	Pack ISDI	HV	COHV	12 ETM
ST28	ST28 (0,05 - 0,40)	Remblais de qualité médiocre	Délimiter / dimensionner l'impact en hydrocarbures totaux et HAP identifié au niveau de l'angle sud-ouest du futur bâtiment (sondages SD1, SD3, ST6, PA1, PA2 et PA4)	X	X	X	X
ST29	ST29 (0,10 - 0,40)			X	X	X	X
ST30	ST30 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST31	ST31 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST32	ST32 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST33	ST33 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST34	ST34 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST36	ST36 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST40	ST40 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST41	ST41 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST42	ST42 (0,10 - 0,50)			X	X	X	X
ST35	ST35 (0,05 - 1,00)		Dimensionner l'impact en PCB identifié au sud-est du site (sondage ST20)	X	X	X	X
ST37	ST37 (0,05 - 0,50)			X	X	X	X
ST38	ST38 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X
ST39	ST39 (0,05 - 1,00)			X	X	X	X

Les abréviations des composés / packs analytiques proposés sont décrites en Annexe 2.

J.5. Valeurs de référence pour les sols en place

Conformément à la méthodologie pour la gestion des sites et sols pollués, nous rappelons que les concentrations doivent être comparées en priorité au bruit de fond ou fond géochimique local.

En l'absence de données régionales, les données nationales suivantes sont utilisées :

- les données du programme ASPITET (INRA, 1994) pour les métaux. Les résultats et les stratégies d'interprétation sont rassemblés dans l'ouvrage de Baize D. (1997) – Teneurs totales en éléments métalliques dans les sols (INRA Editons, Paris) ;
- la base de données BDSolU qui propose des teneurs de centile 98 pour les HAP et le naphthalène pour les zones urbaines de la France entière.

Par ailleurs, pour le plomb, le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) mentionne une valeur de 300 mg (Pb)/kg sol, comme étant une valeur seuil entraînant un dépistage du saturnisme infantile. Un seuil de vigilance a également été établi à 100 mg/kg de plomb dans les sols. Ces valeurs sont des valeurs de gestion mais ne constituent pas la valeur du bruit de fond.

En l'absence de valeur caractérisant le bruit de fond pour les autres substances, un simple constat de présence ou d'absence a été réalisé en référence à des teneurs supérieures ou inférieures aux limites de quantification du laboratoire.

Les valeurs de comparaison retenues sont rappelées dans les premières colonnes des tableaux des résultats d'analyses.

J.6. Valeurs de référence pour la gestion des terres qui seront excavées

Afin d'appréhender la gestion de terres qui seront excavées dans le cadre du projet d'aménagement, les concentrations sur le sol brut et lixiviats ont été comparées aux critères d'acceptation définis dans l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) ainsi qu'aux seuils d'admission en ISDND et ISDD établis par la FNADE⁸.

Elles sont rappelées dans les premières colonnes des tableaux des résultats d'analyses.

J.7. Présentation des résultats des terres qui resteront en place

Les bordereaux d'analyses sur les sols sont présentés en Annexe 10. Le Tableau 20 présente la synthèse des résultats et la comparaison aux valeurs de référence précitées.

⁸ Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement

Tableau 20 : Résultats analytiques sur les sols en place (1/2)

Echantillons	Unité	Bruit de fond géochimique	ST28 (0.05 - 0.40)	ST29 (0.10 - 0.40)	ST30 (0.05 - 1.00)	ST31 (0.05 - 1.00)	ST32 (0.05 - 1.00)	ST33 (0.05 - 1.00)	ST34 (0.05 - 1.00)	ST35 (0.05 - 1.00)	LQ
Date de prélèvements			25.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	24.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	24.02.2022	
Faciès			Remblai limono-sableux	Remblai sableux	Remblai sableux	Remblai sablo-graveleux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai sableux	
Indice organoleptique			-	-	Couleur noire, ferraille	Couleur noire	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Couleur noire, beaucoup de ferraille	Couleur noire et déchets : ferraille, verre, bois, fibre	
Métaux Lourds											
Antimoine	mg/kg Ms		22	37	44	4.5	84	130	74	100	0.5
Arsenic	mg/kg Ms	25	58	120	150	31	250	540	74	160	1
Baryum	mg/kg Ms		440	670	580	200	140	88	540	280	1
Cadmium	mg/kg Ms	0.45	2.8	2.9	2.4	0.3	8.2	7	4.2	12	0.1
Chrome	mg/kg Ms	90	90	120	94	54	240	250	210	290	0.2
Cuivre	mg/kg Ms	20	1500	2300	1800	400	11000	6800	2200	5800	0.2
Mercur	mg/kg Ms	0.1	0.09	0.11	0.14	0.15	0.37	0.22	0.29	0.64	0.05
Molybdène	mg/kg Ms		28	48	43	10	110	120	120	110	1
Nickel	mg/kg Ms	60	120	230	210	70	640	680	150	320	0.5
Plomb	mg/kg Ms	50	890	1200	900	300	2700	3400	1200	2400	0.5
Sélénium	mg/kg Ms	0.7	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	1
Zinc	mg/kg Ms	100	16000	17000	8800	2000	24000	26000	15000	30000	1
Composés Organo Halogénés Volatils (COHV)											
Chlorure de Vinyle	mg/kg Ms		<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02
Dichlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Trichlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Tétrachlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Trichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Tétrachloroéthylène	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1,1-Trichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1,2-Trichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1-Dichloroéthane	mg/kg Ms		<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.1
1,2-Dichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
cis-1,2-Dichloroéthène	mg/kg Ms		<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	0.025
1,1-Dichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.1
Trans-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	0.025
BTEX											
Benzène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	0.081	<0.050	<0.050	0.05
Toluène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	0.071	0.15	0.48	<0.050	0.13	0.05
Ethylbenzène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	0.6	1.5	0.22	0.58	0.05
m,p-Xylène	mg/kg Ms		<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	1.8	4.1	0.15	1	0.1
o-Xylène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	0.3	0.52	<0.050	0.17	0.05
Somme Xylènes	mg/kg Ms		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.1	4.6	0.15	1.2	
Somme BTEX	mg/kg Ms		n.d.	n.d.	n.d.	0.071	2.85	6.681	0.37	1.88	
Hydrocarbures Volatils											
Fraction C5-C10	mg/kg Ms		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	6.5	10	<1.0	3.7	1
Fraction >C6-C8	mg/kg Ms		<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	3.2	6.8	0.48	2	0.4
Fraction >C8-C10	mg/kg Ms		<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	3.1	3.5	<0.40	1.7	0.4
Fraction aliphatique C5-C6	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.23	<0.20	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aliphatique >C6-C8	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.24	<0.20	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aliphatique >C8-C10	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	1.2	0.56	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aromatique >C6-C8	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	0.24	3	6.8	0.48	2	0.2
Fraction aromatique >C8-C10	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	1.9	2.9	<0.20	1.7	0.2
Hydrocarbures Totaux											
Hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg Ms		300	150	240	180	1200	2200	630	1000	20
Fraction C10-C12	mg/kg Ms		<4.0	<4.0	<4.0	<4.0	7.9	18.6	<4.0	<4.0	4
Fraction C12-C16	mg/kg Ms		<4.0	<4.0	<4.0	4.4	39.1	120	9.3	13	4
Fraction C16-C20	mg/kg Ms		19.2	16.1	21	23.1	150	210	44	88.5	2
Fraction C20-C24	mg/kg Ms		47.9	24	39.4	27	210	310	75.5	150	2
Fraction C24-C28	mg/kg Ms		89.9	43.1	65.1	40	310	520	150	270	2
Fraction C28-C32	mg/kg Ms		74	35	56	38	230	480	150	260	2
Fraction C32-C36	mg/kg Ms		42	24.3	37.9	29.2	180	370	140	190	2
Fraction C36-C40	mg/kg Ms		19.8	9	14.4	11.7	67	130	63.4	75.9	2
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)											
Acénaphtylène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	0.05
Acénaphène	mg/kg Ms		0.3	0.33	0.11	0.27	1.5	0.92	0.1	0.14	0.05
Fluorène	mg/kg Ms		0.24	0.16	<0.050	0.3	1.3	0.53	0.093	0.17	0.05
Pyrène	mg/kg Ms		2	1.6	0.74	2.4	5.6	4.2	0.66	1.3	0.05
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg Ms		1.3	1	0.65	1.5	2.6	2.3	0.5	0.86	0.05
Dibenzo(a,h)anthracène	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.10	0.2	<0.50	<0.50	<0.050	<0.10	0.05
Anthracène	mg/kg Ms		0.26	0.26	0.072	0.42	0.86	0.41	<0.050	0.22	0.05
Benzo(a)anthracène	mg/kg Ms		1.3	1	0.46	1.5	2.6	2.1	0.44	0.67	0.05
Benzo(a)pyrène	mg/kg Ms		1.4	1.1	0.64	1.4	2.5	2.3	0.33	0.88	0.05
Benzo(g,h,i)pérylène	mg/kg Ms		0.75	0.76	0.45	1.2	1.5	1.8	0.19	0.55	0.05
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg Ms		0.65	0.63	0.29	0.74	1.4	1.2	0.24	0.43	0.05
Chrysène	mg/kg Ms		1.6	1.3	0.6	1.4	3.1	2.4	0.42	0.89	0.05
Fluoranthène	mg/kg Ms		2.4	2.3	0.76	2.6	7.1	4.4	0.59	1.2	0.05
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg Ms		1	1	0.55	1	2.1	1.9	0.32	0.7	0.05
Naphtalène	mg/kg Ms	0.15	0.092	0.087	<0.050	0.08	0.77	0.89	0.15	0.36	0.05
Phénanthrène	mg/kg Ms		1.6	1.3	0.4	2	4.9	2.4	0.43	0.88	0.05
Somme HAP (EPA)	mg/kg Ms	14.7	14.9	12.8	5.72	17	37.8	27.8	4.46	9.25	
PCB											
PCB (28)	mg/kg Ms		0.002	<0.001	0.002	0.001	0.018	0.026	0.003	0.038	0.001
PCB (52)	mg/kg Ms		0.035	0.005	0.014	0.008	0.07	0.046	0.012	0.059	0.001
PCB (101)	mg/kg Ms		0.11	0.02	0.044	0.021	0.12	0.086	0.032	0.088	0.001
PCB (118)	mg/kg Ms		0.059	0.01	0.023	0.015	0.1	0.067	0.017	0.056	0.001
PCB (138)	mg/kg Ms		0.11	0.032	0.047	0.033	0.11	0.084	0.042	0.1	0.001
PCB (153)	mg/kg Ms		0.088	0.027	0.036	0.026	0.091	0.066	0.042	0.09	0.001
PCB (180)	mg/kg Ms		0.048	0.02	0.016	0.02	0.041	0.032	0.029	0.059	0.001
Somme PCB (7)	mg/kg Ms		0.45	0.11	0.18	0.12	0.55	0.41	0.18	0.49	

Tableau 21 : Résultats analytiques sur les sols en place (2/2)

Echantillons	Unité	Bruit de fond géochimique	ST36 (0.05 - 1.00)	ST37 (0.05 - 0.50)	ST38 (0.05 - 1.00)	ST39 (0.05 - 1.00)	ST40 (0.05 - 1.00)	ST41 (0.05 - 1.00)	ST42 (0.10 - 0.50)	LQ
Date de prélèvements			24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	
Faciès			Remblai graveleux / gravelo-limoneux	Remblai limono-sableux	Remblai sableux	Remblai sablo-graveleux	Remblai sablo-graveleux	Remblai sableux avec quelques cailloux	Remblai graveleux / sablo-caillouteux	
Indice organoleptique			Couleur noire	Couleur noire	Couleur noire + déchets : ferraille, fibres, bois	Couleur noire + déchets : bois, ferraille, verre, fibres	Couleur noire + déchets : bois, ferraille, verre, fibres	Couleur noire + déchets : plastique, ferraille, fibres, cuivre, câbles	Couleur noire + déchets : ferraille, bloc, bois	
Métaux Lourds										
Antimoine	mg/kg Ms		89	19	96	73	65	400	33	0.5
Arsenic	mg/kg Ms	25	130	84	270	290	86	72	36	I
Baryum	mg/kg Ms		230	420	330	180	460	810	350	I
Cadmium	mg/kg Ms	0.45	8.3	1.4	6.3	8.6	5	3.9	1.7	0.1
Chrome	mg/kg Ms	90	240	82	210	270	180	290	100	0.2
Cuivre	mg/kg Ms	20	4600	870	7000	5200	2900	26000	1200	0.2
Mercur	mg/kg Ms	0.1	0.47	0.19	0.23	0.42	0.18	0.27	0.62	0.05
Molybdène	mg/kg Ms		82	17	120	100	61	49	32	I
Nickel	mg/kg Ms	60	330	91	510	760	260	290	130	0.5
Plomb	mg/kg Ms	50	3200	560	1800	2200	990	1500	480	0.5
Sélénium	mg/kg Ms	0.7	<2.0	<1.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<1.0	I
Zinc	mg/kg Ms	100	33000	9600	21000	24000	13000	12000	8200	I
Composés Organo Halogénés Volatils (COHV)										
Chlorure de Vinyle	mg/kg Ms		<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02
Dichlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Trichlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Tétrachlorométhane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Trichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
Tétrachloroéthylène	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1,1-Trichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1,2-Trichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
1,1-Dichloroéthane	mg/kg Ms		<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.1
1,2-Dichloroéthane	mg/kg Ms		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
cis-1,2-Dichloroéthène	mg/kg Ms		<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	0.025
1,1-Dichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.1
Trans-1,2-Dichloroéthylène	mg/kg Ms		<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	0.025
BTEX										
Benzène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	0.07	0.071	0.079	<0.050	<0.050	0.05
Toluène	mg/kg Ms		0.097	0.07	0.26	0.37	0.15	<0.050	<0.050	0.05
Ethylbenzène	mg/kg Ms		0.42	0.14	3	2.1	1.4	0.064	<0.050	0.05
m,p-Xylène	mg/kg Ms		0.63	0.25	4.9	3.8	2.1	0.19	0.12	0.1
o-Xylène	mg/kg Ms		0.059	<0.050	1	0.67	0.2	<0.050	<0.050	0.05
Somme Xylènes	mg/kg Ms		0.69	0.25	5.9	4.5	2.3	0.19	0.12	
Somme BTEX	mg/kg Ms		1.206	0.46	9.23	7.011	3.929	0.254	0.12	
Hydrocarbures Volatils										
Fraction C5-C10	mg/kg Ms		2	<1.0	14	23	20	<1.0	<1.0	I
Fraction >C6-C8	mg/kg Ms		1.3	0.54	9.7	7.4	4.5	<0.40	<0.40	0.4
Fraction >C8-C10	mg/kg Ms		0.73	<0.40	3.9	15	15	<0.40	<0.40	0.4
Fraction aliphatique C5-C6	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	0.31	0.34	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aliphatique >C6-C8	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	0.26	0.39	0.59	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aliphatique >C8-C10	mg/kg Ms		<0.20	<0.20	<0.20	1.5	4.7	<0.20	<0.20	0.2
Fraction aromatique >C6-C8	mg/kg Ms		1.3	0.54	9.4	7	3.9	0.36	0.24	0.2
Fraction aromatique >C8-C10	mg/kg Ms		0.73	0.32	3.9	13	10	<0.20	0.23	0.2
Hydrocarbures Totaux										
Hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg Ms		1500	330	1100	1000	1100	440	370	20
Fraction C10-C12	mg/kg Ms		<4.0	<4.0	7	6	17.7	<4.0	9.2	4
Fraction C12-C16	mg/kg Ms		11.8	<4.0	23	7.7	15.2	<4.0	35.6	4
Fraction C16-C20	mg/kg Ms		120	32.3	110	67.3	93.8	24.4	40.3	2
Fraction C20-C24	mg/kg Ms		290	58	170	130	170	54	43.7	2
Fraction C24-C28	mg/kg Ms		510	85.6	270	250	310	110	73.1	2
Fraction C28-C32	mg/kg Ms		320	76	240	260	260	110	75	2
Fraction C32-C36	mg/kg Ms		190	53.5	190	200	180	90.7	65.2	2
Fraction C36-C40	mg/kg Ms		61.9	23.7	74.5	97.8	66.7	40.7	31.6	2
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)										
Acénaphtylène	mg/kg Ms		<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	0.05
Acénaphène	mg/kg Ms		0.21	0.21	0.39	0.22	1.8	0.27	6.4	0.05
Fluorène	mg/kg Ms		0.32	0.17	0.23	0.11	<1.0	0.12	4.1	0.05
Pyrène	mg/kg Ms		1.1	0.85	1.7	2	4	1.6	4.5	0.05
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg Ms		0.83	0.7	1.3	1.3	2.2	0.99	2.3	0.05
Dibenzo(a,h)anthracène	mg/kg Ms		<0.10	<0.050	<0.20	<0.20	<0.50	<0.10	<0.50	0.05
Anthracène	mg/kg Ms		0.11	0.16	0.26	0.11	0.85	0.25	1.9	0.05
Benzo(a)anthracène	mg/kg Ms		0.51	0.7	0.99	1	2.2	1.1	3.2	0.05
Benzo(a)pyrène	mg/kg Ms		0.66	0.69	1.1	1.3	2.2	0.76	2.5	0.05
Benzo(g,h,i)pérylène	mg/kg Ms		0.5	0.28	0.79	0.8	1.4	0.58	1.3	0.05
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg Ms		0.41	0.39	0.6	0.68	1.1	0.46	1.4	0.05
Chrysène	mg/kg Ms		0.72	0.79	1.3	1.3	2.5	0.92	3.4	0.05
Fluoranthène	mg/kg Ms		1.1	1.1	2.1	1.9	5.4	1.9	6.3	0.05
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg Ms		0.71	0.53	0.89	1	1.7	0.6	1.8	0.05
Naphtalène	mg/kg Ms	0.15	0.3	0.14	0.6	0.25	0.41	0.13	7.4	0.05
Phénanthrène	mg/kg Ms		0.83	0.63	1.1	0.86	4.1	1.2	6.5	0.05
Somme HAP (EPA)	mg/kg Ms	14.7	8.31	7.34	13.4	12.8	29.9	10.9	53	
PCB										
PCB (28)	mg/kg Ms		0.037	0.028	0.16	0.051	0.007	0.002	0.016	0.001
PCB (52)	mg/kg Ms		0.13	0.03	0.63	0.13	0.024	0.009	0.024	0.001
PCB (101)	mg/kg Ms		0.64	0.033	0.75	0.18	0.052	0.021	0.04	0.001
PCB (118)	mg/kg Ms		0.3	0.021	0.54	0.13	0.031	0.012	0.023	0.001
PCB (138)	mg/kg Ms		1.4	0.032	0.39	0.15	0.052	0.026	0.045	0.001
PCB (153)	mg/kg Ms		1.7	0.028	0.27	0.11	0.049	0.021	0.043	0.001
PCB (180)	mg/kg Ms		1.5	0.017	0.099	0.048	0.034	0.015	0.029	0.001
Somme PCB (7)	mg/kg Ms		5.7	0.19	2.8	0.8	0.25	0.11	0.22	

J.8. Interprétation des résultats des sols en place

Les analyses des échantillons de sol mettent en évidence des contaminations dans la plupart des types de polluants recherchés. Ces contaminations sont globalement généralisées au droit des sondages réalisés, et aucune répartition spatiale franche n'est identifiée.

Des anomalies généralisées en métaux lourds sont confirmées, avec des teneurs systématiquement supérieures au bruit de fond géochimique (très souvent plus de 3 fois supérieures). En particulier, on note de très fortes teneurs en cuivre, plomb et zinc, avec des teneurs au moins 10 fois supérieures au bruit de fond dans la quasi-totalité des échantillons, et atteignant jusqu'à 26 000 mg/kg MS pour le cuivre, 3 400 mg/kg MS pour le plomb et 33 000 mg/kg MS pour le zinc.

Les analyses mettent également en évidence la présence généralisée en hydrocarbures C10-C40, avec des teneurs plus de 10 fois supérieures à la limite de quantification (20 mg/kg MS) dans la plupart des échantillons, et atteignant jusqu'à 2 200 mg/kg MS. Des fractions volatiles (C5-C16) sont présentes au droit de l'ensemble des sondages sauf ST28, ST29 et ST30, et plus particulièrement dans les sondages ST33, ST38, ST39 et ST40, où les teneurs en HC C5-C10 sont plus de 10 fois supérieures à la LQ.

L'anomalie en hydrocarbures volatiles est corrélée à la présence de BTEX dans l'ensemble des échantillons sauf ceux provenant des sondages ST28, ST29 et ST30.

Les résultats d'analyse montrent des impacts en HAP et en naphtalène, avec des teneurs significativement supérieures au bruit de fond dans une majorité de sondages (à l'exception de ST29, ST30, ST34, ST37, et ST41), le plus souvent associés aux fortes teneurs en hydrocarbures.

Des PCB ont été quantifiés dans l'ensemble des échantillons, avec des teneurs significativement supérieures à la limite de quantification. Notamment, des teneurs remarquables de 5,7 et 2,8 mg/kg MS ont été mesurées dans les échantillons ST36 (0.05 - 1.00) et ST38 (0.05 - 1.00), dans la partie sud-est du site, où un impact avait été identifié lors de l'étude antérieure.

Enfin, aucun COHV n'a été quantifié dans les échantillons analysés.

La synthèse cartographique des teneurs remarquables dans les sols est présentée dans la Figure 22 et la Figure 23.

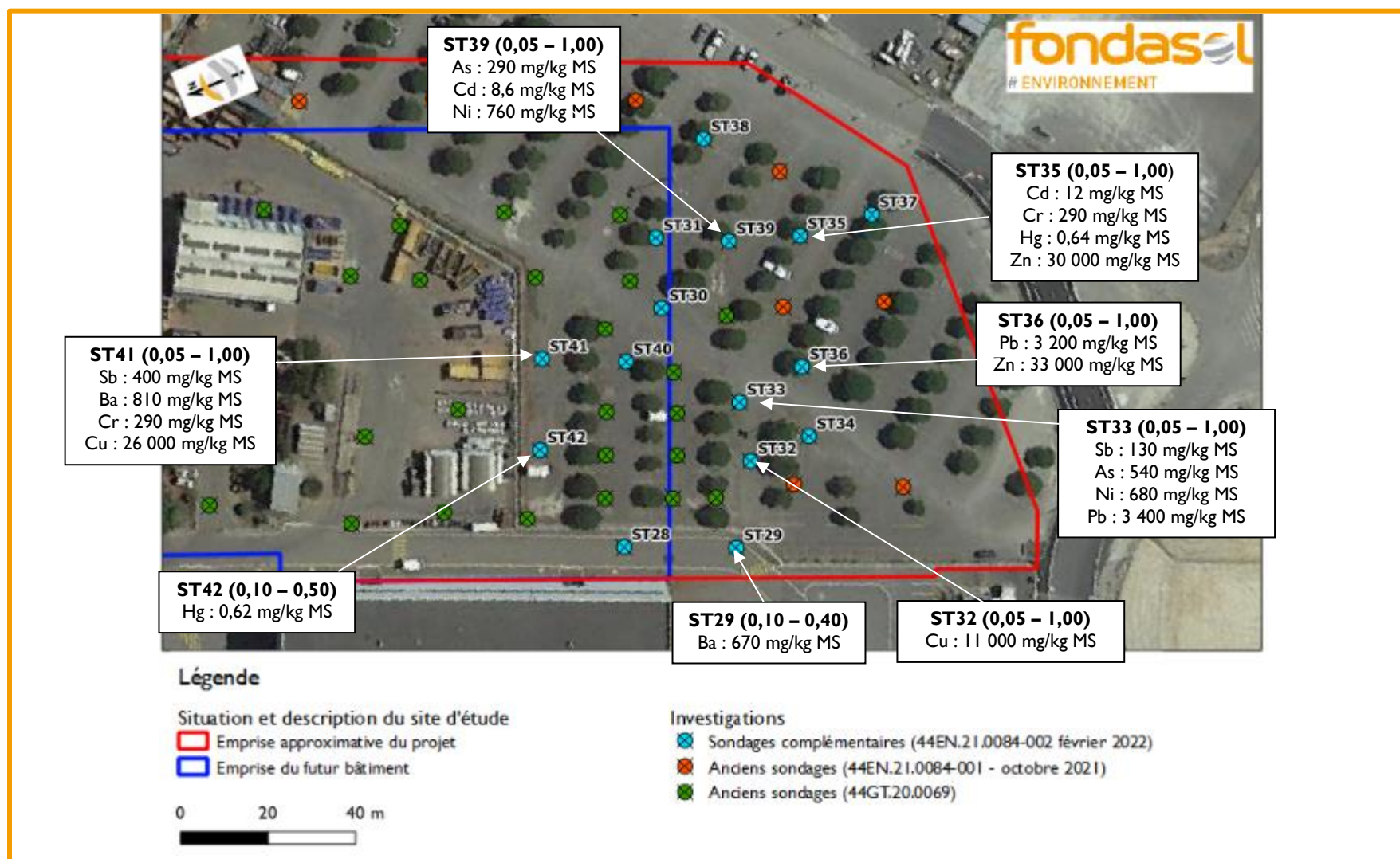


Figure 22 : Synthèse cartographique des teneurs remarquables en métaux dans les sols en place

Nota : on entend par teneur remarquable toute teneur sensiblement supérieure aux autres données sur le site (centile 90 – cf. paragraphe O.2.2.1).

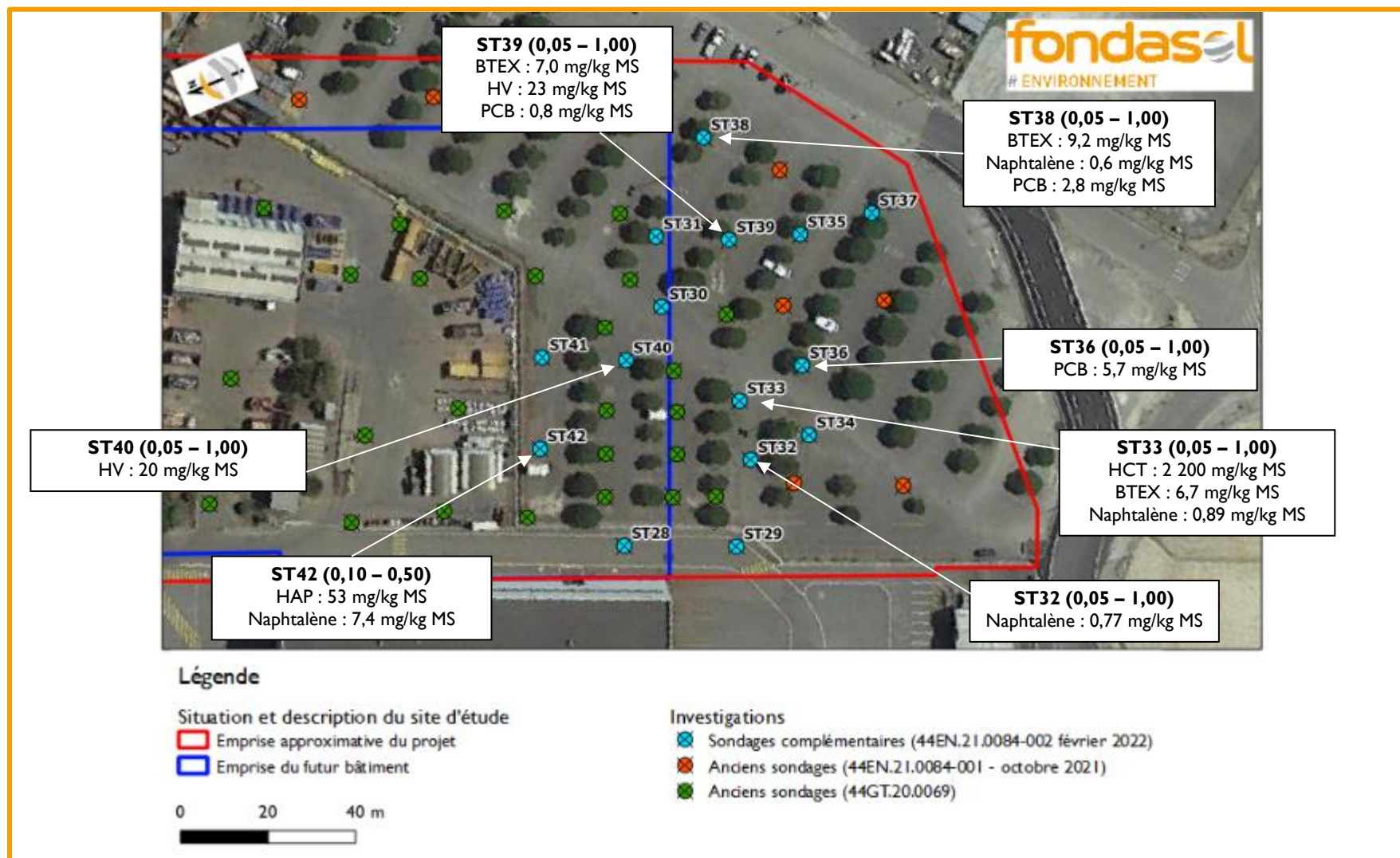


Figure 23 : Synthèse cartographique des teneurs remarquables dans les sols en place (hydrocarbures et PCB)

Nota : sont représentées les teneurs sensiblement supérieures aux autres données sur le site (centile 90 cf. paragraphe O.2.2.1).

J.9. Présentation des résultats des terres qui seront excavées

Les bordereaux d'analyses sur les sols sont présentés en Annexe 10. Le Tableau 22 présente la synthèse des résultats et la comparaison aux valeurs de référence précitées.

Tableau 22 : Résultats analytiques sur les terres qui seront excavées

Echantillons	Unité	Seuils ISDD	Seuils ISDND	Seuils ISDI+	Seuils ISDI - Arrêté du 12/12/2014	ST28 (0.05 - 0.40)	ST29 (0.10 - 0.40)	ST30 (0.05 - 1.00)	ST31 (0.05 - 1.00)	ST32 (0.05 - 1.00)	ST33 (0.05 - 1.00)	ST34 (0.05 - 1.00)	ST35 (0.05 - 1.00)	ST36 (0.05 - 1.00)	ST37 (0.05 - 0.50)	ST38 (0.05 - 1.00)	ST39 (0.05 - 1.00)	ST40 (0.05 - 1.00)	ST41 (0.05 - 1.00)	ST42 (0.10 - 0.50)	LQ
Date de prélèvements						25.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	24.02.2022	25.02.2022	25.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	24.02.2022	
Faciès						Remblai limono-sableux	Remblai sableux	Remblai sableux	Remblai sablo-graveleux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai gravelo-limoneux	Remblai sableux	Remblai graveleux / gravelo-limoneux	Remblai limono-sableux	Remblai sableux	Remblai sablo-graveleux	Remblai sablo-graveleux	Remblai sableux avec quelques cailloux	Remblai graveleux / sablo-caillouteux	
Indice organoleptique						-	-	Couleur noire, ferraille	Couleur noire	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Couleur noire + déchets : fils électriques, ferraille, fibres, racines, plastique	Couleur noire, beaucoup de ferraille	Couleur noire et déchets : ferraille, verre, bois, fibre	Couleur noire	Couleur noire	Couleur noire + déchets : ferraille, fibres, bois	Couleur noire + déchets : bois, ferraille, verre, fibres	Couleur noire + déchets : bois, ferraille, verre, fibres	Couleur noire + déchets : plastique, ferraille, fibres, cuivre, câbles	Couleur noire + déchets : ferraille, bloc, bois	
Paramètres																					
Analyses sur brut																					
Matière sèche	%	30	30			93.6	93.1	93.3	91.1	91	91	88.2	86.2	86.4	81.1	87.7	89.6	87.1	89.5	91	0.01
COT Carbone Organique Total	mg/kg Ms	100 000	50 000	30 000	30 000	6 700	7 700	6 700	13 000	15 000	22 000	22 000	26 000	19 000	9 500	19 000	17 000	33 000	19 000	12 000	1000
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)																					
Somme HAP (EPA)	mg/kg Ms	5 000	500	50	50	14.9	12.8	5.72	17	37.8	27.8	4.46	9.25	8.31	7.34	13.4	12.8	29.9	10.9	53	
BTEX																					
Somme BTEX	mg/kg Ms	2 000	30	6	6	n.d.	n.d.	n.d.	0.071	2.85	6.681	0.37	1.88	1.206	0.46	9.23	7.011	3.929	0.254	0.12	
Hydrocarbures Totaux																					
Hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg Ms	50 000	5 000	500	500	300	150	240	180	1 200	2 200	630	1 000	1 500	330	1 100	1 000	1 100	440	370	20
PCB																					
Somme PCB (7)	mg/kg Ms	50	10	1	1	0.45	0.11	0.18	0.12	0.55	0.41	0.18	0.49	5.7	0.19	2.8	0.8	0.25	0.11	0.22	
Analyses sur éluat																					
Métaux Lourds																					
Antimoine	mg/kg Ms	5	2.1	0.18	0.06	0.14	0.23	0.21	0.06	0.73	1.6	0 - 0.05	0.32	0.39	0.23	0.79	0.29	0.24	0.08	0.21	0.05
Arsenic	mg/kg Ms	25	4	1.5	0.5	0.09	0.6	0.1	0.1	0.22	0.51	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.28	0.17	0.16	0.06	0 - 0.05	0 - 0.05	0.05
Baryum	mg/kg Ms	300	100	60	20	0.52	0.36	0.9	0.27	0.83	0.81	1.5	0.65	1.5	0.41	0.97	0.8	1.7	0.51	0.57	0.1
Cadmium	mg/kg Ms	5	2	0.12	0.04	0.001	0 - 0.001	0 - 0.001	0 - 0.001	0 - 0.001	0.001	0 - 0.001	0.001	0.001	0 - 0.001	0.002	0.001	0.003	0 - 0.001	0 - 0.001	0.001
Chrome	mg/kg Ms	70	10	1.5	0.5	0.05	0.05	0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0 - 0.02	0.13	0.03	0 - 0.02	0 - 0.02	0.03	0.02
Cuivre	mg/kg Ms	100	50	6	2	0.11	0.16	0.09	0.07	0.69	0.64	0.05	0.33	0.13	0.36	0.9	0.52	0.18	0.49	0.11	0.02
Mercure	mg/kg Ms	2	0.6	0.03	0.01	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0 - 0.0003	0.0003
Molybdène	mg/kg Ms	30	15	1.5	0.5	0.85	0.24	0.95	0.54	1.5	2.1	0.62	2.3	1.1	0.53	3.6	2.2	1.5	0.71	0.59	0.05
Nickel	mg/kg Ms	40	10	1.2	0.4	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.06	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.17	0 - 0.05	0 - 0.05	0.05
Plomb	mg/kg Ms	50	10	1.5	0.5	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.07	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.08	0.08	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.05
Sélénium	mg/kg Ms	7	1.5	0.3	0.1	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0 - 0.05	0.05
Zinc	mg/kg Ms	200	50	12	4	0.57	0.29	0.36	0.02	0.41	0.45	0.19	0.26	0.54	0.06	1	0.83	1.2	0.34	0.22	0.02
Balance ionique																					
COT	mg/kg Ms	1 000	800	800	500	16	10	0 - 10	13	77	91	32	50	39	43	52	42	52	16	19	10
Fraction soluble	mg/kg Ms	100 000	60 000	12 000	4 000	1 500	1 300	1 600	1 900	3 500	2 200	2 300	3 400	2 200	6 800	2 200	2 200	2 800	3 100	1 300	1000
Chlorures	mg/kg Ms	15 000	15 000	2 400	800	74	84	8	80	380	200	470	130	84	140	390	160	370	130	51	1
Fluorures	mg/kg Ms	500	150	30	10	20	19	32	9	38	33	40	99	55	23	39	32	42	50	38	1
Sulfates	mg/kg Ms	20 000	20 000	3 000	1 000	460	200	350	780	1 100	670	360	1 400	360	3 800	560	730	560	1 100	360	50
Indice phénol	mg/kg Ms	200	50	1	1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0 - 0.1	0.1
Filière d'évacuation recommandée						ISDI+	ISDND	ISDND	ISDI+	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	ISDND	

J.10. Interprétation des résultats des terres qui seront excavées dans le cadre du projet

Les analyses ont mis en évidence la présence de dépassements de certains critères de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) :

- sur brut : BTEX, HAP, HCT et PCB ;
- sur éluât : antimoine, arsenic, molybdène, fraction soluble, fluorures et sulfates.

Une partie des terres excavées devra donc faire l'objet d'une gestion spécifique qui induira des surcoûts.

L'arrêté du 12 décembre 2014 précise que des dépassements de seuils peuvent être acceptés pour le COT sur brut selon la règle suivante : « *Le déchet peut être jugé conforme aux critères ISDI en cas de dépassement du seuil sur lixiviat si la valeur limite de 500 mg/kg de matière sèche est respectée sur éluât, soit au pH du sol, soit pour un pH situé entre 7,5 et 8,0* ».

Cette règle étant respectée sur l'échantillon ST40 (0,05 – 1,00), le dépassement en COT sur brut ne sera pas considéré comme discriminatoire dans le choix du centre de prise en charge.

De plus, selon le même arrêté, si des dépassements à au moins l'une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble sont observées, le déchet peut encore être jugé conforme si : « *Il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble* ».

Cette règle étant respectée pour les échantillons ST32 (0,05 – 1,00), ST35 (0,05 – 1,00) et ST41 (0,05 – 1,00), les dépassements en sulfates ne seront pas considérés comme discriminatoires dans le choix du centre de prise en charge.

Conformément à l'article 6 de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux ISDI, une adaptation des critères d'acceptation peut être utilisée pour permettre le stockage de déchets dont la composition correspond au fond géochimique local. Sont considérées comme acceptables en filière ISDI dite aménagée (ISDI+) des terres présentant des teneurs sur lixiviats ne dépassant pas 3 fois les valeurs limites sur la lixiviation des critères d'acceptation initiaux (facteur 2 pour le COT).

La couleur noire ou la présence de forte odeur d'hydrocarbures peut entraîner un refus de la part des ISDI ou ISDI+. En cas de refus, les terres sont à envoyer en ISDND. Ceci est le cas par exemple pour l'échantillon ST31 (0,05-1,00).

Le plan de terrassement et le calcul des volumes et des surcoûts liés à la gestion des terres non inertes qui seront excavées dans le cadre de la réalisation du projet sont présentés dans le paragraphe M.

La synthèse cartographique des teneurs non inertes est présentée dans la Figure 24.

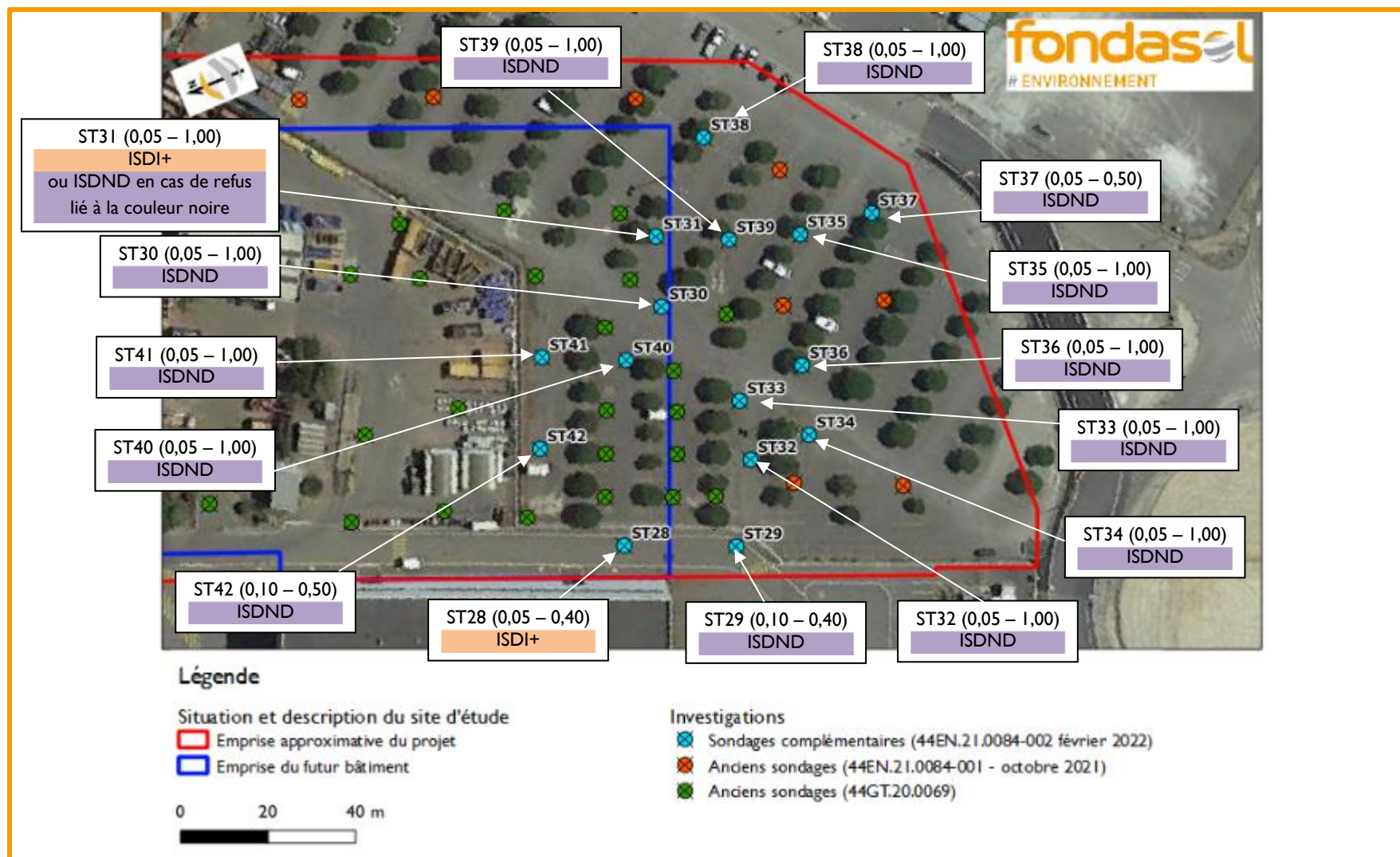


Figure 24 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses sur les terres qui seront excavées

K. INVESTIGATIONS SUR LES EAUX SOUTERRAINES (A210)

K.1. Rappel du contexte et objectifs des prélèvements des eaux souterraines

Compte tenu de la mise en évidence d'impacts dans les sols et de la faible profondeur de la nappe au droit du site, des investigations sur les eaux souterraines ont été réalisées afin d'en caractériser la qualité.

K.2. Pose des ouvrages

Afin de répondre aux objectifs de cette étude, 3 piézomètres ont été posés au droit du site.

Compte tenu de la profondeur de nappe attendue au droit du site, les piézomètres ont été forés et équipés jusqu'à 6 m/TA de profondeur au maximum.

Au regard des sens d'écoulement théoriques identifiés préalablement, il a été réalisé 1 piézomètre en amont théorique et 2 piézomètres en aval théorique.

Le fluide utilisé pour le forage est l'eau. Un technicien spécialisé en sites et sols pollués a supervisé le suivi et la pose des piézomètres afin qu'ils répondent aux exigences des normes en vigueur et permettent d'obtenir un point de prélèvement représentatif des eaux souterraines et a procédé au relevé des coupes lithologiques.

La Figure 25 précise la localisation des piézomètres.

Le piézomètre PZ1 n'a pas pu être réalisé à la profondeur prévisionnelle initialement envisagée compte tenu du refus à l'avancement.

K.3. Définition du réseau piézométrique

Le réseau de surveillance des eaux souterraines retenu pour la campagne de prélèvements dans le cadre de cette étude est présenté dans le Tableau 23.

Les ouvrages ont été nivelés en relatif et raccordé à un point de référence du site.

Tableau 23 : Coordonnées de points de prélèvements des eaux souterraines

Points de prélèvement	Coordonnées géographiques WGS 84 : 4326		
	X	Y	Z
PZ1	-2.19200145	47.28023017	4,66
PZ2	-2.19076597	47.28046648	4,66
PZ3	-2.19076199	47.28238467	4,39

Le niveau piézométrique a été mesuré dans l'ensemble des ouvrages le 09/03/2022. Les résultats sont donnés dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Mesures piézométriques

Ouvrage	Cote du repère (m NGF)	Nature du repère	Niveau nappe / repère (m)	Epaisseur de flottant (m)	Cote de la nappe (m NGF)	Implantation / positionnement
Campagne du 09/03/2022						
PZ1	4,66	Sol	2,83	0	1,83	Aval
PZ2	4,66	Sol	2,63	0	2,03	Latéral
PZ3	4,39	Sol	2,13	0	2,26	Amont

Au regard de ces mesures, les eaux souterraines s'écouleraient du nord-est vers le sud-ouest au droit du site ce qui est partiellement cohérent avec le sens d'écoulement théorique. La carte piézométrique est présentée en Figure 25.

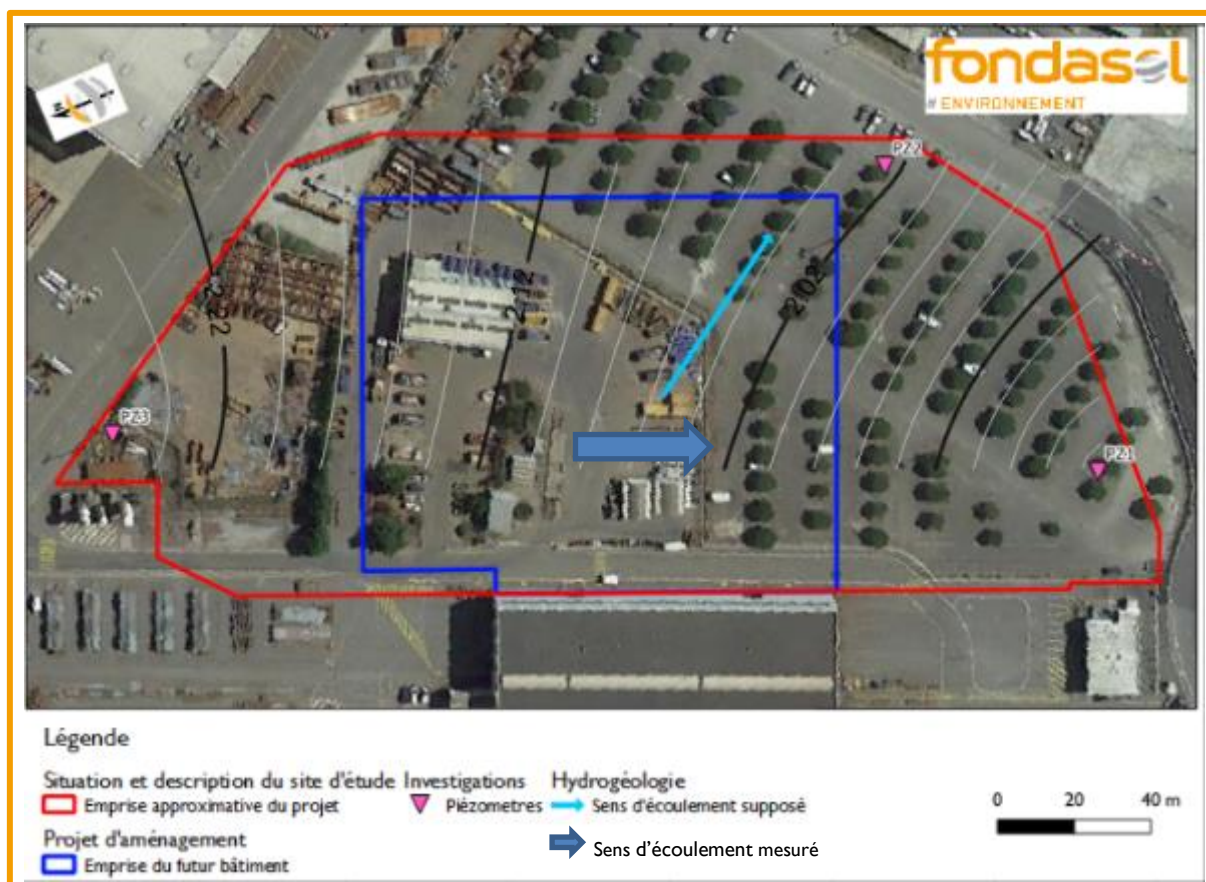


Figure 25 : Plan de localisation des piézomètres et esquisse piézométrique

K.4. Déroulement de la campagne de prélèvements des eaux souterraines

Les prélèvements ont été réalisés le 09/03/2022 par un technicien du Département Environnement de FONDASOL de l'ouvrage amont vers les ouvrages aval.

Les observations de terrain (aspect, couleur, paramètres physico-chimiques, ...) sont reportées dans les fiches de prélèvement présentées en Annexe II.

Compte tenu de l'absence de produit flottant ou plongeant, les prélèvements d'eau ont été effectués au moyen d'un pompage permettant de renouveler plus de 3 fois le volume d'eau dans l'ouvrage de façon à constituer un échantillon représentatif de la qualité des eaux souterraines. Les eaux de purge ont été déversées dans un avaloir du site relié à un séparateur d'hydrocarbures / rejetées dans le milieu naturel après passage sur un support de filtration adapté (filtre à charbon actif portatif).

Les eaux prélevées n'ont pas été filtrées sur site. La filtration a été réalisée au laboratoire avant l'analyse des métaux. Le stabilisant présent dans le flaconnage adapté aux métaux a donc été vidé.

FONDASOL a veillé au bon état du matériel utilisé pour la réalisation des prélèvements. Il a été utilisé du matériel à usage unique pour la réalisation des prélèvements.

Dès leur prélèvement, les échantillons ont été conditionnés dans des flaconnages spécifiques fournis par le laboratoire (cf. Annexe 8), étiquetés sur site afin d'en assurer la traçabilité et stockés en atmosphère réfrigérée afin d'assurer leur bonne conservation jusqu'à leur arrivée au laboratoire d'analyses.

Les échantillons ont été analysés par le laboratoire AGROLAB, accrédité par le RvA – Raad voor Accreditatie – conformément aux critères des laboratoires d'analyses ISO/IEC 17025 :2017, accréditation reconnue par le COFRAC.

K.5. Programme analytique sur les eaux souterraines

L'objectif des investigations dans les eaux souterraines est de déterminer la présence ou non d'impact engendré par une pollution avérée dans les sols lors des campagnes initiales.

Le programme analytique est défini dans le Tableau 25.

Les propriétés physico-chimiques des composés recherchés sont présentées en Annexe 7 et les méthodes analytiques, les limites de quantification et le descriptif du flaconnage utilisé en Annexe 8.

Tableau 25 : Descriptif du programme analytique sur les eaux souterraines

Piézomètres	Paramètres recherchés						
	HCT	HV	HAP	BTEX	COHV	8 ETM	PCB
PZ1	x	x	x	x	x	x	x
PZ2	x	x	x	x	x	x	x
PZ3	x	x	x	x	x	x	x

Les abréviations des composés / packs analytiques proposés sont décrites en Annexe 2.

K.6. Valeurs de référence pour les eaux souterraines

Les résultats des analyses d'eaux souterraines sont comparés⁹ :

- entre les résultats amont et les résultats aval ;
- aux valeurs de « limite de qualité » de l'Annexe I de l'Arrêté du 11 janvier 2007 (modifié par les arrêtés du 9 décembre, du 4 août 2017 et du 19 octobre 2017), qui constituent les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées ; ces valeurs s'appliqueraient effectivement si l'eau prélevée était directement destinée à la consommation humaine ;
- aux valeurs de « références de qualité » de la partie II de l'annexe I de l'Arrêté du 11 janvier 2007 (modifié par l'arrêté du 4 août 2017) pour les eaux destinées à la consommation humaine ; les valeurs doivent être respectées au point d'utilisation de l'eau pour la consommation humaine ;

⁹ conformément au rapport de « synthèse des données réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 30 juin 2020 » - rapport 20-200358-2190502-v 1.0 du 19/10/2020

- aux valeurs seuils de l'Annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007 (modifié par l'arrêté du 4 août 2017), qui constituent les limites de qualité des eaux brutes de toute origine utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux de source conditionnées, pris en application des dispositions prévues aux articles R. 1321-7(II), R. 1321-17 et R.1321-42 du Code de Santé Publique ; ces valeurs sont communément appelées « limites de potabilisation des eaux » et s'appliqueraient effectivement si un captage d'eau potable était réalisé au niveau du piézomètre considéré ;
- mais également aux valeurs de la directive (UE) 2020/2184 du 16/12/2020 modifiant la directive 98/83/CE.

Les valeurs de comparaison retenues sont rappelées dans les premières colonnes des tableaux des résultats d'analyses.

K.7. Présentation des résultats des eaux souterraines

Le bordereau d'analyses sur les eaux souterraines est présenté en Annexe I2. Le Tableau 26 présente la synthèse des résultats.

Tableau 26 : Résultats analytiques sur les eaux souterraines

Echantillon	Unité	Arrêté du 11 janvier 2007, modifié par les arrêtés du 9 décembre , du 4 août 2017 et du 19 octobre 2017	Arrêté du 11 janvier 2007, modifié par l'arrêté du 4 août 2017	Arrêté du 11 janvier 2007, modifié par l'arrêté du 4 août 2017	PZ1	PZ2	PZ3
Date de prélèvement		Eaux destinées à la consommation humaine		Eaux brutes utilisées pour la production d'eau desrtinée à la consommation humaine	09.03.2022	09.03.2022	09.03.2022
Position hydraulique		Limite de qualité (annexe I)	Références de qualité (annexe I, partie II)	(annexe II)	Aval	Latéral	Amont
Métaux lourds							
Arsenic	µg/l	10	-	100	<5,0	26	20
Cadmium	µg/l	5	-	5	<0,10	<0,10	<0,10
Chrome	µg/l	50	-	50	<2,0	<2,0	<2,0
Cuivre	µg/l	1000	1000	-	<2,0	<2,0	<2,0
Mercure	µg/l	1	-	1	<0,030	<0,030	<0,030
Nickel	µg/l	20	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Plomb	µg/l	10	-	50	<5,0	<5,0	<5,0
Zinc	µg/l	-	-	5000	3,6	3,9	6,5
Composés Organo Halogénés Volatils (COHV)							
Chlorure de Vinyle	µg/l	0,5	-	-	<0,2	<0,2	<0,2
Dichlorométhane	µg/l	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
Trichlorométhane	µg/l	-	-	-	<0,5	<0,5	1,8
Tétrachlorométhane	µg/l	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1
Trichloroéthylène	µg/l	10	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
Tétrachloroéthylène	µg/l		-	-	<0,1	<0,1	<0,1
1,1,1-Trichloroéthane	µg/l	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
1,1,2-Trichloroéthane	µg/l	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
1,1-Dichloroéthane	µg/l	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
1,2-Dichloroéthane	µg/l	3	-	-	<2,1	<0,5	<0,5
cis-1,2-Dichloroéthène	µg/l	-	-	-	<0,50	<0,50	<0,50
1,1-Dichloroéthylène	µg/l	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1
Trans-1,2-Dichloroéthylène	µg/l	-	-	-	<0,50	<0,50	<0,50
BTEX							
Benzène	µg/l	1	-	-	28	<0,2	<0,2
Toluène	µg/l	-	-	-	51	<0,5	<0,5
Ethylbenzène	µg/l	-	-	-	56	0,6	<0,5
m,p-Xylène	µg/l	-	-	-	110	0,85	0,3
o-Xylène	µg/l	-	-	-	20	<0,50	<0,50
Somme Xylènes	µg/l	-	-	-	130	0,9	0,3
Hydrocarbures Volatils							
Fraction C5-C10	µg/l	-	-	-	390	<10	<10
Fraction >C6-C8	µg/l	-	-	-	290	<4,0	<4,0
Fraction >C8-C10	µg/l	-	-	-	59	<4,0	<4,0
Fraction aliphatique C5-C6	µg/l	-	-	-	39	<2,0	<2,0
Fraction aliphatique >C6-C8	µg/l	-	-	-	17	<2,0	<2,0
Fraction aliphatique >C8-C10	µg/l	-	-	-	7,5	<2,0	3,5
Fraction aromatique >C6-C8	µg/l	-	-	-	270	2,7	<2,0
Fraction aromatique >C8-C10	µg/l	-	-	-	51	<2,0	<2,0
Hydrocarbures Totaux							
Hydrocarbures totaux C10-C40	µg/l	-	-	1000	61	<50	<50
Fraction C10-C12	µg/l	-	-	-	38	<10	<10
Fraction C12-C16	µg/l	-	-	-	18	<10	<10
Fraction C16-C20	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Fraction C20-C24	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Fraction C24-C28	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Fraction C28-C32	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Fraction C32-C36	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Fraction C36-C40	µg/l	-	-	-	<5,0	<5,0	<5,0
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)							
Naphtalène	µg/l	-	-		26	0,74	0,06
Acénaphthylène	µg/l	-	-		<0,050	<0,050	<0,050
Acénaphthène	µg/l	-	-		4,4	0,43	0,03
Fluorène	µg/l	-	-		2,5	0,1	0,015
Phénanthrène	µg/l	-	-		1,1	0,24	0,028
Anthracène	µg/l	-	-		0,086	0,038	<0,010
Pyrène	µg/l	-	-		0,22	0,3	0,014
Benzo(a)anthracène	µg/l	-	-		0,14	0,31	0,013
Chrysène	µg/l	-	-		0,015	0,11	<0,010
Fluoranthène	µg/l	-	-		0,02	0,18	<0,010
Benzo(b)fluoranthène	µg/l	0,1	-	1	<0,010	0,062	<0,010
Benzo(k)fluoranthène	µg/l		-		<0,01	0,021	<0,01
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	µg/l		-		<0,010	0,076	<0,010
Benzo(g,h,i)pérylène	µg/l		-		<0,010	<0,010	<0,010
Benzo(a)pyrène	µg/l	0,01	-		<0,010	0,035	<0,010
Dibenzo(ah)anthracène	µg/l	-	-		<0,010	0,031	<0,010
Somme HAP	µg/l	-	-		34	2,7	0,16
PCB							
PCB (28)	µg/l	-	-	-	<0,010	<0,010	<0,010
PCB (52)	µg/l	-	-	-	<0,010	<0,010	<0,010
PCB (101)	µg/l	-	-	-	<0,010	0,012	<0,010
PCB (118)	µg/l	-	-	-	<0,010	<0,010	<0,010
PCB (138)	µg/l	-	-	-	<0,010	0,014	<0,010
PCB (153)	µg/l	-	-	-	<0,010	0,014	<0,010
PCB (180)	µg/l	-	-	-	<0,010	0,013	<0,010
Somme PCB	µg/l	200	200	-	n.d.	0,05	n.d.

K.8. Interprétation des résultats sur les eaux souterraines

Les analyses effectuées sur les eaux souterraines ont mis en évidence :

- un impact en BTEX et de fortes teneurs en hydrocarbures volatils C5-C16 au droit du piézomètre PZ1 situé en aval, ainsi qu'une teneur significative en HAP dont 26 µg/l en naphthalène (composé volatil) – la concentration est supérieure à la valeur de référence pour le benzène ;
- des concentrations légèrement supérieures aux valeurs de références pour les HAP au droit de PZ2 – la somme de ces composés reste toutefois significativement inférieure à celle identifiée au droit de PZ1 et n'est donc pas représentative d'un impact ;
- des anomalies en arsenic au droit de PZ2 et PZ3 situé en latéral et en amont du site d'étude ainsi que des concentrations en zinc plus élevées en amont qu'en aval ;
- la présence de trace de trichlorométhane au droit de PZ3 situé en amont.

Compte tenu des impacts en hydrocarbures dans les eaux souterraines situées en aval du site d'étude, la qualité des sols au droit du site semble dégrader la qualité des eaux souterraines.

La synthèse cartographique des anomalies dans les eaux souterraines est présentée dans la Figure 26.

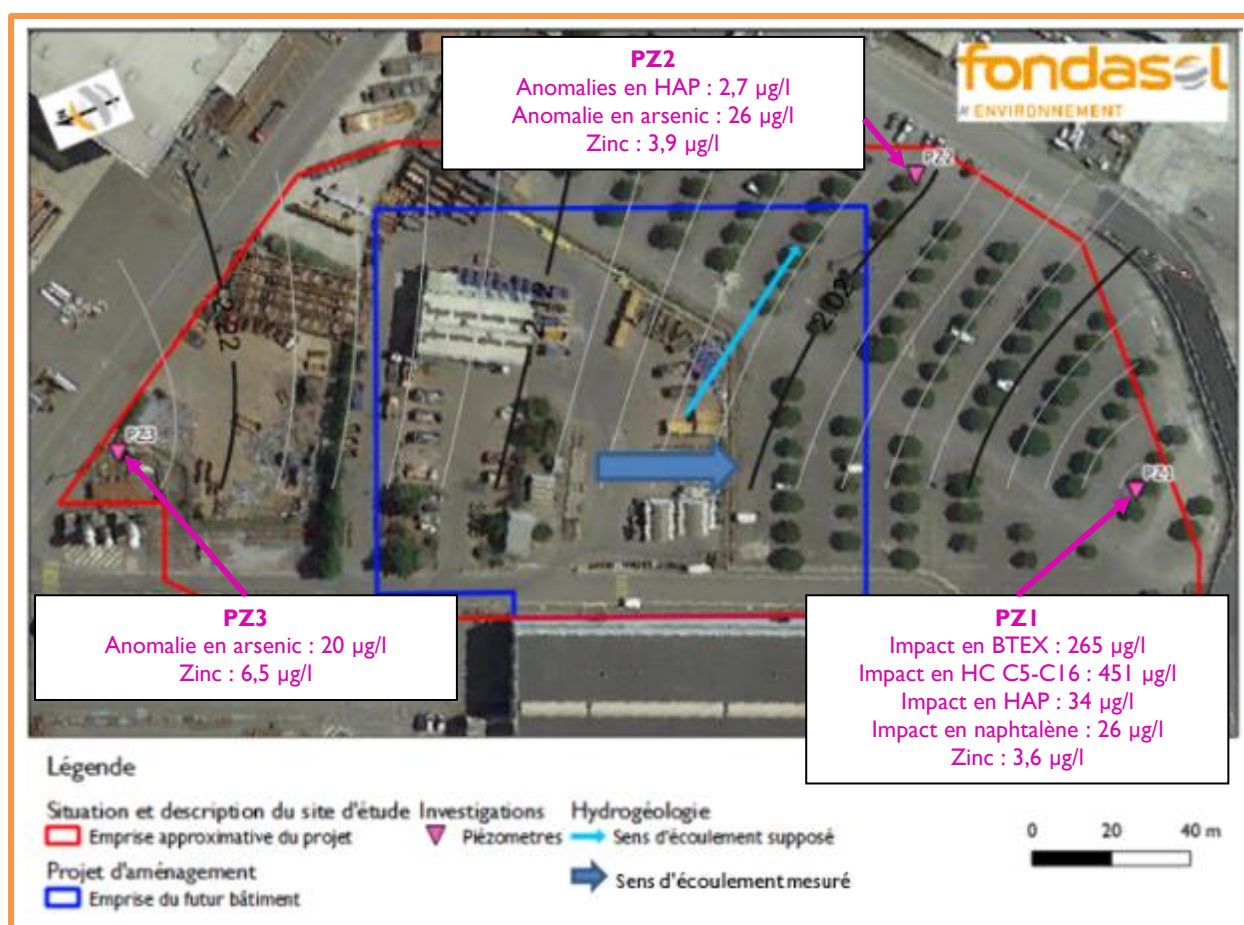


Figure 26 : Synthèse cartographique des résultats d'analyses sur les eaux souterraines

L. INVESTIGATIONS SUR LES GAZ DU SOL (A230)

L.1. Rappel du contexte et objectifs des prélèvements sur les gaz du sol

Compte tenu de la présence de composés volatils dans les sols et des gaz du sol, des investigations complémentaires sur les gaz du sol ont été réalisées.

L.2. Stratégie d'investigations sur les gaz du sol

L'objectif est de vérifier la présence ou l'absence d'impact dans les gaz du sol ainsi que définir les éléments marqueurs de la pollution des gaz du sol se retrouvant dans l'air ambiant.

Les investigations réalisées sur le secteur d'étude ont consisté en la réalisation de 4 piézairs mis en place le 18/10/2021 à la tarière lors du diagnostic antérieur (sondages SDx et ST1 à ST27).

Ces piézairs avaient été implantés à l'issue de la campagne sur les sols.

Tableau 27 : Stratégie d'investigations sur les gaz du sol

Piézair	Enjeu			Profondeur atteinte
	Source potentielle de pollution	Concentrations mesurées dans les sols à caractériser	Aménagement projeté	
PA1	Remblais présentant une pollution forte en hydrocarbures C10-C40 et HAP (dont naphthalène) autour de ST6	Associé au sondage ST4 (0,2-1,2) : HCT C ₁₂ -C ₁₆ = 7,9 mg/kg MS Naphthalène = 0,089 mg/kg MS BTEX : 0,23 mg/kg MS	Futur bâtiment	1.30 m/TA
PA2		Associé au sondage ST6 (0,3-1,3) ¹⁰ : HCT C₁₀-C₁₂ = 380 mg/kg MS HCT C₁₂-C₁₆ = 2 000 mg/kg MS Naphthalène = 343 mg/kg MS BTEX : 2,5 mg/kg MS		1.30 m/TA
PA3		Associé au sondage SD4 : HCT C ₁₂ -C ₁₆ = 17,6 mg/kg MS Naphthalène = 0,61 mg/kg MS BTEX : 0,69 mg/kg MS		1.30 m/TA
PA4		-		1.30 m/TA

En gras : teneurs maximales en composés volatils mises en évidence au droit du site avant la pose des ouvrages.

Les ouvrages ont été réalisés comme décrit dans le Tableau 28.

¹⁰ Notons que ces fortes teneurs ne sont pas retrouvées au droit des sols présents au niveau de la crépine du PA2

Tableau 28 : Description des piézairs

Ouvrage	Nature du tubage	Diamètre en mm (int/ext)	Profondeur de la crépine (en m)	Profondeur de l'ouvrage (en m)	Protection
PA1	PEHD	24/32	0.80	1.30	Bouche à clé raz de sol
PA2	PEHD	24/32	0.80	1.30	Bouche à clé raz de sol
PA3	PEHD	24/32	0.80	1.30	Bouche à clé raz de sol
PA4	PEHD	24/32	0.80	1.30	Bouche à clé raz de sol

La crépine a été installée entre 0,80 et 1,30 m de profondeur, afin de caractériser les gaz du sol au droit des faciès lithologiques présentant les plus fortes concentrations en composés volatils et/ou les plus proches de la zone d'exposition et/ou directement sous le niveau de la dalle projeté.

La Figure 27 précise la localisation des piézairs.

L'ensemble de ces données de terrain a été consigné et est présenté en Annexe 17.

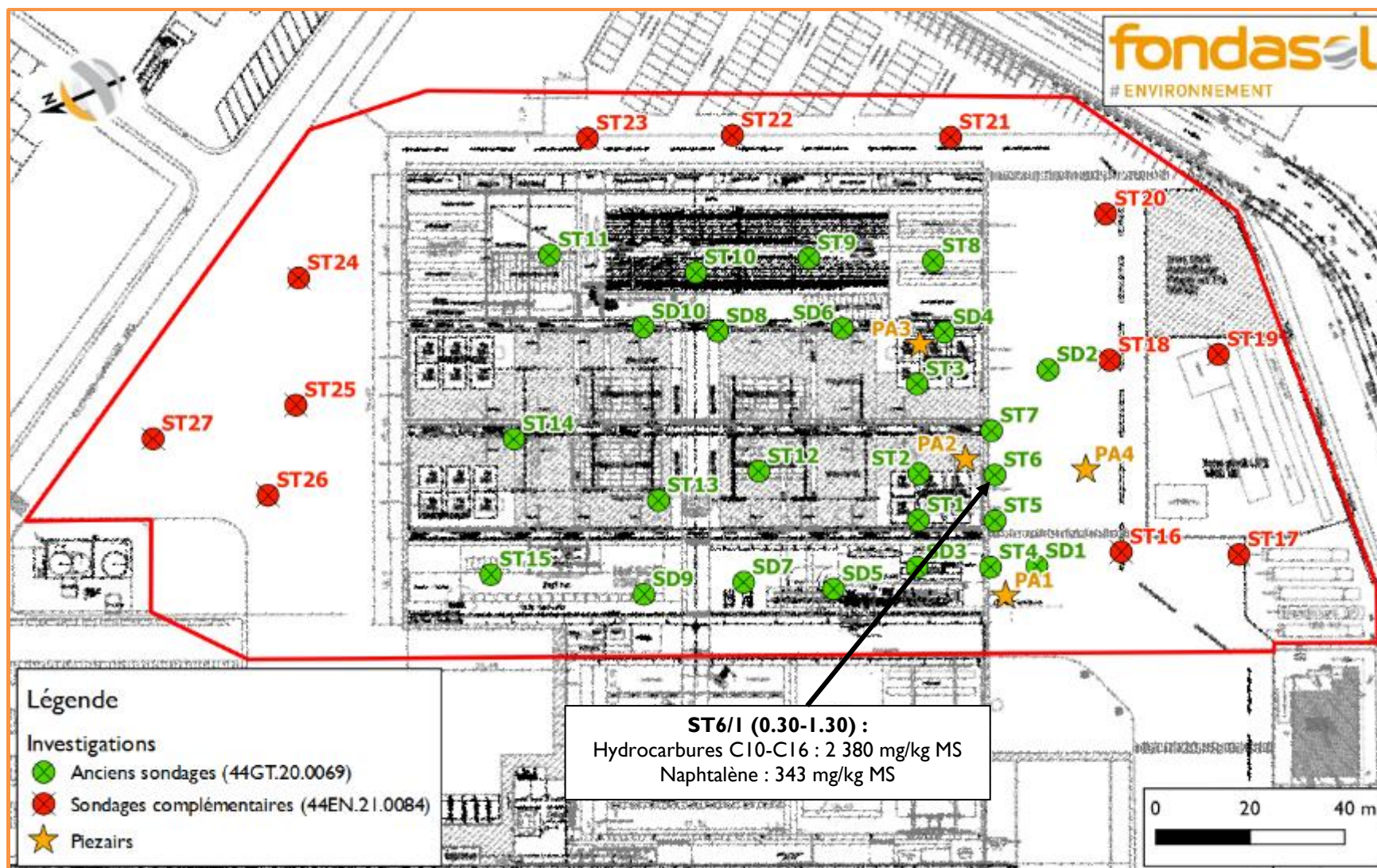


Figure 27 : Localisation des piézairs

L.3. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques (pression atmosphérique, pluviométrie, taux d'humidité, température de l'air, ...) peuvent engendrer des conditions majorantes ou minorantes pour les émissions de composés gazeux depuis les sols et les eaux souterraines vers l'air intérieur.

Les données météorologiques issues de la station Infoclimat de Saint-Nazaire Montoir (située à environ 5 km du site) pour les 3 jours précédant la campagne et les relevés météorologiques lors des prélèvements et du jour suivant, sont précisées dans le Tableau 29 et sur les fiches de prélèvements des gaz du sol en Annexe I3.

Tableau 29 : Conditions météorologiques du 28/01/2022 au 01/02/2022

Date	Température moyenne (°C)	Vitesse moyenne du vent (km/h)	Cumul pluviométrique (mm)	Hygrométrie moyenne (%)	Pression maximale (hPa)	Pression minimale (hPa)
28/01/2022	8,1	6	0	97	1039,5	1036,5
29/01/2022	8,6	8,8	0	95	1038,3	1036,3
30/01/2022	8,5	7,2	0	94	1036,6	1029,3
31/01/2022	8,7	15,2	0	79	1034,3	1028,2
01/02/2022	9,7	19,2	0	84	1034,1	1029,5

Ces conditions météorologiques sont peu favorables au dégazage et absorption de composés volatils dans les sols conformément au guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol.

L.4. Programme analytique sur les gaz du sol

Le dispositif utilisé pour la campagne de prélèvement des gaz du sol est présenté dans la figure ci-dessous.

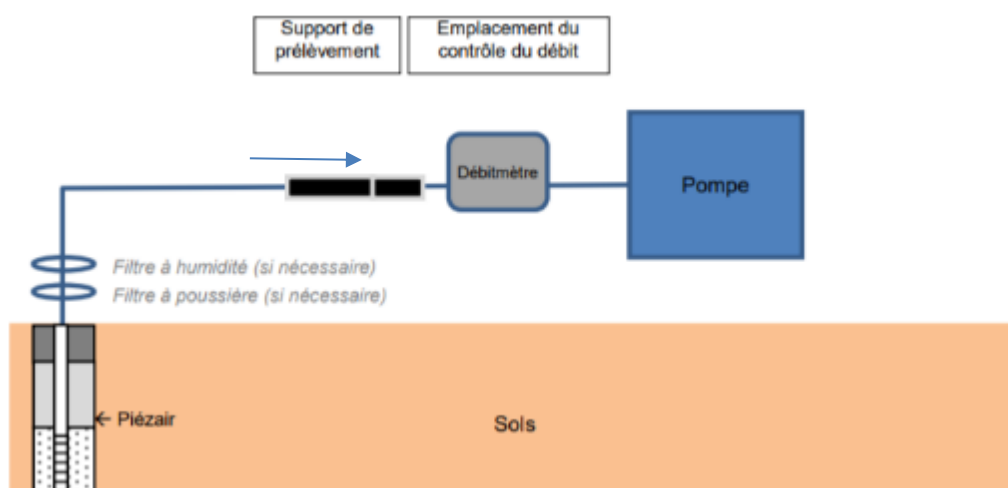


Figure 28 : Dispositif de prélèvement des gaz du sol (extrait du rapport BRGM RP-65870-FR et INERIS DCR-16-156181-01401A, 2016)

La colonne d'air a été purgée d'au moins 5 fois le volume de l'ouvrage.

Les prélèvements ont été effectués sur des supports de charbon actif pendant une durée de 2h10 au minimum à un débit moyen de 0,3 l/min, de manière à obtenir des limites de quantification en adéquation avec les valeurs de comparaison retenues.

Le programme analytique a été conduit conformément au programme d'investigations complémentaires précédemment défini sur la base des résultats des premières campagnes d'investigations des sols.

Pour chacun des 6 échantillons prélevés (1 échantillon par piézair, 1 blanc de transport et 1 blanc de terrain), le programme analytique a été le suivant :

- TPH : Total Petroleum Hydrocarbons ;
- BTEXN : hydrocarbures mono-aromatiques (benzène, toluène, éthylbenzène ou xylène) + naphthalène.

Les abréviations des composés / packs analytiques proposés sont décrites en Annexe 2.

Ce programme inclut un échantillon de blanc de transport (support de prélèvement n'ayant pas servi pour le prélèvement mais appartenant au même lot de fabrication et ayant été transporté vers le laboratoire avec les autres supports). Ce blanc a fait l'objet du même programme d'analyses que les autres échantillons.

Ce programme inclut un échantillon de blanc de terrain (support de prélèvement n'ayant pas servi pour le prélèvement mais appartenant au même lot de fabrication et ayant été ouvert sur site puis refermé en même temps que les autres supports puis transporté vers le laboratoire). Ce blanc a fait l'objet du même programme d'analyses que les autres échantillons.

Les échantillons ont été analysés par le laboratoire EUROFINs certifié COFRAC.

Les propriétés physico-chimiques des composés recherchés sont présentées en Annexe 7 et les méthodes analytiques, les limites de quantification et le descriptif du flaconnage utilisé en Annexe 8.

L.5. Valeurs de référence pour les gaz du sol

Il n'existe pas de valeur de référence ou de gestion pour les gaz du sol mais les résultats seront comparés aux valeurs de référence définies pour l'air ambiant : il s'agit de valeurs repères et non de valeurs de gestion. Dans l'air ambiant, ces valeurs sont issues de la gestion mise en place au niveau national dans la démarche de diagnostic des sols dans les lieux accueillant les enfants et les adolescents. Elles sont basées sur des critères sanitaires et présentant 3 seuils¹¹ :

- R1 : valeurs de gestion qui sont par ordre de priorité, les valeurs réglementaires disponibles, les valeurs cibles ou repères du HCSP¹², les valeurs guides de qualité d'air intérieur (VGAi) de l'ANSES¹³ et, à défaut, des VTR¹⁴ ;
- R2 : dans la plupart des cas équivalentes aux valeurs réglementaires ou aux seuils d'action définis par le HCSP ;
- R3 : des VTR aigües disponibles pour les expositions sur une courte période.

Les valeurs de comparaison retenues sont rappelées dans les dernières colonnes des tableaux des résultats d'analyses.

¹¹ conformément au rapport de « Mise à jour des valeurs-repères R1, R2 et R3 dans le cadre de la méthodologie de gestion des sites et sols pollués » - rapport 20487-2706501-v1.0 de novembre 2021

¹² HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique

¹³ ANSES : Agence Nationale Sécurité Sanitaire Alimentaire Nationale

¹⁴ VTR : Valeurs Toxicologiques de Référence

L.6. Présentation des résultats sur les gaz du sol

Les bordereaux d'analyses sur les gaz de sol sont présentés en Annexe I4. Le Tableau 31 présente la synthèse des résultats.

Le tube support spécifique utilisé pour le prélèvement des substances présentes en phase vapeur dans les gaz du sol comporte une zone de mesure et une zone de contrôle, cette dernière permettant de contrôler la non-saturation de la zone de mesure et ainsi de valider la représentativité de l'échantillonnage. Les analyses ont porté sur la zone de mesure et la zone de contrôle.

En l'absence de quantification de composés sur la zone de contrôle, ne sont présentés dans le tableau suivant que les résultats obtenus sur la zone de mesure.

Les résultats d'analyses du blanc de terrain et du blanc de transport sont inférieurs à la limite de quantification. Ce résultat garantit l'absence d'interférence avec l'air extérieur lors de nos prélèvements.

Tableau 30 : Légende utilisée pour la mise en forme des résultats sur les gaz du sol

Mise en forme	Correspondance
0000	Concentrations inférieures à la limite de quantification (LQ)
0000	Concentrations supérieures à la LQ mais inférieures à la borne R1
0000	Concentrations probablement sous-estimées
0000	Concentrations supérieures à la borne R1
0000	Concentrations supérieures à la borne R2
0000	Concentrations supérieures à la borne R3

Tableau 31 : Résultats analytiques dans les gaz du sol

Paramètres	Unité	Echantillons				Bornes de référence		
		PA1	PA2	PA3	PA4	R1	R2	R3
BTEX								
Benzène	µg/m³	<1,1	<1,2	<1,2	<1,0	2	10	30
Toluène	µg/m³	<4,5	<4,6	<4,6	<4,2	20000	21000	21000
Ethylbenzène	µg/m³	<2,2	<2,3	4,4	<2,1	1500	15000	22000
m,p-Xylène	µg/m³	5,4	5,7	14,2	5,5	100	1000	8800
o-Xylène	µg/m³	1,8	2,1	3,7	1,7			
Hydrocarbures aliphatiques								
Hydrocarbures aliphatiques C5-C6	µg/m³	<56	<57	<57	<53	18000	180000	-
Hydrocarbures aliphatiques C6-C8	µg/m³	123	<57	<57	<53	18000	180000	-
Hydrocarbures aliphatiques C8-C10	µg/m³	128	120	<57	136	1000	10000	-
Hydrocarbures aliphatiques C10-C12	µg/m³	<56	<57	<57	<53	1000	10000	-
Hydrocarbures aliphatiques C12-C16	µg/m³	<56	<57	<57	<53	1000	10000	-
Hydrocarbures aromatiques								
Hydrocarbures aromatiques C8-C10	µg/m³	<56	<57	<57	<53	200	2000	-
Hydrocarbures aromatiques C10-C12	µg/m³	<56	<57	<57	<53	200	2000	-
Hydrocarbures aromatiques C12-C16	µg/m³	<56	<57	<57	<53	200	2000	-
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)								
Naphtalène	µg/m³	<2,2	<2,3	<2,3	<2,1	10	50	-

L.7. Interprétation des résultats sur les gaz du sol

Les analyses effectuées sur les gaz du sol ont mis en évidence l'absence de dépassements des valeurs de référence choisies, à la différence des résultats de la première campagne.

La présence de xylènes a été mise en évidence sur l'ensemble des échantillons comme lors de la première campagne de prélèvement.

La présence d'hydrocarbures aliphatiques C8-C10 a été mise en évidence au droit de trois échantillons. Ce composé avait été mis en évidence également lors de la première campagne de prélèvement avec une teneur supérieure à la valeur de référence.

La présence d'hydrocarbures aliphatiques et d'éthylbenzène a été mise en évidence au droit d'un échantillon, respectivement PA1 et PA3.

Les concentrations obtenues lors de cette campagne sont largement inférieures aux concentrations obtenues lors de la première campagne de prélèvement. Compte tenu des conditions météorologiques défavorables, ces résultats restent toutefois pertinents.

Compte tenu de l'absence d'impacts, aucune synthèse cartographique des résultats ne sera réalisée.

M. GESTION DES TERRES QUI SERONT EXCAVEES

M.1. Données disponibles

Les résultats d'analyse des études antérieures (PR.44GT.20.0069-002, PR.44GT.20.0069-003, PR.44EN.21.0084-001) et de la présente étude (voir Tableau 22) mettent en évidence la présence de terres non inertes au droit du site, et qui seront excavées dans le cadre du projet.

Ces terres nécessiteront donc une gestion spécifique qui engendrera un surcoût de gestion.

Les résultats d'analyse des études antérieures ont été mis à jour avec les seuils d'acceptation en ISDI+, ISDND et ISDD réactualisés et utilisés dans le cadre de la présente étude.

M.2. Evaluation d'un plan prévisionnel d'évacuation des terres à excaver

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour l'évaluation du plan prévisionnel des terres à excaver :

- sont considérés comme non inertes les déblais dont au moins une analyse sur les sols n'est pas conforme aux seuils définis par l'arrêté du 12/12/2014 ;
- la qualité des échantillons prélevés est jugée homogène au droit de chaque maille et représentative de l'ensemble de la maille ;
- en l'absence d'analyse sur une couche de terrain donnée, les résultats ont été extrapolés latéralement et verticalement en fonction de la nature des terrains rencontrés (lithologie, observations organoleptiques) ;
- en l'absence d'analyse, les matériaux de recouvrement (revêtement et couche de forme éventuelle reconnus au droit des sondages), sont considérés comme acceptables en filière ISDI au vu de la granulométrie grossière et l'absence d'indices organoleptiques. Ils ont donc été exclus du plan d'évacuation prévisionnel ;
- deux emprises de terrassements sont étudiées : l'emprise du futur bâtiment d'une superficie estimée de 12 500 m², et l'emprise des futures plateformes d'une superficie estimée de 15 400 m² ;
- sur la base des informations communiquées par le client, la cote du niveau bas des terrassements au droit du futur bâtiment retenue pour le dimensionnement est de 4,05 m NGF. La profondeur d'excavation a ensuite été calculée par différence entre les cotes altimétriques des points de sondages (issues du nivellement et du plan topographique) et la cote de 4,05 m NGF ;
- d'après les informations communiquées par le client, la profondeur de terrassement retenue au droit des futures plateformes (en dehors de l'emprise du futur bâtiment) est 0,30 m/TA ;
- l'excavation de terres liée spécifiquement à la gestion des pollutions concentrées (hors terrassements prévus dans le cadre du projet) n'est pas prise en compte.

Le Tableau 33 présente les orientations possibles pour chacune des mailles concernées. Le plan de maillage avec les filières d'évacuation est proposé dans la Figure 29 ci-après. Il est à noter que d'après le plan topographique du site, au droit de certaines mailles (SD8, SD10, ST10, ST11, ST12 et ST14), la cote du terrain actuel se situe plus bas que la cote du niveau bas des terrassements qui a été retenue. De fait, ces mailles ne seront a priori pas excavées dans le cadre du projet. Elles ont été intégrées à titre informatif dans la Figure 29 ci-après, mais n'ont été prises en compte ni dans le calcul des volumes de terres ni dans l'estimation des surcoûts.

Par ailleurs, la présence de ferraille, blocs et autres déchets pourrait engendrer un refus de la part des ISDI voire de l'ISDI+. Toutefois, cette hypothèse n'a pas été étudiée. En cas de refus de la part de ces centres, les terres pourraient être évacuées en ISDND.

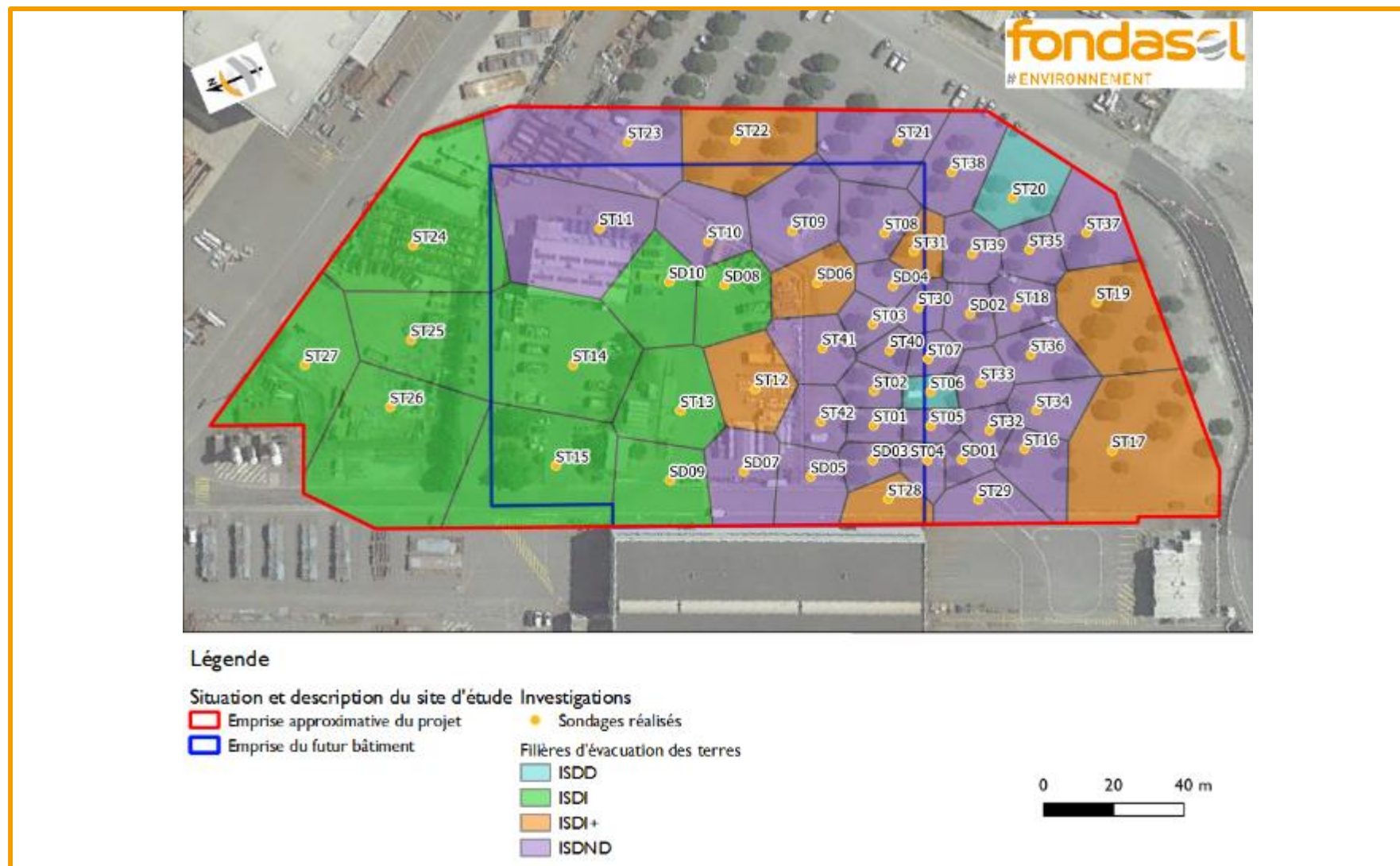


Figure 29 : Plan de maillage des filières d'évacuation des terres – de 0 à 0,30 m/TA pour les futures plateformes et jusqu'à 4,05 m NGF pour le futur bâtiment.

Nota : les matériaux de recouvrement (revêtement et éventuelle couche de forme) ne sont pas pris en compte dans ce plan de maillage.

M.3. Estimation des surcoûts d'évacuation des terres

L'estimation des surcoûts est basée sur les hypothèses suivantes :

- la densité des terres est estimée à 1,8 ;
- le surcoût calculé comprend l'acceptation des terres en filières spécifiques (hors ISDI) mais n'inclut pas : le transport, la maîtrise d'œuvre du chantier, le terrassement des terres, le chargement des terres dans les camions par une pelle mécanique, le tri des terres à excaver par une maîtrise d'œuvre spécifique, le stockage temporaire des terres sur une aire de tri y compris la mise en place de celle-ci, la reprise des terres stockées pour chargement, la mise en sécurité des terres à excaver, etc. ;
- la réutilisation des terres sur site ou le traitement in situ ou hors site des terres ne sont pas considérés ;
- les coûts et surcoûts moyens de prise en charge pour les différentes installations, issus de notre connaissance du marché, sont présentés dans le tableau suivant, en considérant que le surcoût est la différence de coûts entre une évacuation en filière ISDI et une filière spécialisée (ISDI+, ISDND ou ISDD). Pour chaque filière, une fourchette basse et une fourchette haute sont étudiées ;

Tableau 32 : Surcoûts moyens de prise en charge pour les différentes installations

	Coûts		Coûts (équivalent en €/m ³)		Surcoûts (€/m ³)
ISDI	15	€/H.T/m ³	15	€/H.T/m ³	0
ISDI+	45	€/H.T/t	81	€/H.T/m ³	36
	à 50	€/H.T/t	à 90	€/H.T/m ³	à 45
ISDND	95	€/H.T/t	171	€/H.T/m ³	126
	à 105	€/H.T/t	à 189	€/H.T/m ³	à 144
ISDD	120	€/H.T/t	216	€/H.T/m ³	171
	à 130	€/H.T/t	à 234	€/H.T/m ³	à 189

- ces prix sont donnés à titre indicatif (TGAP comprise) et devront être confirmés lors de la consultation des entreprises ;
- la TGAP moyenne¹⁵ considérée est de 40 €/tonne pour l'année 2022. Cette donnée sera à réactualiser en fonction de la date effective du chantier.

Le tableau ci-dessous présente les estimations de surcoûts d'évacuation de terres sur la base des hypothèses présentées précédemment. Les surcoûts d'évacuation estimés sont présentés dans le Tableau 33 et le Tableau 34.

Sur la base des hypothèses citées ci-dessus, les surcoûts d'évacuation en filière spécifique par rapport à une évacuation en ISDI sont évalués :

- entre **390 000** et **450 000 €** (TGAP incluse) pour la mise en place du futur bâtiment ;
- entre **280 000** et **330 000 €** (TGAP incluse) pour la mise en place des plateformes.

¹⁵ Moyenne des taux de TGAP des installations B, C, D, E définies à l'article 24 de la loi 2018-1317 du 28 décembre 2018 de finances 2019

Tableau 33 : Estimation des volumes de terres et des surcoûts d'évacuation dans le cadre de la mise en place du bâtiment

Maille / sondage associé	Filière recommandée	Critère discriminant selon l'arrêté du 12/12/2014	Surface (m²)	Cote moyenne du terrain actuel (m NGF)	Cote du niveau bas retenu (m NGF)	Profondeur d'excavation (m/TA)	Volume associé (m³)	Surcoûts associés (€ H.T.) - fourchette basse	Surcoûts associés (€ H.T.) - fourchette haute
SD3	ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	188	4,83	4,05	0,78	147	18 477	21 116
SD4	ISDND	HC C10-C40, antimoine	173	4,53	4,05	0,48	83	10 463	11 958
SD5	ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	419	4,85	4,05	0,80	335	42 235	48 269
SD6	ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	394	4,60	4,05	0,55	217	7 801	9 752
SD7	ISDND	BTEX	522	4,40	4,05	0,35	183	23 020	26 309
SD8	ISDI	-	477	4,04	4,05	-0,01	n.c.	-	-
SD9	ISDI	-	632	4,42	4,05	0,37	234		
SD10	ISDI	-	612	4,15	4,05	0,10	61		
ST1	ISDND	HAP, HC C10-C40, PCB, antimoine, molybdène, fluorures	155	4,77	4,05	0,72	112	14 062	16 070
ST2	ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	192	4,66	4,05	0,61	117	14 757	16 865
ST3	ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	178	4,57	4,05	0,52	93	11 663	13 329
ST4	ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	85	4,77	4,05	0,72	61	7 711	8 813
ST5	ISDND	BTEX, HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	59	4,64	4,05	0,59	35	4 386	5 013
ST6	ISDD	HAP, HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures, indice phénol	58	4,57	4,05	0,52	30	5 157	5 700
ST7	ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	54	4,50	4,05	0,45	24	3 062	3 499
ST8	ISDND	Antimoine, fluorures	414	4,56	4,05	0,51	211	26 604	30 404
ST9	ISDND	Antimoine, fluorures	617	4,61	4,05	0,56	346	43 536	49 755
ST10	ISDND	Fluorures	501	3,94	4,05	-0,11	n.c.	-	-
ST11	ISDND	Fluorures	1 225	4,13	4,05	0,08	98	12 348	14 112
ST12	ISDI+	Molybdène, fluorures	539	4,08	4,05	0,03	16	582	728
ST13	ISDI	-	701	4,35	4,05	0,30	210		
ST14	ISDI	-	1 332	4,16	4,05	0,11	147		
ST15	ISDI	-	926	4,44	4,05	0,39	361		
ST21	ISDND	Antimoine	138	4,73	4,05	0,68	94	11 824	13 513
ST22	ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	192	4,89	4,05	0,84	161	5 806	7 258
ST23	ISDND	HCT, antimoine, molybdène, fluorures	287	4,80	4,05	0,75	215	27 122	30 996
ST24	ISDI	-	103	4,61	4,05	0,56	58		
ST28	ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	272	4,55	4,05	0,50	136	4 896	6 120
ST30	ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	92	4,70	4,05	0,65	60	7 535	8 611
ST31	ISDI+	Molybdène	116	4,69	4,05	0,64	74	2 673	3 341
ST38	ISDND	BTEX, HC C10-C40, PCB, antimoine, molybdène, fluorures	38	4,69	4,05	0,64	24	3 064	3 502
ST40	ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	140	4,68	4,05	0,63	88	11 113	12 701
ST41	ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	376	4,79	4,05	0,74	278	35 058	40 067
ST42	ISDND	HAP, antimoine, molybdène, fluorures	311	4,99	4,05	0,94	292	36 835	42 097

Sous-total ISDI	1 071		
Sous-total ISDI+	604	21 758	27 198
Sous-total ISDND	2 896	364 873	416 998
Sous-total ISDD	30	5 157	5 700
Total	4 601	391 789	449 896

Nota : d'après le plan topographique du site, au droit de certaines mailles (SD8 et ST10), la cote du terrain actuel se situe plus bas que la cote du niveau bas des terrassements qui a été retenue. De fait, ces mailles ne seront a priori pas excavées dans le cadre du projet et n'ont pas été intégrées dans cette estimation.

Tableau 34 : Estimation des volumes de terres et des surcoûts d'évacuation dans le cadre de la mise en place des plateformes

Filière recommandée	Critère discriminant selon l'arrêté du 12/12/2014	Surface (m²)	Cote moyenne du terrain actuel (m NGF)	Profondeur d'excavation (m/TA)	Volume associé (m³)	Surcoûts associés (€. H.T.) - fourchette basse	Surcoûts associés (€. H.T.) - fourchette haute
ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	147	4,76	0,30	44	5 557	6 350
ISDND	HAP, HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	244	4,60	0,30	73	9 223	10 541
ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	91	4,77	0,30	27	3 440	3 931
ISDND	BTEX, HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	93	4,64	0,30	28	3 515	4 018
ISDD	HAP, HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures, indice phénol	88	4,57	0,30	26	4 514	4 990
ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	112	4,50	0,30	34	4 234	4 838
ISDND	Antimoine, fluorures	13	4,61	0,30	4	491	562
ISDI	-	478	4,44	0,30	143		
ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	381	4,70	0,30	114	14 402	16 459
ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	1 559	4,66	0,30	468	16 837	21 047
ISDND	HCT, sulfates, fraction solubles, antimoine, molybdène, fluorures	260	4,73	0,30	78	9 828	11 232
ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	821	4,81	0,30	246	8 867	11 084
ISDD	HCT, PCB, antimoine, molybdène, fluorures	505	4,73	0,30	152	25 907	28 634
ISDND	Antimoine	512	4,73	0,30	154	19 354	22 118
ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	598	4,89	0,30	179	6 458	8 073
ISDND	HCT, antimoine, molybdène, fluorures	913	4,80	0,30	274	34 511	39 442
ISDI	-	1 617	4,61	0,30	485		
ISDI	-	995	4,65	0,30	299		
ISDI	-	1 709	4,67	0,30	513		
ISDI	-	1 046	4,53	0,30	314		
ISDI+	Antimoine, molybdène, fluorures	16	4,55	0,30	5	173	216
ISDND	Antimoine, arsenic, fluorures	342	4,54	0,30	103	12 928	14 774
ISDND	Antimoine, molybdène, fluorures	87	4,70	0,30	26	3 289	3 758
ISDI+	Molybdène	100	4,69	0,30	30	1 080	1 350
ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	165	4,62	0,30	50	6 237	7 128
ISDND	BTEX, HC C10-C40, antimoine, arsenic, molybdène, fluorures	234	4,83	0,30	70	8 845	10 109
ISDND	HC C10-C40, molybdène, fluorures	329	4,77	0,30	99	12 436	14 213
ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	277	4,82	0,30	83	10 471	11 966
ISDND	HC C10-C40, PCB, antimoine, molybdène, fluorures	348	4,83	0,30	104	13 154	15 034
ISDND	Antimoine, molybdène, fraction soluble, fluorures, sulfates	481	4,83	0,30	144	18 182	20 779
ISDND	BTEX, HC C10-C40, PCB, antimoine, molybdène, fluorures	499	4,69	0,30	150	18 862	21 557
ISDND	HC C10-C40, antimoine, molybdène, fluorures	304	4,90	0,30	91	11 491	13 133

Sous-total ISDI	1 754		
Sous-total ISDI+	928	33 415	41 769
Sous-total ISDND	1 750	220 450	251 942
Sous-total ISDD	178	30 421	33 623
Total	4 609	284 286	327 335

N. SYNTHÈSE DES RESULTATS

N.1. Bilan de l'état des milieux

Les analyses des différents milieux ont mis en évidence :

- dans les sols : des anomalies généralisées en métaux sur l'ensemble du site ainsi que des fortes teneurs en hydrocarbures C10-C40 et des impacts plus localisés en HAP (dont du naphthalène), en BTEX et en PCB ;
- dans les eaux souterraines : des anomalies en métaux, benzène et HAP ainsi que des teneurs significatives en hydrocarbures volatils C5-C16 ;
- dans les gaz du sol : des anomalies en benzène et hydrocarbures volatils C5-C16 (résultats non confirmés lors de la 2^{ème} campagne de prélèvement).

La répartition de ces composés est résumée dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Synthèse des teneurs dans les différents milieux

Milieux investigués	Famille de polluant									Seuils de l'arrêté du 12/12/2014
	Mercure	Autres métaux	COHV	BTEX	HC C ₅ -C ₁₆	HCT C ₁₆ -C ₄₀	Naphtalène	Autres HAP	PCB	
Sols	•	•	<LQ	•	•	•	•	•	•	Dépassement des seuils ISDI
Eaux souterraines	•	•	•	•	•	<LQ	•	•	•	-
Gaz du sol	n.a.	n.a.	n.a.	•	•	n.a.	<LQ	n.a.	n.a.	-

• : Teneur remarquable • : Quantification <L.q. : Non quantifié

n.a. : Non analysé

En blanc : composés (potentiellement) volatils

Nota : on entend par teneur remarquable toute teneur sensiblement supérieure aux autres données sur le site.

N.2. Schéma conceptuel actualisé

N.2.1. Rappel du projet d'aménagement

Le projet d'aménagement consiste en :

- la construction d'un atelier de préfabrication d'une superficie d'environ 12 000 m². Le niveau fini du bâtiment sera calé à la cote de 4,77 m NGF et la cote de terrassement est estimée à 4,25 m NGF ;
- sur le reste du site, l'aménagement de plateformes en enrobé.

Il n'y a pas de niveau de sous-sol prévu au projet.

N.2.2. Sources de pollution

Les sources de pollution ont été détaillées au paragraphe N.1.

N.2.3. Récepteurs à protéger

Les récepteurs existants et futurs à protéger sont les travailleurs sur site et hors site.

N.2.4. Voies de transfert

Les voies de transfert potentielles à considérer sont la volatilisation et la remontée de vapeurs et l'infiltration / percolation à travers la zone non saturée du sol puis transfert vers les eaux souterraines.

En l'état actuel comme à l'état futur, l'intégralité des sols du site est ou sera recouverte par un enrobé ou un dallage en béton. Il n'existe aucune zone où le sol est à nu.

La seule voie de transfert potentielle hors site est la migration par les eaux souterraines.

Ainsi, les milieux d'exposition susceptibles d'être atteints sont l'air ambiant et les eaux souterraines.

N.2.5. Voies d'exposition

Au droit des zones recouvertes (voiries, plateformes et bâtiment actuels et futurs, qui occupent la totalité du site), la seule voie d'exposition potentielle à considérer pour les cibles retenues est l'inhalation de polluant sous forme gazeuse.

Il n'existe pas de zones non recouvertes au droit du site.

Au vu des résultats de l'étude de vulnérabilité des milieux, il n'y a pas d'usages sensibles des eaux souterraines ou des eaux superficielles dans l'environnement du site. Aucune voie d'exposition hors site n'est donc retenue.

N.2.6. Représentation graphique du schéma conceptuel actualisé

Le schéma conceptuel actualisé du site mettant en corrélation les sources de pollution, les milieux de transfert et les cibles est présenté dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Schéma conceptuel mis à jour à l'issue du diagnostic

Source de pollution potentielle	Cibles / enjeux	Voies de transfert	Milieux concernés par le transfert	Commentaire	Voies d'exposition	Milieu d'exposition	Commentaire
Remblais d'apport de qualité vraisemblablement médiocre (confirmée par les résultats d'analyses précédents) Stockages de déchets liquides dangereux en fûts et cuves Plateforme de tri des métaux (GDE) Site référencés CASIAS, en amont hydrogéologiques	Sur site						
	Travailleurs actuels et futurs	Volatilisation	Sols / gaz des sols → Air ambiant	Voie de transfert retenue	Inhalation de polluant sous forme gazeuse	Air ambiant	Risque retenu (présence de polluants volatils dans les sols, eaux souterraines et gaz du sol)
		Infiltration / percolation	Sols →Eaux souterraines →Air ambiant	Voie de transfert retenue	Inhalation de polluant sous forme gazeuse	Air ambiant	
	Hors site						
	Usagers de l'environnement du site (travailleurs actuels et futurs)	Migration par les eaux souterraines	Eaux souterraines → Air ambiant	Voie de transfert retenue	Inhalation de polluant sous forme gazeuse (via la nappe)	Air ambiant	Non retenu : au vu des résultats de l'étude de vulnérabilité des milieux, il n'y a pas d'usages sensibles des eaux souterraines ou des eaux superficielles dans l'environnement du site.
			Eaux souterraines		Ingestion d'eau contaminée (puits privé)	Eaux souterraines	
			Eaux souterraines → Eaux superficielles		Ingestion de poisson (pêche)	Poissons	

N.3. Conclusions et recommandations

Compte tenu du projet d'aménagement ou des usages de la zone d'étude, une analyse des enjeux sanitaires est à réaliser dans le cadre d'un Plan de Gestion conduit au droit du site.

O. PLAN DE GESTION

O.I. Principe et objectifs

L'objectif du plan de gestion est de rendre le site compatible avec les usages présents ou envisagés en intégrant les spécificités du site et de son environnement, les caractéristiques du projet de réaménagement ainsi que les différentes options de remédiation potentielles.

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites pollués du 19 avril 2017, le but du plan de gestion est ainsi de proposer et de justifier la stratégie de réhabilitation à mettre en œuvre pour d'une part supprimer ou réduire les stocks de polluants présents dans le milieu souterrain et d'autre part restaurer la compatibilité entre la qualité des milieux au droit du site et l'usage futur. Il s'agit donc :

- en priorité de traiter des pollutions concentrées et les sources de pollution ;
- puis en second lieu de désactiver une ou des voies de transfert entre les pollutions diffuses/résiduelles et les usagers du site ;
- enfin, lorsque le plan de gestion ne permet pas de supprimer tout contact possible entre les pollutions résiduelles et les enjeux, il convient de valider du point de vue sanitaire (Analyse des Risques Résiduels) la compatibilité entre la pollution résiduelle et le projet. Par définition, l'ARR doit conclure à la compatibilité.

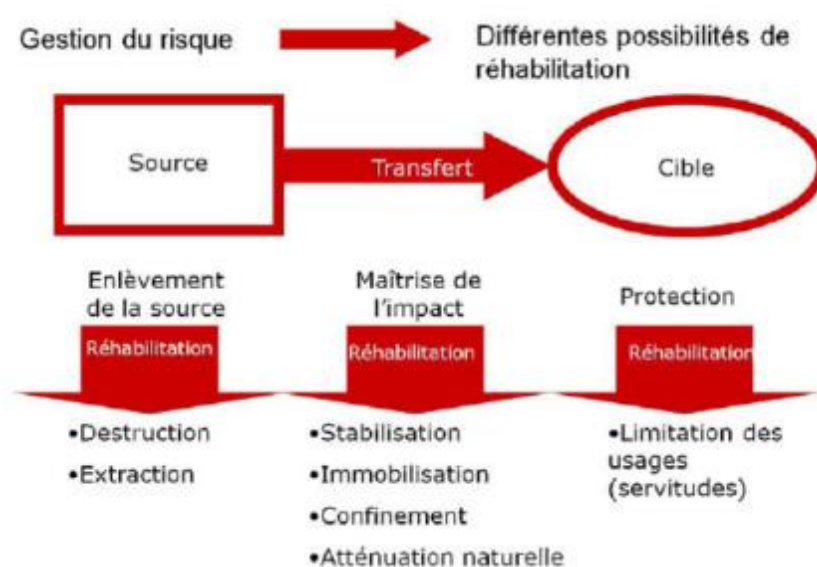


Figure 30 : Stratégie des mesures de gestion d'un site et sol pollué (Nathanail et al., 2020)

L'objectif du plan de gestion est d'atteindre le meilleur niveau de protection de l'environnement humain et naturel, à un coût raisonnable, tout en évitant de mobiliser des ressources inutilement démesurées au regard des intérêts à protéger.

La démarche peut être itérative comme l'illustre la Figure 31 ci-dessous.

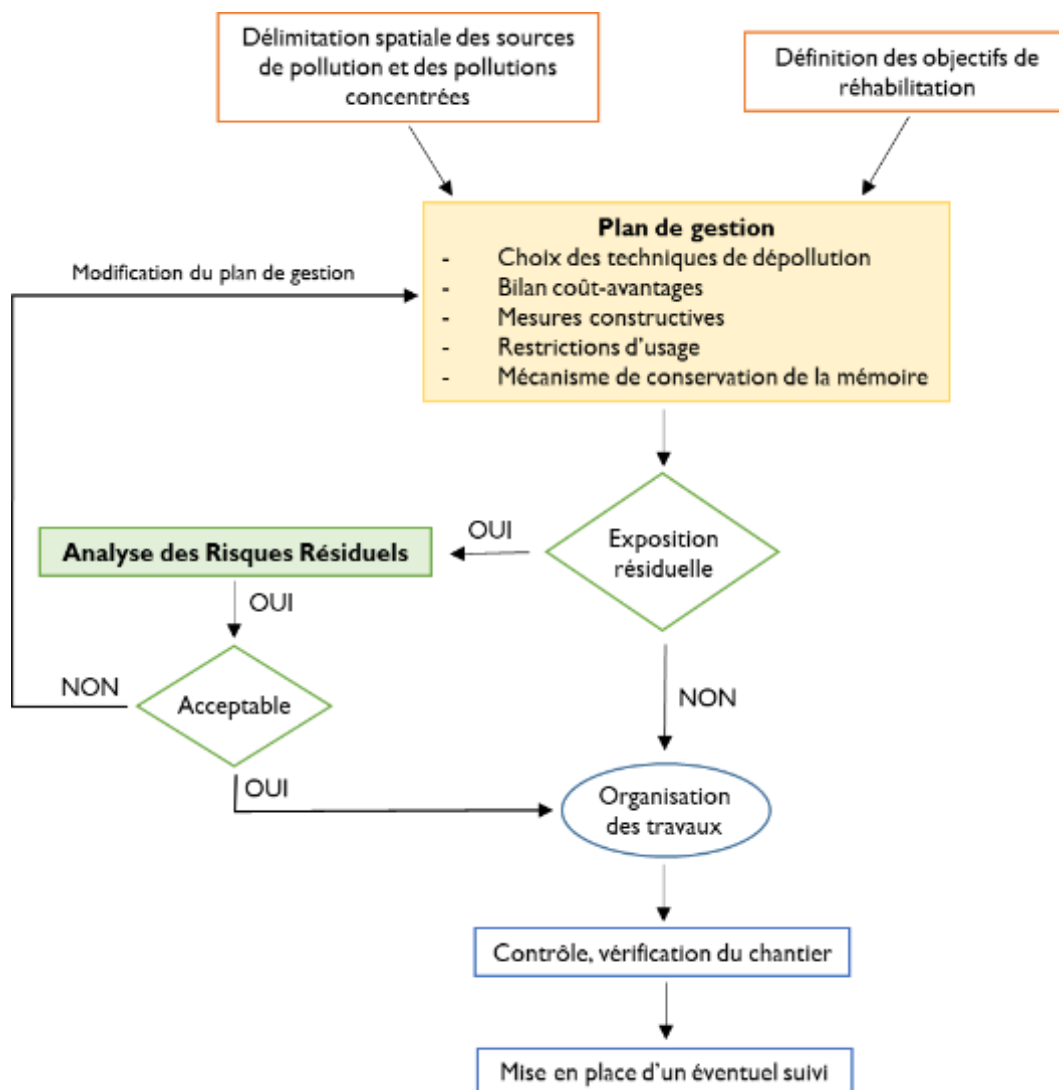


Figure 31 : Schéma de principe du plan de gestion

Pour cela, il faut :

- définir l'emprise horizontale et verticale de la zone de pollution concentrée (cf. O.2) ;
- réaliser un bilan coûts-avantages (cf. § O.4).

Comme tous les éléments constituant le plan de gestion, le bilan coûts-avantages :

- doit respecter le principe **de cas par cas** : chaque contexte de gestion est unique et doit faire l'objet d'une étude appliquée tenant compte de ses spécificités ;
- doit **aborder tous les milieux impactés** et justifier / argumenter le fait d'étudier ou non en détail certains milieux (par le biais de bilans massiques, d'identification des transferts, des impacts sanitaires, environnementaux, etc....) ;
- doit tenir compte de l'ensemble des enjeux dans une perspective de **développement durable** ;
- doit rester un outil qui doit **faciliter le dialogue** et favoriser la concertation avec les différentes parties prenantes ;
- est adaptable au fil de la réalisation des études (PG, PCT) ;

- enfin, il est également un outil d'aide à la décision, mais **la décision finale doit rester du ressort du maître d'ouvrage**. Toutefois, si les moyens de la gestion ne sont pas fixés par l'administration, cette dernière reste l'ultime décisionnaire des objectifs de réhabilitation.

O.2. Définition des zones de pollution concentrées

Une pollution concentrée correspond à un volume de milieu souterrain, délimité dans l'espace, au sein duquel les concentrations en une ou plusieurs substances sont significativement supérieures aux concentrations de ces mêmes substances à proximité immédiate de ce volume.

FONDASOL a fait le choix de se baser sur le Guide de l'UPDS mis à jour en avril 2016 « Pollution concentrée - Définition, outils de caractérisation et intégration dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués » ; ainsi, la définition des zones de pollution concentrée peut se faire selon différentes méthodes :

- Méthode reposant sur des constats de terrain et indices organoleptiques ;
- Méthode reposant sur une analyse statistique ;
- Méthode reposant sur la détermination de la présence d'une phase organique ;
- Méthode reposant sur l'utilisation d'une méthode d'interprétation cartographique ;
- Méthode reposant sur la réalisation d'un bilan massique ;
- Méthode reposant sur une approche intégrée géostatistique.

Tableau 37 : Présentation des différentes méthodes (source : Guide UPDS « Pollution concentrée » - avril 2016)

Objectifs	Indice qualitatif de présence d'une pollution concentrée	Définition d'un seuil de coupure	Visualisation 2D ou 3D de la pollution concentrée	Estimation du volume de sol d'une pollution concentrée	Estimation du volume de polluant
Méthode reposant sur des constats de terrain et indices organoleptiques	X				
Méthode reposant sur une analyse statistique		X			
Méthode reposant sur la détermination de la présence d'une phase organique		X			
Méthode reposant sur l'utilisation d'une méthode d'interprétation cartographique		X	X	X	
Méthode reposant sur la réalisation d'un bilan massique		X		X	X
Méthode reposant sur une approche intégrée géostatistique		X	X	X	X

X : capacité de la méthode

La définition de la pollution concentrée et sa délimitation résultent de la convergence des résultats d'au moins deux méthodes proposées ci-dessous.

L'objectif commun de ces méthodes est de déterminer un seuil de coupure « théorique », au-dessus duquel il serait intéressant de traiter ces sols en retirant un maximum de la masse de polluant, tout en ne traitant qu'un volume de sol limité.

Car le traitement d'une pollution ne signifie pas en supprimer toute la trace. En effet, selon les textes d'avril 2017, dans de nombreux cas, la gestion d'un volume limité et présentant

les concentrations les plus élevées, peut permettre de gérer la majorité de la masse de polluant présente : par exemple selon le principe de Pareto, gérer environ 20% du volume total de pollution (c'est-à-dire le volume le plus pollué) peut permettre in fine de gérer 80% de la masse de polluant ou du flux massique.

Afin d'obtenir une meilleure caractérisation de la pollution au droit du site, les données des sondages réalisées en limite de la zone d'étude lors de l'étude antérieure (PM4 et PM6) seront également intégrées à la définition de la zone de pollution.

O.2.1. Méthode reposant sur des constats de terrain et indices organoleptiques

Cette méthode permet d'apporter des éléments, généralement qualitatifs, pour définir une pollution concentrée. Cette méthode doit être complétée par d'autres méthodes pour recueillir l'ensemble des données nécessaires à la définition de la zone de pollution concentrée. Elle se base sur les données suivantes :

- l'observation visuelle des sols (par exemple la couleur noire) ;
- l'extension horizontale et verticale des observations ;
- les résultats des mesures de terrain (réponses PID) ;
- sur les eaux, présence d'une phase flottante ou coulante (emprise horizontale et épaisseur).

Cette méthode, facile à mettre en œuvre, présente toutefois des limites :

- elle est peu adaptée aux métaux et aux composés peu ou pas volatils en règle générale ;
- la couleur grise ou noire n'est pas forcément synonyme de pollution ; elle peut être liée à la décomposition naturelle de la matière organique en condition anaérobie.

Compte tenu du fait que les campagnes d'investigations ont été réalisées avec différents appareils de mesure de terrain et notamment que de nombreuses valeurs sont égales à 0 sur les premières campagnes d'investigations, seuls les constats de terrain sur la couleur noire ainsi que les odeurs seront pris en compte pour l'analyse suivante. La présence de déchets inertes de type blocs, ferraille, et graviers ne sera pas considéré comme indice organoleptique de pollution pour cette analyse.

Les constats de terrain pris en compte sont synthétisés dans le Tableau 38 et la Figure 32.

Tableau 38 : Observations organoleptiques

Sondage (profondeur en m)	Observations organoleptiques
SD3/I (0,20-1,50)	Couleur noire avec déchets
SD4/I (0,20-1,50)	Couleur noire avec déchets plastiques
SD5/I (0,20-1,50)	Couleur noire avec déchets
SD7/I (0,10-1,50)	Couleur noire avec déchets plastiques
ST5/I (0,10-1,10)	Couleur noire et déchets de plastique et de ferraille
ST6/I (0,30-1,30)	Couleur noire et odeur d'essence
ST7/I (0,20-1,20)	Couleur noire et déchets de plastique et de ferraille
ST8/I (0,30-1,30)	Couleur noir et déchet de ferraille
ST16 (0,25-0,80)	Couleur noire et odeur suspecte, déchets de ferraille, fibres, verre

Sondage (profondeur en m)	Observations organoleptiques
ST17 (0,25-0,60)	Couleur noire et déchet de ferraille
ST18 (0,25-0,80)	Couleur noire et déchets (ferraille et câbles)
ST19 (0,25-0,80)	Couleur noire
ST20 (0,25-0,70)	Couleur noire et déchets de ferraille
ST21 (0,25-0,80)	Couleur noire, odeur suspecte et déchets de ferraille
ST29 (1,10-1,50)	Couleur noire
ST30 (0,05-1,00)	Couleur noire et ferraille
ST31 (0,05-1,00)	Couleur noire
ST32 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (fils électriques, ferraille, fibres, plastique)
ST33 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (fils électriques, ferraille, fibres, plastique)
ST34 (0,05-1,50)	Couleur noire et beaucoup de ferraille
ST35 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (ferraille, verre, bois, fibres)
ST36 (0,05-1,50)	Couleur noire
ST37 (0,05-0,50)	Couleur noire
ST38 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (ferraille, fibres et bois)
ST39 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (bois, ferraille, verre, fibres)
ST40 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (fibres, verre, ferraille, bois)
ST41 (0,05-1,50)	Couleur noire et déchets (plastique, ferraille, fibres, cuivre, câbles)
ST42 (0,25-1,50)	Couleur noire et déchets (ferraille, bois, fibres)

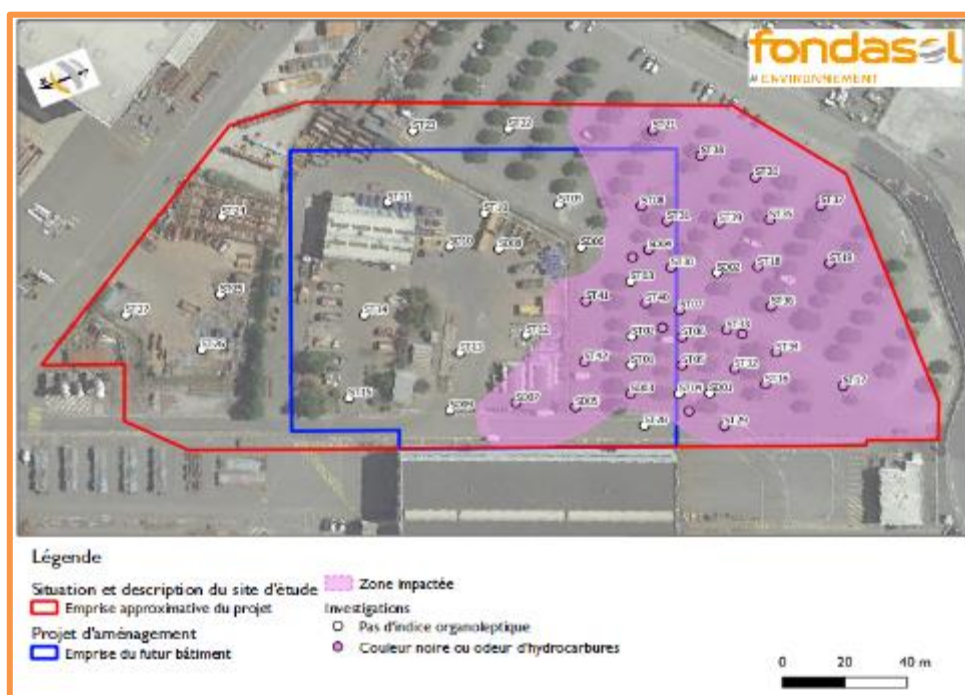


Figure 32 : Délimitation de la zone de pollution concentrée via les constats de terrain

D'après la réalisation d'une cartographie basée sur les constats de terrain, il apparaît que la zone sud du site d'étude est polluée.

O.2.2. Méthode reposant sur une analyse statistique

L'objectif de l'analyse statistique proposée est de caractériser la présence d'un éventuel bruit de fond et/ou de valeurs anormales significativement différentes dans la distribution des concentrations.

Pour ce faire, FONDASOL s'est basé sur l'ensemble de ses résultats d'analyse.

O.2.2.1. Les teneurs maximales, moyennes, les percentiles

Les écarts importants entre l'écart-type et la concentration médiane, ou encore, entre la valeur médiane et la concentration moyenne montrent des valeurs extrêmes représentatives d'une pollution concentrée.

Les tableaux ci-dessous présentent les analyses statistiques pour l'ensemble des composés analysés.

Tableau 39 : Analyse statistique des données en métaux

Paramètre	Antimoine	Arsenic	Baryum	Cadmium	Chrome	Cuivre	Mercure	Molybdène	Nickel	Plomb	Zinc
Nombre de valeurs	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Concentration maximale	400	540	810	12,0	290	26000	0,6	120	760	3400	33000
Concentration moyenne	85	157	381	5,0	181	5305	0,3	70	319	1581	17307
Médiane	73	120	350	4,2	210	2900	0,2	61	260	1200	16000
Ecart type	94	134	207	3,3	83	6427	0,2	41	225	992	8820
Percentile 25	35	73	215	2,6	97	1650	0,2	38	140	895	10800
Percentile 75	93	205	500	7,6	245	6300	0,4	110	420	2300	24000
Percentile 80	97	254	548	8,2	254	6840	0,4	112	536	2460	24400
Percentile 90	118	282	634	8,5	282	9400	0,6	120	664	3000	28400
Percentile 95	211	365	712	9,6	290	15500	0,6	120	704	3260	30900
Ecart moyenne et médiane	14%	23%	8%	16%	16%	45%	21%	13%	19%	24%	8%
Ecart écart type et médiane	11%	14%	46%	34%	54%	21%	40%	42%	30%	37%	49%

Des écarts peu importants (< 50%) sont observés pour les métaux, cela signifie qu'il n'y a pas de valeurs extrêmes significatives de pollution concentrée. Les concentrations sont particulièrement élevées pour le cuivre, le plomb et le zinc mais cela est lié à un bruit de fond géochimique global attribuable au site.

Tableau 40 : Analyse statistique des données pour les HC C5-C40, HAP, naphtalène, BTEX et PCB

Paramètre	HCT C10-C40	HC C5-C10	HAP	Naphtalène	BTEX	PCB
Nombre de valeurs	56	19	56	56	56	52
Concentration maximale	4900	23	2750	343	28.70	12.69
Concentration moyenne	709	5.1	99	6.53	2.11	0.65
Médiane	380	1.8	8	0.14	0.46	0.17
Ecart type	862	6.8	484	45.79	4.37	1.94
Percentile 25	150	1.0	1	0.05	0.30	0.05
Percentile 75	1025	5.2	16	0.41	2.03	0.36
Percentile 80	1100	7.9	22	0.49	2.45	0.42
Percentile 90	1600	15.2	46	0.67	5.31	0.77
Percentile 95	2275	20.3	63	1.44	8.10	2.87
Ecart moyenne et médiane	46%	65%	92%	98%	78%	74%
Ecart écart type et médiane	22%	34%	390%	601%	107%	199%

Des écarts importants (>50%) sont observés pour les HAP, le naphtalène, les BTEX et les PCB. Cela indique l'existence de concentrations élevées potentiellement significatives d'une pollution concentrée pour ces composés. A contrario, aucun écart important n'apparaît pour les HCT.

O.2.2.2. L'analyse des fréquences d'occurrence des concentrations

L'analyse des fréquences d'occurrence des concentrations via l'outil statistique fréquence d'Excel (calcul des fréquences relative et cumulée) puis réalisation de graphiques de la fréquence en fonction de la concentration. Ces graphiques peuvent permettre de distinguer les concentrations « anormales » par rapport à un bruit de fond local.

EN HAP

Le Tableau 41 présente les fréquences d'occurrence relatives et cumulées de HAP par intervalle de 15 mg/kg.

Tableau 41 : Fréquence d'occurrence des concentrations en HAP dans les sols– intervalle de 15 mg/kg

HAP				HAP			
Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)	Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)
0	0	0	0,0%	510	0	55	98,2%
15	41	41	73,2%	525	0	55	98,2%
30	7	48	85,7%	540	0	55	98,2%
45	3	51	91,1%	555	0	55	98,2%
60	3	54	96,4%	570	0	55	98,2%
75	1	55	98,2%	585	0	55	98,2%
90	0	55	98,2%	600	0	55	98,2%
105	0	55	98,2%	615	0	55	98,2%
120	0	55	98,2%	630	0	55	98,2%
135	0	55	98,2%	645	0	55	98,2%
150	0	55	98,2%	660	0	55	98,2%
165	0	55	98,2%	675	0	55	98,2%
180	0	55	98,2%	690	0	55	98,2%
195	0	55	98,2%	705	0	55	98,2%
210	0	55	98,2%	720	0	55	98,2%
225	0	55	98,2%	735	0	55	98,2%
240	0	55	98,2%	750	0	55	98,2%
255	0	55	98,2%	765	0	55	98,2%
270	0	55	98,2%	780	0	55	98,2%
285	0	55	98,2%	795	0	55	98,2%
300	0	55	98,2%	810	0	55	98,2%
315	0	55	98,2%	825	0	55	98,2%
330	0	55	98,2%	840	0	55	98,2%
345	0	55	98,2%	855	0	55	98,2%
360	0	55	98,2%	870	0	55	98,2%
375	0	55	98,2%	885	0	55	98,2%
390	0	55	98,2%	900	0	55	98,2%
405	0	55	98,2%	915	0	55	98,2%
420	0	55	98,2%	930	0	55	98,2%
435	0	55	98,2%	945	0	55	98,2%
450	0	55	98,2%	960	0	55	98,2%
465	0	55	98,2%	975	0	55	98,2%
480	0	55	98,2%	990	0	55	98,2%
495	0	55	98,2%	1005	0	55	98,2%
				1020	0	55	98,2%
				1035	0	55	98,2%
				1050	0	55	98,2%

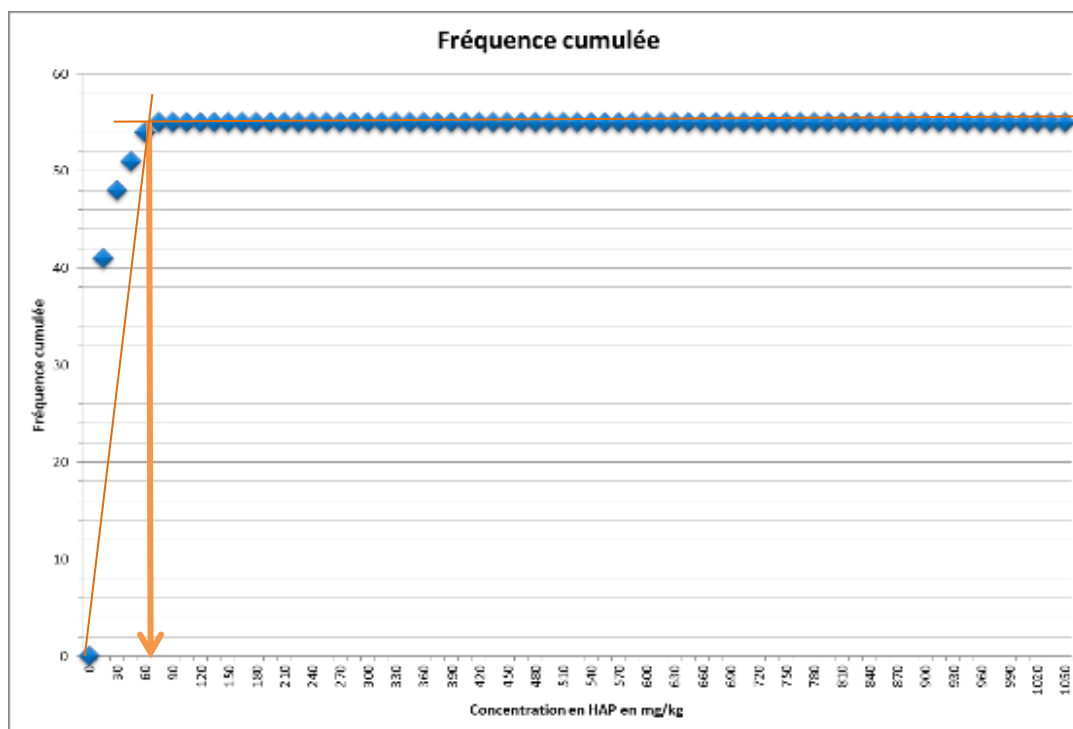


Figure 33 : Fréquence cumulée des teneurs en HAP

La Figure 33 permet de déterminer une rupture de pente autour de 60 mg/kg MS. Cette valeur correspond au percentile 95 (de 63 mg/kg MS). En effet, une teneur particulièrement élevée (à 2 750 mg/kg MS) tire l'ensemble des valeurs vers le haut.

Le graphique de répartition des concentrations (Figure 34) réalisé ci-dessous permet d'identifier cette valeur.

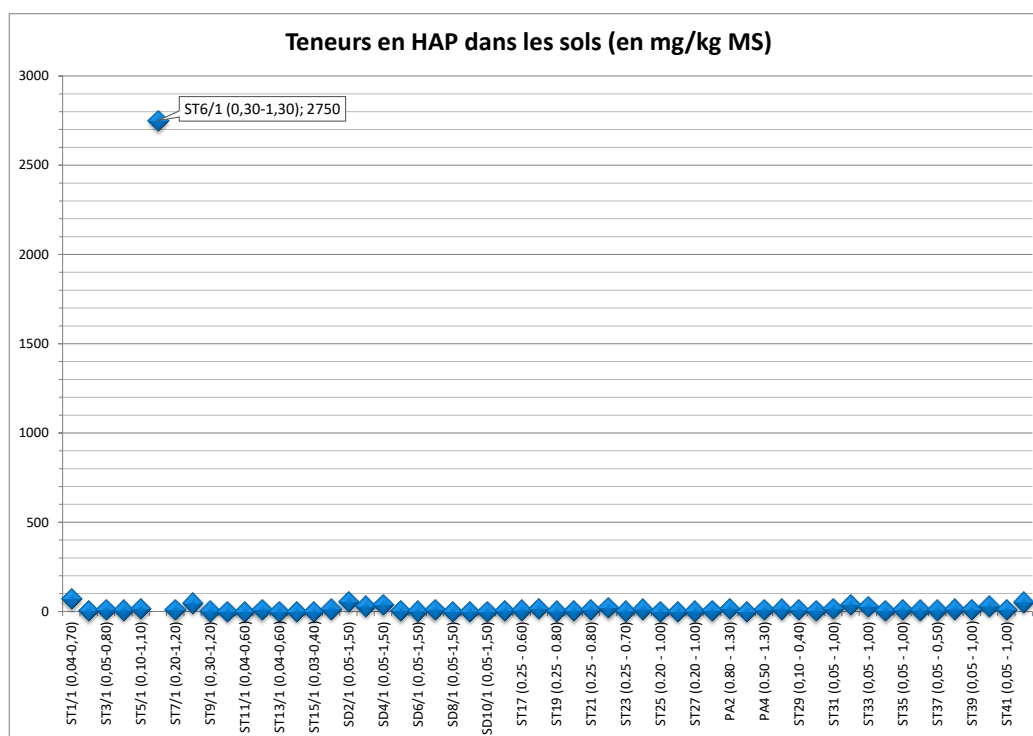


Figure 34 : Répartition des concentrations en HAP

Cette figure fait apparaître la valeur de 2 750 mg/kg MS au droit de ST6 entre 0,30 et 1,30 m de profondeur.

Teneurs en HAP dans les sols (en mg/kg MS)

Scatter plot showing HAP concentrations (mg/kg MS) for various sampling points. The y-axis ranges from 0 to 100. A horizontal orange line is at 60 mg/kg MS. A callout box for ST1/1 shows a concentration of 71.5 mg/kg MS. The x-axis lists sampling points with their respective depth ranges.

Point	Profondeur (m)	Conc. HAP (mg/kg MS)
ST1/1	0,04 - 0,70	71,5
ST3/1	0,05 - 0,80	12
ST5/1	0,10 - 1,10	16
ST7/1	0,20 - 1,20	47
ST9/1	0,30 - 1,20	2
ST11/1	0,04 - 0,60	1
ST13/1	0,04 - 0,60	11
ST15/1	0,03 - 0,40	1
SD2/1	0,05 - 1,50	15
SD4/1	0,05 - 1,50	38
SD6/1	0,05 - 1,50	4
SD8/1	0,05 - 1,50	11
SD10/1	0,05 - 1,50	1
ST17	0,25 - 0,60	8
ST19	0,25 - 0,80	18
ST21	0,25 - 0,80	5
ST23	0,25 - 0,70	23
ST25	0,20 - 1,00	14
ST27	0,20 - 1,00	2
PA2	0,80 - 1,30	17
PA4	0,50 - 1,30	11
ST29	0,10 - 0,40	14
ST31	0,05 - 1,00	18
ST33	0,05 - 1,00	38
ST35	0,05 - 1,00	5
ST37	0,05 - 0,50	8
ST39	0,05 - 1,00	14
ST41	0,05 - 1,00	11

Sur ce graphique, il n'est pas possible d'identifier un pool d'échantillons, la répartition des teneurs semble relativement homogène. Toutefois, avec une valeur limite de 60 mg/kg MS, une valeur problématique est mise en évidence à 71,5 mg/kg MS au droit de ST1 entre 0 et 70 cm de profondeur environ.

Le Tableau 42 présente les fréquences d'occurrence relatives et cumulées de naphthalène par intervalle de 0,1 mg/kg.

Tableau 42 : Fréquence d'occurrence des concentrations en naphthalène dans les sols– intervalle de 0,1 mg/kg

Naphtalène				Naphtalène			
Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)	Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)
0	0	0	0,0%	3,8	0	54	96,4%
0,1	24	24	42,9%	3,9	0	54	96,4%
0,2	8	32	57,1%	4	0	54	96,4%
0,3	5	37	66,1%	4,1	0	54	96,4%
0,4	4	41	73,2%	4,2	0	54	96,4%
0,5	5	46	82,1%	4,3	0	54	96,4%
0,6	3	49	87,5%	4,4	0	54	96,4%
0,7	1	50	89,3%	4,5	0	54	96,4%
0,8	2	52	92,9%	4,6	0	54	96,4%
0,9	1	53	94,6%	4,7	0	54	96,4%
1	0	53	94,6%	4,8	0	54	96,4%
1,1	0	53	94,6%	4,9	0	54	96,4%
1,2	0	53	94,6%	5	0	54	96,4%
1,3	0	53	94,6%	5,1	0	54	96,4%
1,4	0	53	94,6%	5,2	0	54	96,4%
1,5	0	53	94,6%	5,3	0	54	96,4%
1,6	0	53	94,6%	5,4	0	54	96,4%
1,7	0	53	94,6%	5,5	0	54	96,4%
1,8	0	53	94,6%	5,6	0	54	96,4%
1,9	0	53	94,6%	5,7	0	54	96,4%
2	0	53	94,6%	5,8	0	54	96,4%
2,1	0	53	94,6%	5,9	0	54	96,4%
2,2	0	53	94,6%	6	0	54	96,4%
2,3	0	53	94,6%	6,1	0	54	96,4%
2,4	0	53	94,6%	6,2	0	54	96,4%
2,5	0	53	94,6%	6,3	0	54	96,4%
2,6	0	53	94,6%	6,4	0	54	96,4%
2,7	0	53	94,6%	6,5	0	54	96,4%
2,8	0	53	94,6%	6,6	0	54	96,4%
2,9	0	53	94,6%	6,7	0	54	96,4%
3	0	53	94,6%	6,8	0	54	96,4%
3,1	1	54	96,4%	6,9	0	54	96,4%
3,2	0	54	96,4%	7	0	54	96,4%
3,3	0	54	96,4%	7,1	0	54	96,4%
3,4	0	54	96,4%	7,2	0	54	96,4%
3,5	0	54	96,4%	7,3	0	54	96,4%
3,6	0	54	96,4%	7,4	0	54	96,4%
3,7	0	54	96,4%	7,5	1	55	98,2%

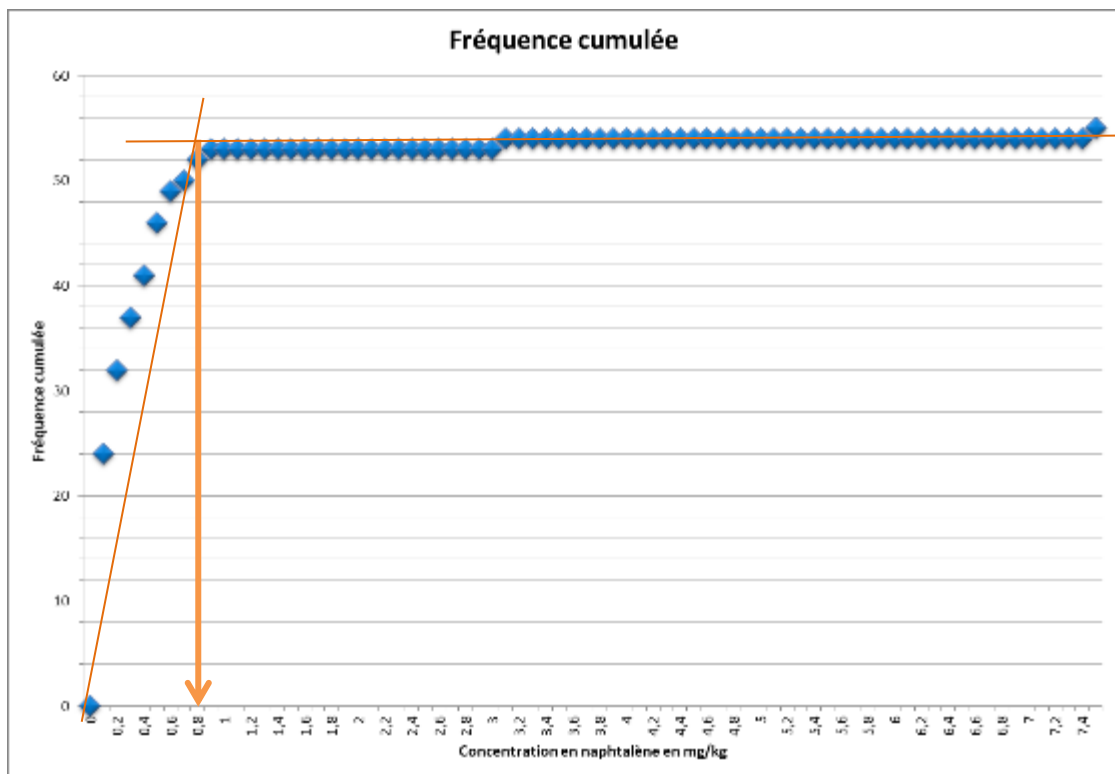


Figure 36 : Fréquence cumulée des teneurs en naphthalène

La Figure 36 permet de déterminer une rupture de pente à 0,8 mg/kg MS. Cette valeur se rapproche du percentile 90 (de 0,67 mg/kg MS).

La répartition des concentrations en naphthalène est présentée ci-dessous.

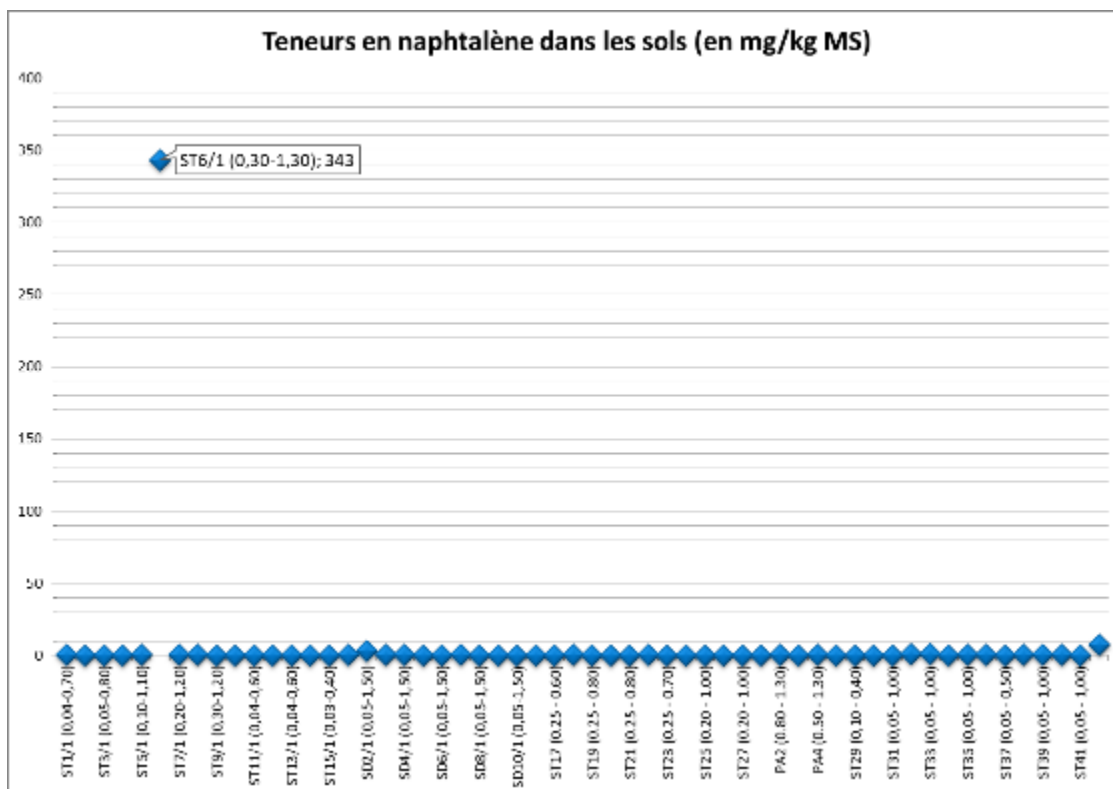


Figure 37 : Répartition des concentrations en naphtalène

Cette figure fait apparaître la valeur de 343 mg/kg MS au droit de ST6 entre 0,30 et 1,30 m de profondeur (au droit de l'impact identifié en HAP).

Compte tenu du grand intervalle de valeurs, un zoom a été réalisé entre 0 et 10 mg/kg et est présenté ci-dessous.

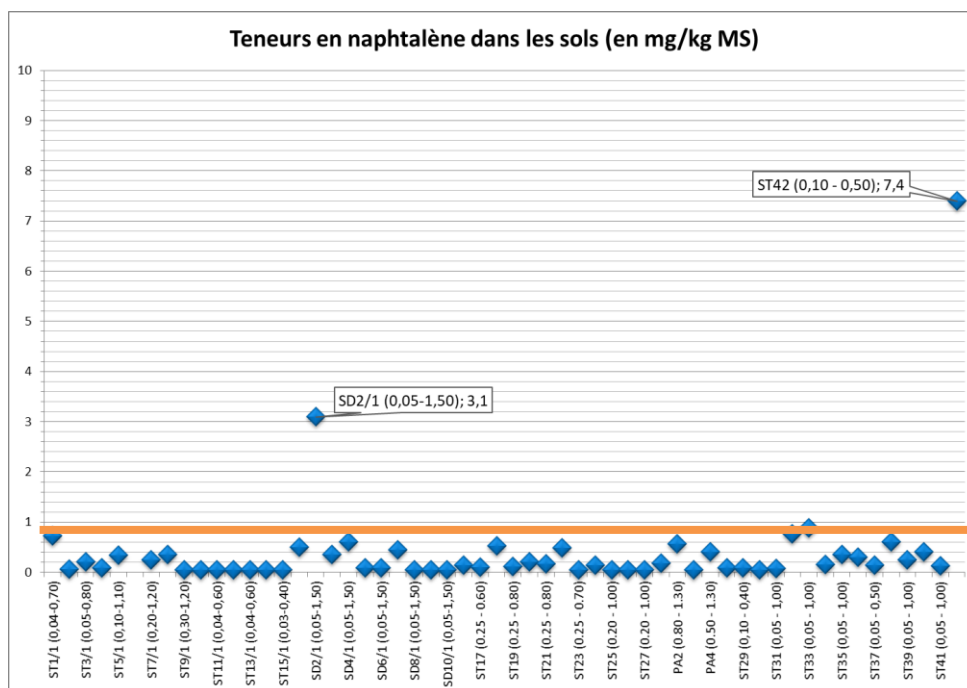


Figure 38 : Répartition des concentrations en naphtalène – entre 0 et 10 mg/kg MS

Sur ce graphique, un pool d'échantillons apparaît entre 0 et 1 environ ainsi que deux teneurs anormales à 7,4 mg/kg MS au droit de ST42 entre 10 et 50 cm et 3,1 mg/kg MS

au droit de SD2 entre 0 et 1,5 m environ. La valeur seuil de 0,8 mg/kg MS parait donc pertinente.

EN BTEX

Le Tableau 43 présente les fréquences d'occurrence relatives et cumulées de BTEX par intervalle de 1 mg/kg.

Tableau 43 : Fréquence d'occurrence des concentrations en BTEX dans les sols– intervalle de 1 mg/kg

BTEX				BTEX			
Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)	Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)
0	0	0	0,0%	26	0	55	98,2%
1	36	36	64,3%	27	0	55	98,2%
2	6	42	75,0%	28	0	55	98,2%
3	6	48	85,7%	29	1	56	100,0%
4	2	50	89,3%	30	0	56	100,0%
5	0	50	89,3%	31	0	56	100,0%
6	0	50	89,3%	32	0	56	100,0%
7	1	51	91,1%	33	0	56	100,0%
8	2	53	94,6%	34	0	56	100,0%
9	0	53	94,6%	35	0	56	100,0%
10	1	54	96,4%	36	0	56	100,0%
11	0	54	96,4%	37	0	56	100,0%
12	0	54	96,4%	38	0	56	100,0%
13	1	55	98,2%	39	0	56	100,0%
14	0	55	98,2%	40	0	56	100,0%
15	0	55	98,2%	41	0	56	100,0%
16	0	55	98,2%	42	0	56	100,0%
17	0	55	98,2%	43	0	56	100,0%
18	0	55	98,2%	44	0	56	100,0%
19	0	55	98,2%	45	0	56	100,0%
20	0	55	98,2%	46	0	56	100,0%
21	0	55	98,2%	47	0	56	100,0%
22	0	55	98,2%	48	0	56	100,0%
23	0	55	98,2%	49	0	56	100,0%
24	0	55	98,2%	50	0	56	100,0%
25	0	55	98,2%				

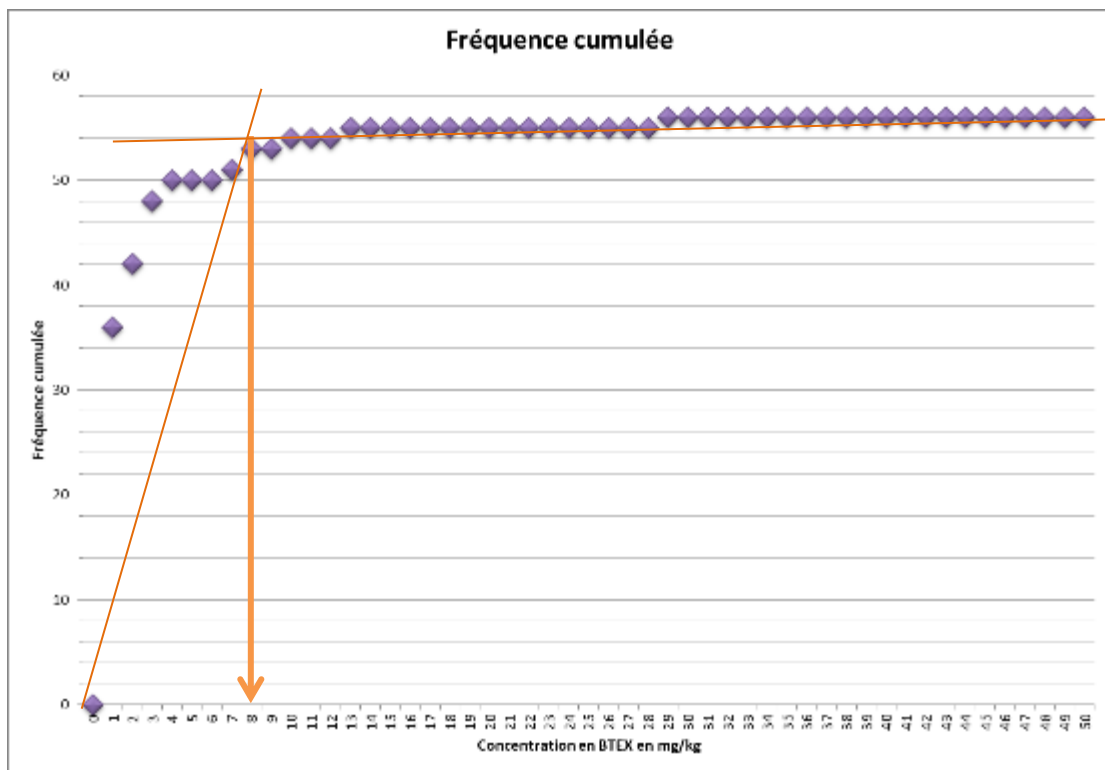


Figure 39 : Fréquence cumulée des teneurs en BTEX

La Figure 39 permet de déterminer une rupture de pente à 8 mg/kg MS. Cette valeur se rapproche du percentile 95 (de 8,10 mg/kg MS).

Le graphique de répartition des concentrations en BTEX est présenté ci-dessous.

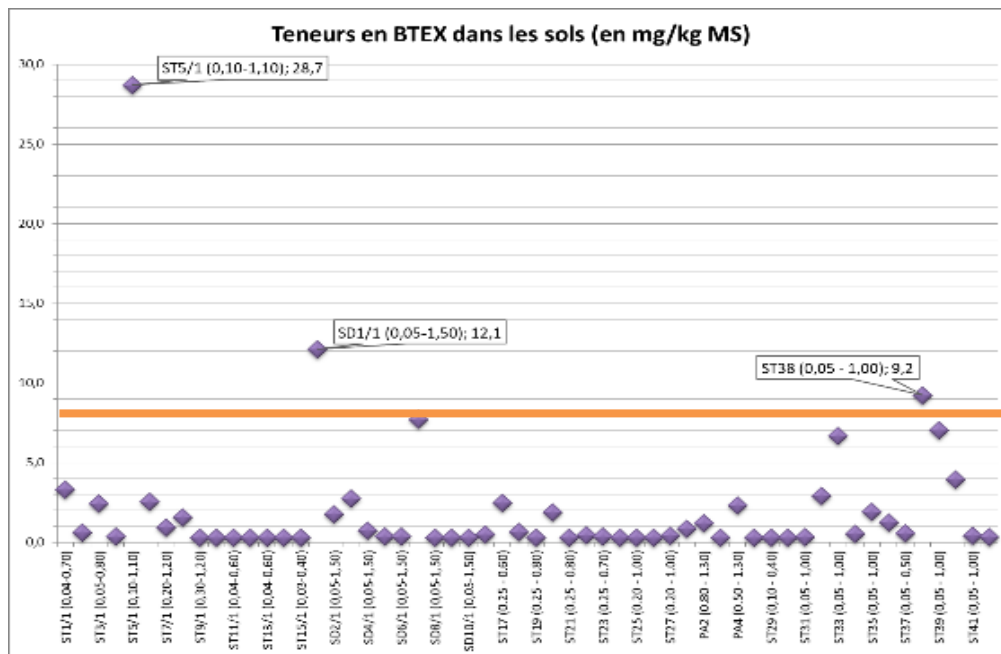


Figure 40 : Répartition des concentrations en BTEX

Cette figure fait apparaître la valeur maximale de 28,7 mg/kg MS au droit de ST5 entre 0,10-1,10 m de profondeur ainsi qu'un pool d'échantillons de valeurs plus faibles dont quelques-unes sortent du lot : SD1 (0,05-1,50) pour une valeur de 12,1 mg/kg MS et ST38 (0,05-1,00) pour une valeur de 9,2 mg/kg MS en BTEX. La valeur limite de 8 mg/kg MS paraît cohérente.

EN PCB

Le Tableau 43 présente les fréquences d'occurrence relatives et cumulées de PCB par intervalle de 0,2 mg/kg.

Tableau 44 : Fréquence d'occurrence des concentrations en PCB dans les sols– intervalle de 0,2 mg/kg

PCB				PCB			
Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)	Gamme de concentration (mg/kg MS)	Fréquence	Frequence cumulée	Frequence cumulée (%)
0	0	0	0.0%	7.2	0	51	98.1%
0.2	30	30	57.7%	7.4	0	51	98.1%
0.4	10	40	76.9%	7.6	0	51	98.1%
0.6	6	46	88.5%	7.8	0	51	98.1%
0.8	1	47	90.4%	8	0	51	98.1%
1	1	48	92.3%	8.2	0	51	98.1%
1.2	0	48	92.3%	8.4	0	51	98.1%
1.4	0	48	92.3%	8.6	0	51	98.1%
1.6	0	48	92.3%	8.8	0	51	98.1%
1.8	0	48	92.3%	9	0	51	98.1%
2	0	48	92.3%	9.2	0	51	98.1%
2.2	0	48	92.3%	9.4	0	51	98.1%
2.4	0	48	92.3%	9.6	0	51	98.1%
2.6	0	48	92.3%	9.8	0	51	98.1%
2.8	0	48	92.3%	10	0	51	98.1%
3	2	50	96.2%	10.2	0	51	98.1%
3.2	0	50	96.2%	10.4	0	51	98.1%
3.4	0	50	96.2%	10.6	0	51	98.1%
3.6	0	50	96.2%	10.8	0	51	98.1%
3.8	0	50	96.2%	11	0	51	98.1%
4	0	50	96.2%	11.2	0	51	98.1%
4.2	0	50	96.2%	11.4	0	51	98.1%
4.4	0	50	96.2%	11.6	0	51	98.1%
4.6	0	50	96.2%	11.8	0	51	98.1%
4.8	0	50	96.2%	12	0	51	98.1%
5	0	50	96.2%	12.2	0	51	98.1%
5.2	0	50	96.2%	12.4	0	51	98.1%
5.4	0	50	96.2%	12.6	0	51	98.1%
5.6	0	50	96.2%	12.8	1	52	100.0%
5.8	1	51	98.1%	13	0	52	100.0%
6	0	51	98.1%	13.2	0	52	100.0%
6.2	0	51	98.1%	13.4	0	52	100.0%
6.4	0	51	98.1%	13.6	0	52	100.0%
6.6	0	51	98.1%	13.8	0	52	100.0%
6.8	0	51	98.1%	14	0	52	100.0%
7	0	51	98.1%	14.2	0	52	100.0%
				14.4	0	52	100.0%
				14.6	0	52	100.0%
				14.8	0	52	100.0%
				15	0	52	100.0%

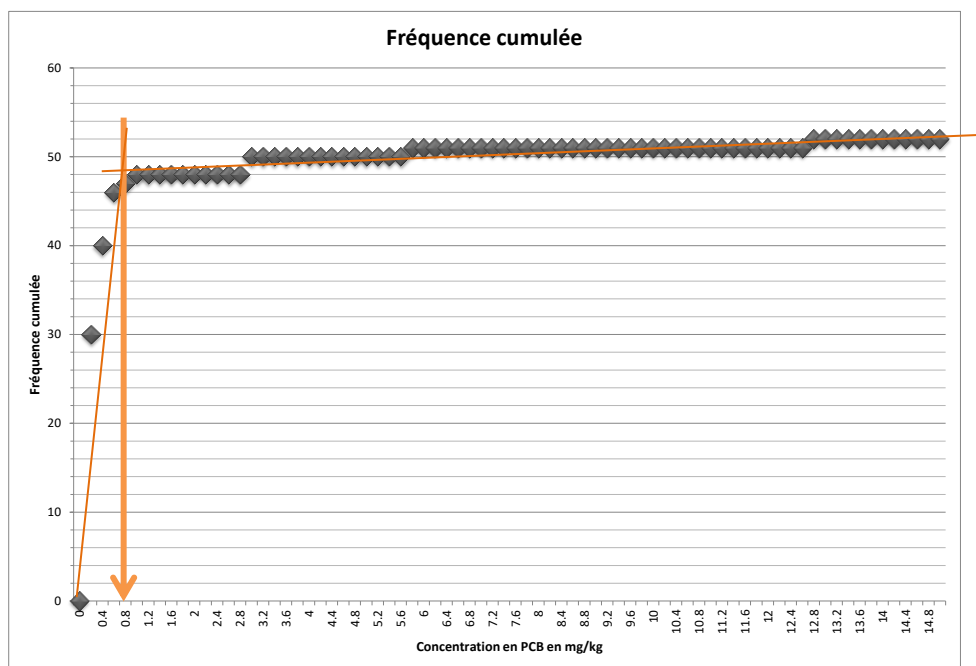


Figure 41 : Fréquence cumulée des teneurs en PCB

La Figure 41 permet de déterminer une rupture de pente à 0,8 mg/kg MS. Cette valeur se rapproche du percentile 90 (de 0,77 mg/kg MS).

Le graphique de répartition des concentrations en PCB est présenté ci-dessous.

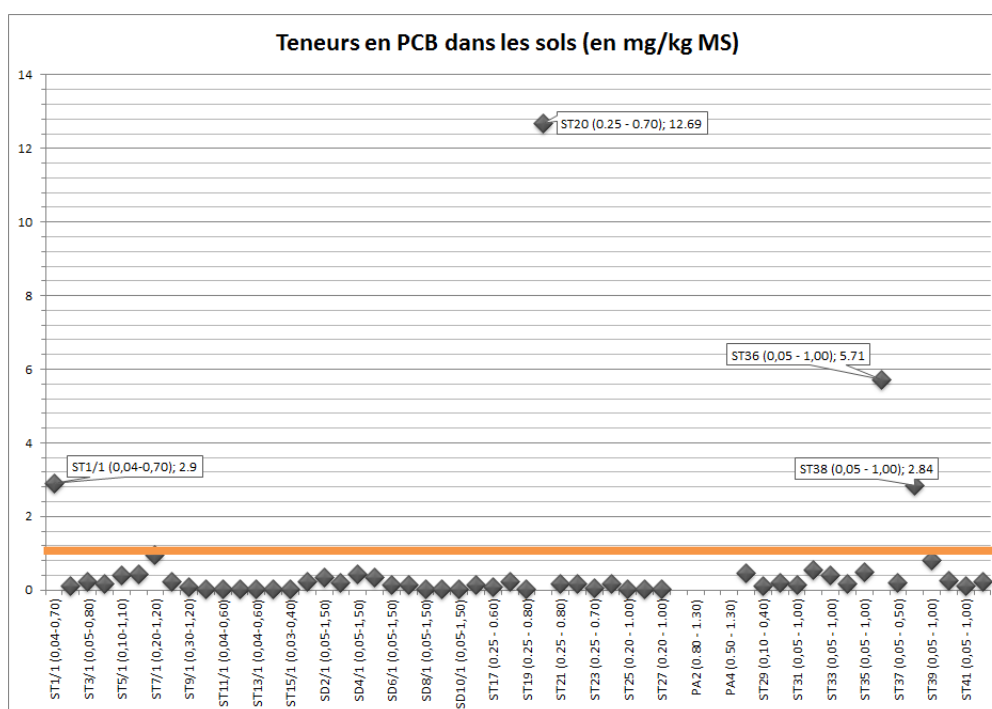


Figure 42 : Répartition des concentrations en PCB

Cette figure fait apparaître un pool d'échantillon en dessous de 0,8 mg/kg MS environ ainsi que 4 valeurs anomaliques. La valeur limite de 0,8 mg/kg MS paraît ainsi cohérente.

Sur la base de cette analyse statistique, une valeur limite de définition de la pollution concentrée dans les sols en hydrocarbures sur le site concerné pourrait être proposée à :

- 60 mg/kg MS en HAP – permettant de gérer également l'impact en HCT au droit de ST6 ;
- 0,8 mg/kg MS en naphtalène ;
- 8 mg/ kg MS en BTEX;
- 0,8 mg/kg MS en PCB.

Sur la base de l'analyse statistique, la Figure 43 ci-dessous localise sur le site les sondages présentant des teneurs dans les sols supérieures aux seuils de coupure définis ci-avant.

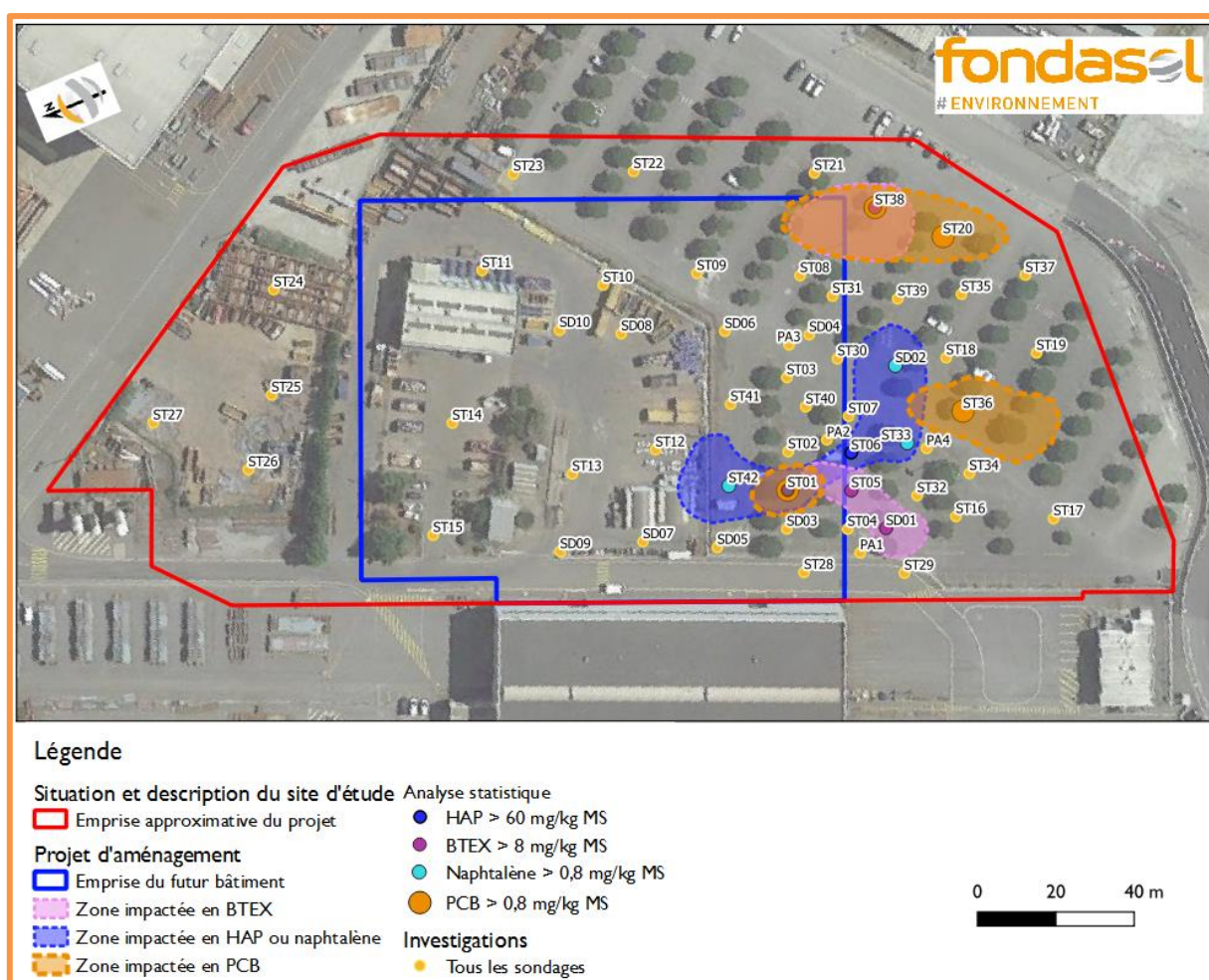


Figure 43 : Délimitation des zones de pollution concentrée via l'analyse statistique

D'après la figure ci-dessus, une zone de pollution concentrée apparaît en HAP ou naphtalène (en bleu) et deux zones en BTEX (en rose). Trois zones impactées en PCB apparaissent dont une est localisée également au droit d'une zone impactée en HAP (au droit de ST1).

Ces zones sont plus restreintes que la zone délimitée par les constats de terrain et paraît a priori plus raisonnable. Toutefois, il convient de confirmer ces zones par le biais d'une troisième méthode d'analyse.

O.2.3. Méthode reposant sur l'utilisation d'une méthode d'interprétation cartographique

L'objectif de cette méthode est de visualiser la répartition spatiale des mesures de pollution (concentrations) en utilisant une technique d'interpolation afin de permettre une interprétation de cette répartition.

Ces méthodes permettent d'aboutir à des courbes d'iso-concentration pour chacun des polluants.

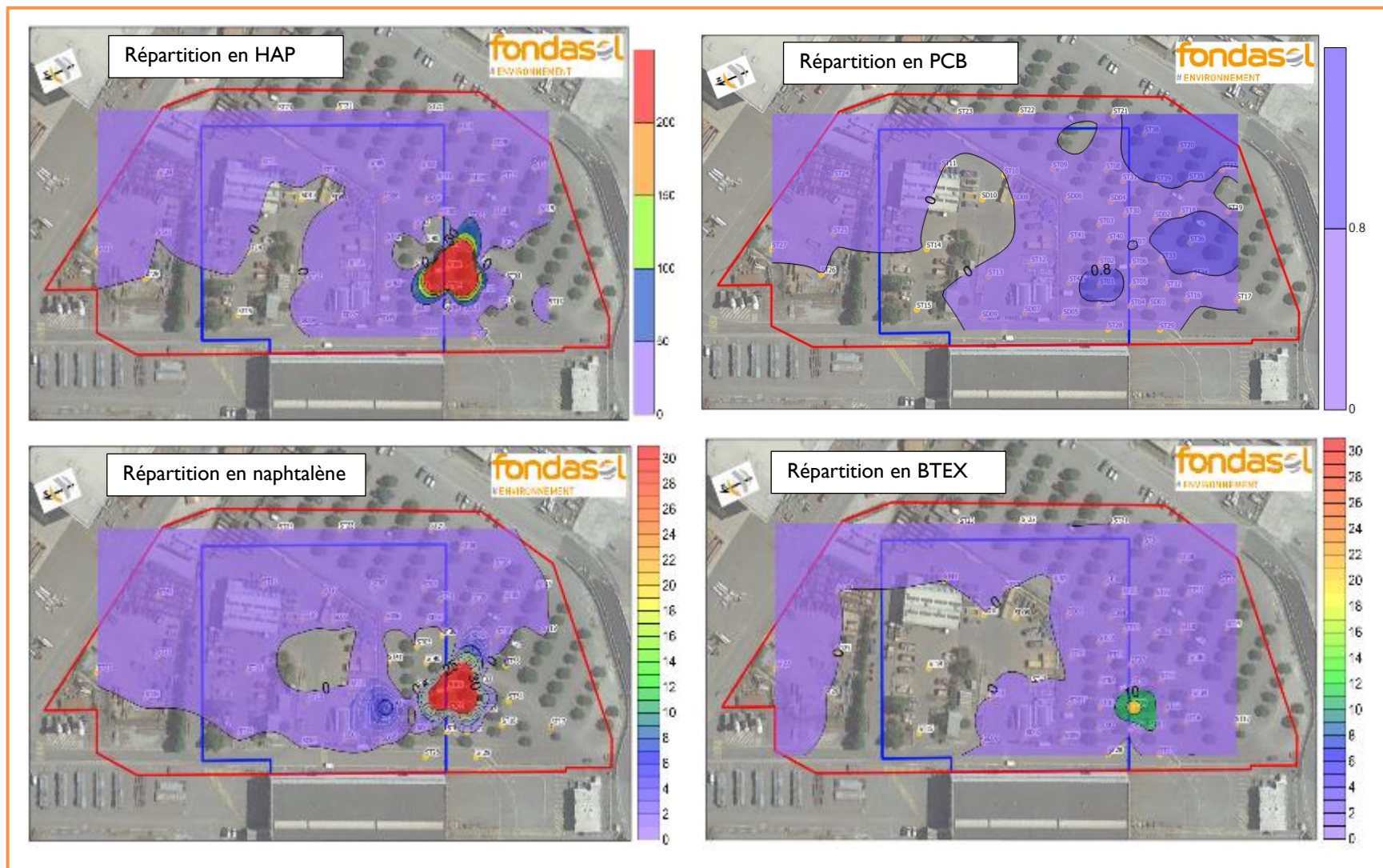


Figure 44 : Cartes de pollution établies avec une méthode d'interpolation (krigeage – avec le logiciel surfer)

D'après les cartographies ci-dessus, il apparaît :

- une zone de pollution concentrée en BTEX et en HAP (incluant également un impact en HCT) ;
- deux zones de pollution concentrée en naphtalène ;
- trois zones de pollution concentrée en PCB.

Ces zones se superposent avec les zones délimitées via l'analyse statistique. Elles seront ainsi retenues pour la suite du rapport.

O.2.4. Conclusion sur le seuil de coupure retenu

Dans le cadre de cette étude, les seuils de coupure retenus sont :

- 60 mg/kg MS en HAP ;
- 0,8 mg/kg MS en naphtalène ;
- 8 mg/ kg MS en BTEX;
- 0,8 mg/kg MS en PCB.

Les zones de pollution concentrée identifiées d'après les différentes méthodes d'analyses sont présentées dans la figure et le tableau ci-dessous.

A noter que la pollution n'a pas été délimitée en profondeur. Le volume de terres impactées se base sur les analyses réalisées.

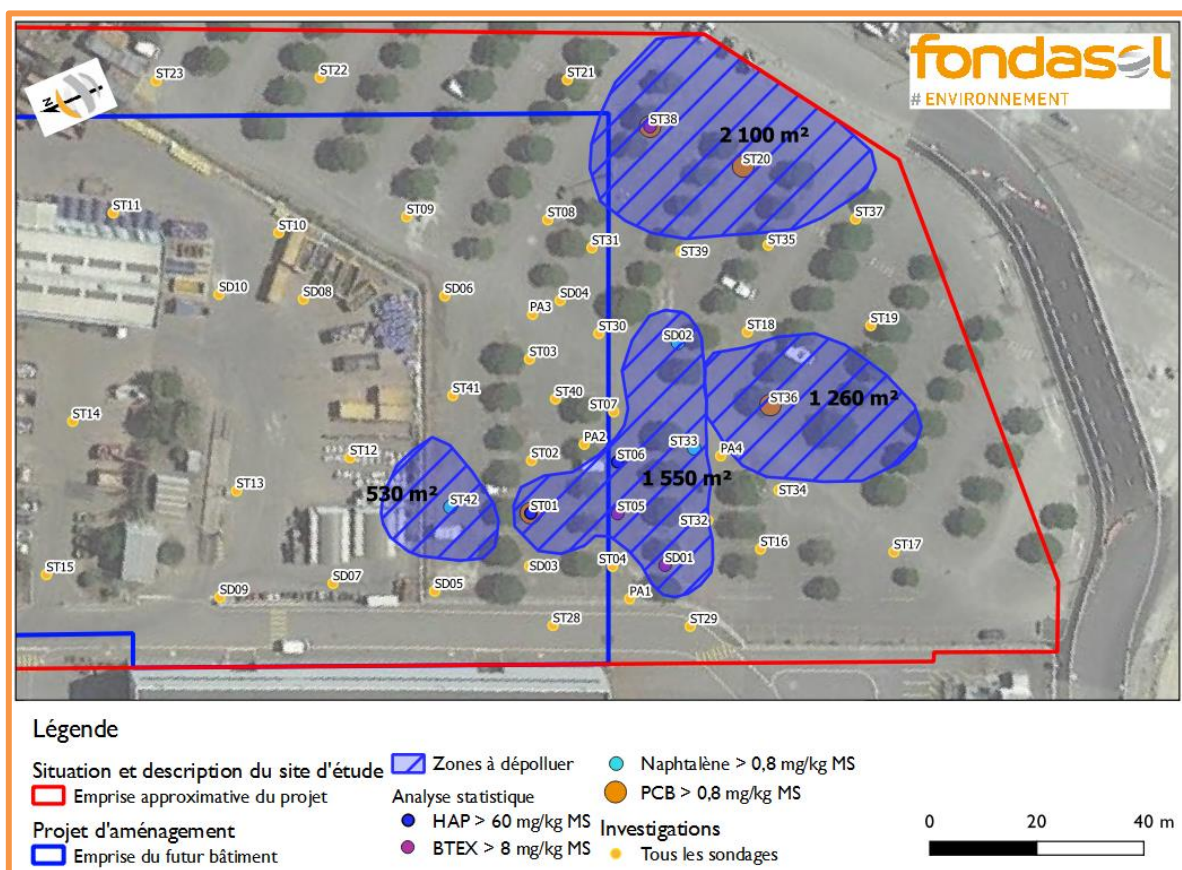


Figure 45 : Délimitation des zones polluées

Tableau 45 : Délimitation de la zone de pollution concentrée par maille sans prise en compte du projet d'aménagement

Polluants	Maille	Echantillons concernés	Epaisseur concernée (m)	Superficie (m²)	Volume (m³)
HAP, naphtalène, BTEX et PCB	1	ST1/I (0,04-0,70), ST5/I (0,10-1,10), ST6/I (0,30-1,30), ST33 (0,05-1,00), SD1/I (0,05-1,50), SD2/I (0,05-1,50)	1,50	1 550	2 330
Naphtalène	2	ST42 (0,10-0,50)	0,5	530	270
PCB	3	ST36 (0,05-1,00)	1,0	1 300	1 300
BTEX et PCB	4	ST20 (0,25-0,70), ST38 (0,05-1,00)	1,0	2 100	2 100
TOTAL zone impactée en HC C10-C40					5 990

Le volume total de terres impactées à traiter serait ainsi de 5 990 m³ environ.

Cet objectif de réhabilitation tient compte du seuil de coupure et des éléments suivants :

- la mobilité des polluants ;
- les techniques de dépollution disponibles ;
- des aménagements futurs ;
- les objectifs de qualité des milieux ;
- les risques sanitaires ;
- les aspects financiers.

Les points suivants précisent pourquoi les seuils de coupure définis ci-avant sont bien les objectifs de réhabilitation.

- Compte tenu des usages futurs du site et des éventuelles restrictions mises en œuvre, les pollutions résiduelles laissées en place dans les sols permettent le respect des objectifs de qualité des milieux ou conduisent à des Analyses des Risques Résiduels (ARR) prédictives acceptables.
- On note l'absence de capacité de relargage des sols au droit du site entraînant une dégradation significative de la qualité des eaux souterraines (contraire aux dispositions de l'arrêté du 17 juillet 2009 relatif aux mesures de prévention ou de limitation des introductions de polluants dans les eaux souterraines).
- La qualité des eaux est comparable entre l'amont et l'aval pour les substances liées à l'activité actuelle ou historique menée sur le site.
- Il permet le traitement des volumes limités de sol présentant la masse de polluant la plus importante (c'est-à-dire les sols dont les concentrations sont supérieures au seuil de coupure théorique) de manière financièrement acceptable au regard du bilan coûts-avantages.

O.3. Revue des techniques disponibles

O.3.1. Classement par critères propres au site

Le choix d'une technique pour traiter et maîtriser les sources et les impacts est guidée par :

- les conditions d'accès à la source : aisées ;
- les conditions physico-chimiques du milieu à traiter : oxygénation, pH, porosité et perméabilité à l'air des couches géologiques, niveau statique de nappe. Ces conditions sont propres à chaque zone source ;
- les objectifs à atteindre (qualitatif, quantitatif) : nous considérons le traitement d'une source dont la quantité est estimée sur la base des éléments fournis, et un objectif de qualité sur site compte tenu de l'usage futur et des risques associés ;
- la durée du traitement : dans le cas présent, le site n'étant plus occupé, il est possible d'envisager des traitements de longue durée ;
- les risques sanitaires et nuisances engendrés par le traitement : les traitements proposés doivent permettre de garantir une maîtrise des risques sanitaires pour les

opérateurs et de maîtriser toute émission pour les riverains. En particulier, en cas de traitement in-situ, le risque de formation de produits de dégradation plus toxiques que le polluant traité doit être pris en compte ;

- le coût : certaines techniques sont rapidement écartées car elles nécessitent la mobilisation d'installations coûteuses qui ne peuvent se justifier ;
- la simplicité de mise en œuvre : une technique simple et éprouvée est toujours préférable à une technique sophistiquée ou encore au stade expérimental (qui limiterait le nombre d'entreprises répondant à une consultation et qui complexifierait la maintenance du dispositif).

O.3.2. Classement en fonction des procédés employés

Il existe plusieurs types de traitements :

- traitements physiques : ils induisent une modification des paramètres physiques pour extraire (pompage, excavation, volatilisation) ou isoler (confinement, stabilisation) un polluant ;
- traitements biologiques : ils utilisent des capacités métaboliques d'un microorganisme ou d'un consortium microbien pour réduire (biotertre), modifier (déchloration réductive) ou extraire (biolixiviation) un polluant ;
- traitements chimiques : ils utilisent des réactifs chimiques pour détruire (oxydation, réduction) ou de tensio-actifs pour extraire (lavage) un polluant ;
- traitements thermiques : ils utilisent de la chaleur pour extraire par fluidification / volatilisation ou destruction un polluant.

O.3.3. Classement en fonction des lieux de traitement

Pour chacune des sources de pollution, 4 techniques de traitement sont envisageables (cf. Figure 46) :

- in-situ (en place) : cette technique est appliquée aux sols non excavés et aux eaux non extraites ; le traitement du polluant agit directement sur le sous-sol ;
- sur site : les sols et les eaux polluées sont extraits et le traitement a lieu sur site même dans des installations mobiles ;
- hors site : les sols et les eaux polluées sont extraits et traités hors site dans des installations fixes et autorisées ;
- confinement : il consiste à empêcher / limiter la migration du polluant.

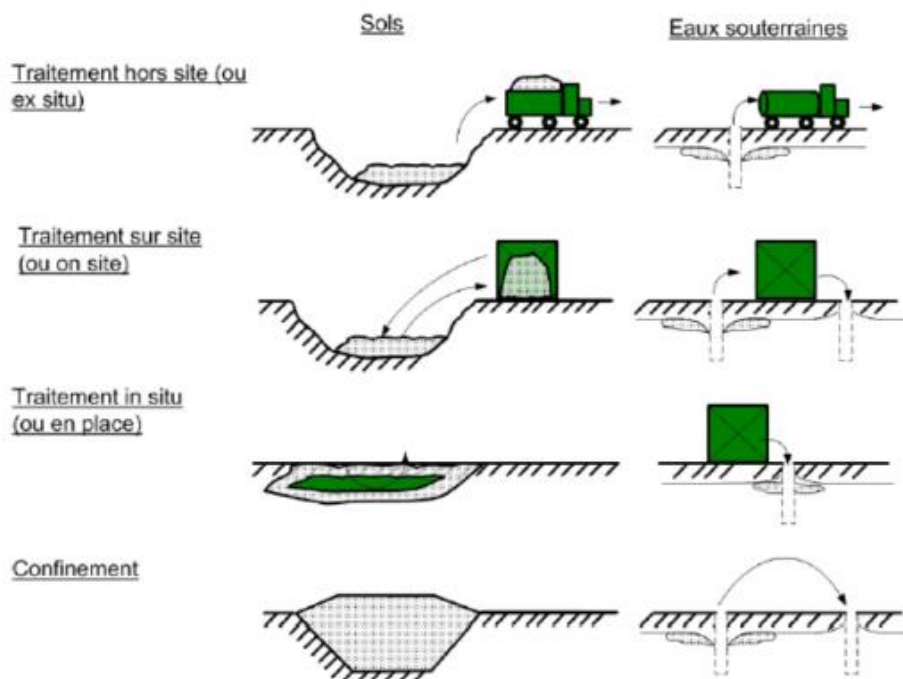


Figure 46 : Famille de techniques de dépollution par lieu de traitement (source : Rapport BRGM RP-57708-FR, juin 2010)

O.3.4. Classement par devenir des polluants

Il existe 2 possibilités :

- l'immobilisation qui met en jeu des techniques qui permettent de modifier la mobilité et/ou la toxicité des polluants par 2 types de processus :
 - la modification du polluant (en agissant sur le niveau d'oxydo-réduction, complexation, précipitation),
 - la modification du milieu récepteur (par solidification ou stabilisation ou par confinement) ;
- la destruction (totale ou partielle).

O.3.5. Sélection / rejet des techniques disponibles

Compte tenu des substances et des concentrations identifiées dans les différents milieux, le Tableau 46 présente l'ensemble des techniques théoriquement envisageables en première approche sur le site. Il indique celles qui ont été retenues pour une évaluation plus détaillée au chapitre suivant (surlignées en vert), et décrit les raisons qui ont conduit à faire ces choix.

Tableau 46 : Revue des techniques disponibles (norme NFX31-620-4)

Codification AFNOR (norme NFX31-620-4)	TECHNIQUE	Adapté à la problématique		Milieu concerné		Raison pour laquelle la solution n'est pas adaptée à la problématique						Commentaires	
		Oui	Non	ZNS	ZS	Absence d'action sur la source	Autres critères d'exclusion						
							Accessibilité de la source	Durée	Place disponible	Risque de formations de sous-produits toxiques	Objectifs atteignables		
Techniques de dépollution in situ avec traitement sur site des polluants récupérés)													
C311	Méthodes physiques par extraction de la pollution in situ												
C311a	Ventilation de la zone non saturée <i>in situ</i>		X	X								Peu adaptée aux HAP et PCB.	
C311b	Extraction multiphase <i>in situ</i>		X	X	X							Gestion des effluents liquides problématique. Peu adaptée aux HAP et PCB.	
C311c	Barbotage in situ (ou injection et bulles d'air <i>in situ</i>) / <i>sparging in situ</i>		X		X							Pas d'action sur la ZNS.	
C311d	Pompage et traitement <i>in situ</i>		X		X							Pas d'action sur la ZNS.	
C311e	Pompage / écrémage <i>in situ</i>		X		X							Pas d'action sur la ZNS.	
C312	Méthodes physiques par piégeage de la pollution in situ												
C312a	Confinement par couverture et étanchéification <i>in situ</i>	X		X		X			X	X		Ne traite pas la source. Nécessite d'être intégré au projet d'aménagement. N'empêche pas le transfert de vapeurs qui doivent être gérées sous un bâtiment.	
C312b	Confinement vertical <i>in situ</i>		X	X	X	X						Pas d'action sur la ZNS. Ne traite pas la source.	
C312c	Piège hydraulique ou confinement hydraulique <i>in situ</i>		X		X	X		X				Pas d'action sur la ZNS. Ne traite pas la source. Durée et suivi à très long terme	
C312d	Solidification/stabilisation <i>in situ</i>		X	X		X	X					Ne traite pas la source. Gestion du matériel contaminé.	
C313	Méthodes chimiques in situ												
C313 a	Lavage <i>in situ</i>		X	X			X				X	Essai de faisabilité. Efficacité discutable compte tenu de l'hétérogénéité des produits à traiter.	
C313b	Oxydation chimique <i>in situ</i>	X	X	X	X					X	X	Plutôt adapté à une pollution en ZS.	
C313c	Réduction chimique <i>in situ</i>	X	X	X	X					X	X	Plutôt adapté à une pollution en ZS.	
C314	Méthodes thermiques in situ												
C314a	Désorption thermique <i>in situ</i>		X	X	X		X				X	Technique peu efficace sur les composés lourds. Coût de la mise en place de l'installation de désorption pas rentabilisé compte tenu des faibles volumes mis en jeu.	
C315	Méthodes biologiques in situ												
C315a	Biodégradation dynamisée ou atténuation naturelle dynamisée) <i>in situ</i>		X		X		X			X		Pas d'action sur la ZNS.	
C315b	Bioventing <i>in situ</i>		X	X			X			X	X	Peu adaptée aux HAP et PCB.	
C315c	Biosparging <i>in situ</i>		X		X		X			X	X	Peu adaptée aux HAP et PCB.	
C315d	Phytoremédiation <i>in situ</i>		X	X			X				X	Non applicable au site d'étude (recouvrement, nombreux débris dans les remblais).	

C316 Autres techniques in situ												
C316a	Barrière perméable réactive <i>in situ</i> - système mur		X	X		X		X				Ne traite pas la source Pérennité du confinement à assurer, génère des déchets (CA, unité de traitement) Durée et suivi à très long terme
C316b	Barrière réactive <i>in situ</i> - système porte		X	X		X		X				Malgré le peu de retour d'expérience, le procédé semble relativement onéreux et énergivore Durée et suivi à très long terme
Techniques de dépollution sur site (avec traitement sur site des polluants récupérés)												
C321 Méthodes physiques par évacuation de la pollution sur site												
C321a	Excavation des sols sur site	X		X								Aisée. Adaptée également par rapport au projet de terrassements prévu.
C321b	Tri granulométrique sur site		X	X			X					Nécessite des essais de faisabilité. Non rentable compte tenu du volume à traiter.
C321c	Lavage à l'eau sur site		X	X			X					Nécessite des essais de faisabilité. Non rentable compte tenu du volume à traiter.
C322 Méthodes physiques par piégeage de la pollution sur site												
C322a	Encapsulation sur site		X	X		X	X					Ne traite pas la source. Nécessite de retirer l'ensemble des sols impactés en profondeur, or la délimitation verticale n'est pas connue. N'empêche pas le transfert de vapeurs qui doivent être gérées.
C322b	Solidification/ stabilisation sur site		X	X		X					X	Nécessite des essais de faisabilité. Technique très coûteuse.
C324 Méthodes thermiques sur site												
C324b	Désorption thermique sur site		X	X		X						Technique non rentable à mettre en place pour un petit volume (volume inférieur à 25 000 tonnes).
C325 Méthodes biologiques sur site												
C325a	Bioréacteur sur site		X	X		X						Non rentable compte tenu du volume à traiter. Plus applicable à des sols fortement argileux.
C325b	Biotertre sur site		X	X		X					X	Non rentable compte tenu du volume à traiter. Peu adaptée aux HAP et aux PCB.
C325d	Landfarming sur site		X	X		X					X	Peu adaptée aux HAP et PCB.

Techniques de dépollution hors site												
Méthodes physiques par évacuation de la pollution sur site												
-	Excavation des sols et évacuation hors site	X		X								Aisée.

Mesures constructives												
Méthodes physiques par évacuation de la pollution sur site												
-	Mise en place d'un vide sanitaire		X	X								Non réalisable d'un point de vue technique.
	Drainer les gaz sous dalle (SDSD)	X		X		X						Technique coûteuse mais réalisable.

Les volumes mis en jeu permettraient de mettre en œuvre des traitements sur site. Toutefois, la diversité des composés présents dans la zone de pollution concentrée (HCT, HAP, PCB) ne permet pas de retenir une mesure sur site traitant l'ensemble des composés.

Ainsi, il a été retenu une seule solution possible : l'excavation des terres issue de la zone de pollution concentrée.

Ces terres pourront ensuite soit être réutilisées sur site en merlon (dans la limite de 1 200 m³ selon les informations fournies par le client). Le reste des terres excavées devra être éliminées hors site (mais pourra en partie être traité en biocentre).

Compte tenu de l'absence de délimitation des zones de pollution concentrées en profondeur, la solution retenue pourra être réalisée en deux étapes :

- étape 1 : excavation des terres impactées sous le futur bâtiment et confinement sur site en extérieur de 1200 m³ et élimination hors site du reste du volume excavé ;
- étape 2 : mesures constructives sous le futur bâtiment : drainage des gaz sous dalle.

L'étape 2 sera à réaliser en cas de non-atteinte des seuils de dépollution sur les gaz du sol définis dans l'analyse des risques résiduels (paragraphe Q).

O.4. Bilan coûts-avantages

O.4.1. Méthodologie

Les avantages, les inconvénients et les coûts de chacun des scénarios de gestion doivent être étudiés à l'aide d'un bilan « coûts –avantages » : il consiste à produire une étude comportant des éléments factuels et détaillés, de comparaison de chaque scénario de gestion pertinent sur les mêmes critères de comparaison, intégrant l'ensemble des coûts y compris les coûts annexes (essais de faisabilité et de traitabilité, essais pilotes, démolition de bâtiments, surveillance et contrôles, mesures constructives, prévention/sécurité des travailleurs et gestion des déchets générés, appréciation qualitative de l'impact sur la valeur foncière ou locative du terrain, etc.).

Au moins deux scénarios de gestion sont retenus et correspondent aux bilans « coûts - avantages » les plus favorables, tant au plan sanitaire qu'environnemental, en veillant à privilégier les scénarios qui permettent :

- en premier lieu, l'élimination de la source de pollution ;
- en second lieu, la désactivation des vecteurs de transfert.

Pour cela, le bilan coûts-avantages qui prend en considération 5 familles de critères :

- les critères **techniques** (robustesse de la technique), **normatifs**, et **organisationnels** : ils sont focalisés sur l'aspect « pratique » de la gestion du site :
 - critères propres aux polluants (nature, distribution spatiale, toxicité, stabilité, ...),
 - critères propres aux milieux supports du polluant (géologie, hydrogéologie, hydrologie),
 - critères propres au site (encombrement, accessibilité, contraintes liées à l'activité, présence de réseaux, ...),

- critères d'orientation vers une filière de traitement (seuils d'acceptation, distance site-exutoire, ...),
- critères d'objectifs (de dépollution, pression médiatique et/ou politique, ...),
- critères organisationnels (stratégie de dépollution dans le temps et dans l'espace) ;
- les critères **économiques** : coûts des travaux de dépollution, des restrictions d'usage (servitudes) et des dispositions constructives nécessaires et de leur éventuelle maintenance (tenant compte de la valeur du terrain, et des aides éventuelles), ainsi que des surveillances ultérieures. Ces coûts peuvent être liés :
 - à la ou les techniques de dépollution : amené/repli, mise en place, consommation énergétique, fonctionnement, élimination des déchets...,
 - aux travaux annexes devant être impérativement réalisés pour permettre la mise en œuvre de la ou les techniques de dépollution (exemple : frais inhérents à la mise en œuvre d'un soutènement des parois des fouilles dans le cadre de l'excavation de terres polluées),
 - aux dispositions constructives,
 - à d'éventuels suivis (suivi lors des travaux, surveillance des milieux post-travaux, ou suivi de l'efficacité et de la pérennité de certaines mesures de gestion, etc.),
 - à d'éventuelles études complémentaires nécessaires. Ces études peuvent notamment correspondre à la constitution d'un dossier de demande de servitudes ;
- les critères **environnementaux** et liés à l'Hygiène et la Sécurité : bilan environnemental de la mesure de gestion : consommation énergétique, réduction de la masse de polluants, émissions de CO₂, utilisation de ressources naturelles, impact ou bénéfice sur la biodiversité, revalorisation des matériaux traités, impact de la pollution résiduelle sur l'environnement... Ce critère étudie également les implications en termes d'hygiène et sécurité (H&S) sur site et hors site : transport de terres, envol de poussières, impact sur les eaux souterraines... Les questions auxquelles ils doivent répondre sont les suivants.
 - Ce scénario sera-t-il générateur de déchets ?
 - Ceux-ci auront-ils un impact sur des espèces (faune/flore) présentes au droit du site ? Certaines sont-elles protégées ? Quel sera l'impact paysager (notamment dans le cas d'un confinement) ?
 - Quelle sera la consommation énergétique associée ? L'utilisation de ressources naturelles ?
 - Quels seront les besoins liés au transport ?
 - Le procédé est-il à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre ?
 - Est-il possible de définir des filières de revalorisation des matériaux traités ?
 - Quel sera l'impact du résiduel de la pollution qui sera laissé en place sur le site ?
- les critères **socio-politiques** : ils regroupent les nuisances du chantier (visuelles, sonores, olfactives...), l'augmentation du trafic (également en lien avec les critères environnementaux ci-avant), l'acceptabilité du projet d'aménagement envisagé (usage futur, servitudes éventuelles, objectifs de réhabilitation et teneurs résiduelles qui en découlent), mais aussi les bénéfices de ce chantier (création d'emplois, amélioration du cadre de vie, valorisation financière, image du site et du MO...);

- les critères **juridiques et réglementaires** : ils permettent essentiellement d'identifier la responsabilité à court et long terme du maître d'ouvrage (contraintes résiduelles, surveillances obligatoires, responsabilité liée aux déchets générés par un éventuel chantier, etc

Tableau 47 : Implications juridiques possibles (source : « Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués »)

Thématique	Implications possibles pour le MO et/ou le responsable juridique de la pollution
Hygiène Sécurité Environnement (HSE)	Le MO conserve une part de responsabilité juridique relative aux éventuelles problématiques HSE en lien avec la réhabilitation entreprise au droit du site.
Autorisations administratives	La mise en œuvre de certaines techniques de dépollution requiert l'obtention préalable d'autorisations administratives.
Loi sur l'eau	Dans les contextes hors ICPE, il convient de vérifier les rubriques de l'article R214-1 du code de l'environnement pour déterminer si un dossier « loi sur l'eau » doit être établi. Dans le contexte d'un site ICPE, le cas échéant, un porté à connaissance ICPE devra être transmis à l'administration en lieu et place du « dossier loi sur l'eau » (conformément à l'article L214-1). Dans le cas d'une pollution accidentelle, il n'est par ailleurs pas nécessaire d'établir un « dossier loi sur l'eau ». Le préfet doit néanmoins être informé (conformément à l'article R214-44 du code de l'environnement).
Déchets	Le MO conserve la responsabilité des déchets générés sur le site d'étude jusqu'à leur revalorisation ou élimination finale selon des filières adaptées.
Pollutions résiduelles	Le responsable de la pollution au sens juridique (propriétaire, exploitant, MO...) conserve une responsabilité juridique à long terme dans le cas où une pollution résiduelle est laissée en place sur site après la réhabilitation. Des surveillances ultérieures pourront être nécessaires. Il sera alors du ressort du responsable de la pollution d'en assurer (y compris financièrement) l'organisation régulière.
Restrictions d'usage	La mise en place de restrictions peut engendrer un coût lié à la dépréciation des terrains. Dans certains cas, le responsable de la pollution devra indemniser les propriétaires concernés par la mise en place d'une restriction d'usage les concernant.

O.4.2. Grille de pondération des critères

Compte tenu du fait qu'une seule solution est envisagée (excavation hors-site, confinement et éventuellement drainage sous dalle), aucune grille de pondération des critères n'a été réalisée.

O.4.3. Présentation des solutions

O.4.3.1. Etape 1 : Excavation des terres impactées sous le futur bâtiment puis confinement sur site (1200 m³ maximum) ou élimination hors site

PRINCIPES DE L'EXCAVATION

L'**excavation** ne constitue pas un procédé de traitement en tant que tel ; elle doit être accompagnée d'actions complémentaires afin de traiter et/ou stocker les terres excavées.

Le procédé d'**excavation** est généralement réalisé une fois la source de pollution délimitée via des investigations de terrain et des analyses.

Il s'agit de la méthode la plus simple, la plus radicale et la plus rapide pour supprimer une source de pollution. Néanmoins, l'**excavation** n'est pas une fin en soi, les sols pollués

excavés devront faire l'objet d'un traitement/confinement hors site. Un confinement sur site permettrait de diminuer les coûts d'évacuation hors-site.

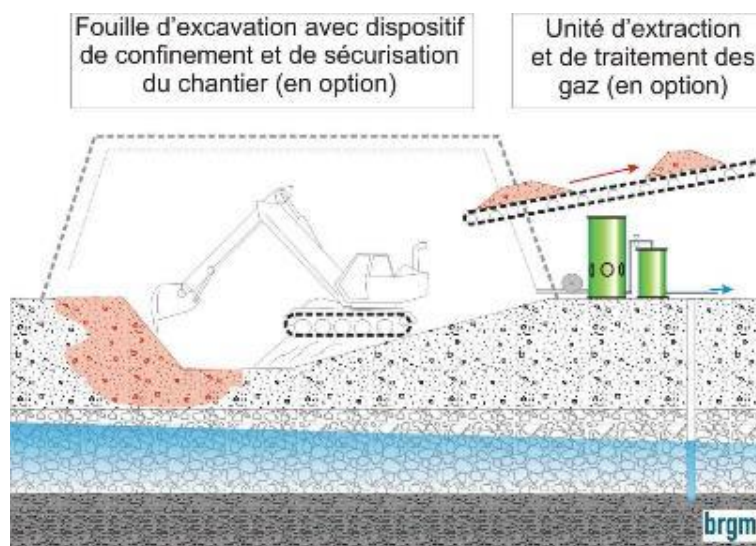


Figure 47 : Schéma de principe d'excavation (source : selecdepol.fr)

PRINCIPES DU CONFINEMENT

Le but de l'isolation de surface (**confinement par couverture et étanchéification**) est multiple :

- confinement des sols souillés. Il s'agit de prévenir la contamination vers les enjeux identifiés ;
- mise en place d'une isolation de surface perméable ou semi-perméable afin d'empêcher (ou de limiter) la percolation des eaux de pluie à travers la zone non saturée, puis l'infiltration des eaux souillées vers les eaux souterraines et superficielles,
- mise en place d'une barrière entre la source de pollution et :
 - les humains (ingestion directe de sols, contact cutané),
 - la faune (rongeurs, terriers),
 - la flore (racine),
- mise en place d'une barrière au-dessus de la source de pollution afin de prévenir le réenvol de poussières.

En fonction des enjeux identifiés, l'isolation de surface pourra mettre en jeu différents types de couverture (simple ou multicouche) :

- la couverture multicouche terreuse : d'une perméabilité supérieure ou égale à 10^{-6} m/s, elle est peu performante vis-à-vis des infiltrations d'eau. Elle concerne :
 - les sites à faible potentiel polluant (ou faiblement évolutif) vis-à-vis des gaz, des eaux souterraines et superficielles,
 - les sites devant faire l'objet d'un confinement vis-à-vis du contact direct et de l'ingestion de sols souillés.
- la couverture multicouche semi-perméable : d'une perméabilité comprise entre 10^{-6} et 10^{-9} m/s, elle limite moyennement les infiltrations et les émanations de gaz. Elle est utilisée pour :

- les sites présentant un environnement peu vulnérable,
- les sites dont on souhaite épuiser le potentiel polluant tout en limitant l'impact des rejets.
- la couverture multicouche imperméable : d'une perméabilité inférieure ou égale à 10^{-9} m/s, elle limite très fortement les infiltrations et les émanations de gaz. C'est pourquoi, elle s'applique à :
 - des sites à fort potentiel polluant,
 - des sites à environnement vulnérable.

Compte tenu du projet d'aménagement et des pollutions mises en évidence, il conviendra de mettre en place une **couverture multicouche semi-perméable**.

APPLICABILITE EXCAVATION

Tous les types de sols pollués peuvent faire l'objet d'excavation (quelles que soient la granulométrie et la teneur en polluants). D'une manière générale, seules les sources de pollution situées en zone vadose font l'objet d'une excavation. L'**excavation des sols**, surtout en zone saturée, doit s'accompagner de mesures adéquates (suivi des eaux souterraines, piège hydraulique, confinement ...) afin de ne pas générer une remobilisation de la pollution.

APPLICABILITE DU CONFINEMENT

Le confinement peut être appliqué à presque tous les types de pollution COV, COHV, PCB, HAP, métaux/métalloïdes à condition que :

- les tests de percolation, l'infiltration à travers les sols pollués ainsi que la charge hydraulique soient compatibles avec l'usage des eaux souterraines,
- les émanations gazeuses soient compatibles avec l'usage futur.

Dans tous les cas, il conviendra de confiner les sols à une côte altimétrique supérieure à celle du niveau piézométrique le plus haut.

Le confinement peut être temporaire ou final.

AVANTAGES/INCONVENIENTS DE L'EXCAVATION

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • technique simple et rapide, • présente une garantie de résultats : les seuils de dépollution atteints sont aisément contrôlables via les analyses de fonds et de flancs de fouille, • applicable à de nombreux composés ; elle est particulièrement bien adaptée pour éliminer une source de pollution très concentrée et limitée dans l'espace (hot spot) ou une source de pollution difficilement traitable par d'autres techniques (contaminants récalcitrants, mélange de pollution, concentrations élevées), 	<ul style="list-style-type: none"> • les limites et les délais d'acceptation dans les centres de traitement agréés doivent être pris en compte lors de la conception du chantier, • les risques typiques des terrassements doivent être considérés : explosion, endommagements d'infrastructures enterrées, chute de personne dans la fouille,

AVANTAGES/INCONVENIENTS DU CONFINEMENT

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • technique simple et rapide, • permet de confiner un très grand nombre de polluants, • particulièrement bien adapté pour les grands volumes de pollution par des composés inorganiques voire mixte, • technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs, • compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants. 	<ul style="list-style-type: none"> • les pollutions ne sont pas détruites et restent en place : aucune action n'est réalisée sur le volume et la toxicité des déchets. La seule action est relative à la réduction importante du transfert de pollution, • il est primordial de garder la mémoire de la pollution et d'instaurer des restrictions, • il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme, • il est nécessaire d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement (endommagement du confinement du au gel/dégel, tassement différentiel, passage d'engins, dessiccation, attaque de rongeurs, végétation, ...), • la couverture permet seulement de limiter les transferts verticaux (eaux pluviales, gaz, contact, réenvols de poussières) mais ne permet pas de contrôler les flux horizontaux, • la mise en place notamment au niveau des soudures doit être irréprochable, • il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitudes ...), • étant donné que les confinements existants n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.

MOYENS MATERIELS

Les moyens utilisés lors des travaux de terrassement sont identiques à ceux utilisés par les entreprises de travaux publics : pelle mécanique, tractopelle, véhicules de transport (dont certains doivent être habilités à contenir des déchets ou à respecter la réglementation du Transports de Matières Dangereuses (TMD)).

Afin de gérer les flux de terres excavées, il est souvent nécessaire de mettre en place des aires de stockage temporaires étanches (tampon). Ainsi, les terres excavées sont triées au fur et à mesure de l'excavation en fonction de leur degré de pollution. Ce degré de pollution est déterminé à partir des analyses préalablement réalisées lors du diagnostic de sols, et est complété par :

- des observations organoleptiques ;
- et/ou des analyses semi-quantitatives sur site (kits immuno-enzymatiques, détecteur à photo-ionisation - PID, détecteur à ionisation de flammes – FID, spectromètre de fluorescence X portable, spectromètre UV) ;
- et/ou des analyses quantitatives en laboratoire sur ou hors site.

Les terres excavées sont alors à éliminer hors site dans tel ou tel centre d'élimination ou de stockage agréé ou bien à confiner sur site.

La sélection des matériaux à mettre en œuvre pour un **confinement** se base non seulement sur leurs coûts mais aussi sur leurs caractéristiques vis-à-vis de la protection, l'étanchéité, du drainage, de la filtration, de la séparation, du renforcement, de la résistance à l'érosion, de la pérennité, du type de polluant...

La mise en place de ces matériaux imperméables ou peu perméables est réalisée à l'aide d'engins de chantiers spécifiques.

Il est nécessaire de mettre en place des filets avertisseurs au-dessus du confinement.

En fin d'excavation, des échantillons en fonds et bords de fouille seront prélevés et analysés afin de valider que les seuils de dépollution sont bien atteints.

DONNEES NECESSAIRES AU DIMENSIONNEMENT

Les données nécessaires au dimensionnement concernent essentiellement la géométrie et la concentration en polluants de la source de pollution.

Les certificats d'acceptation préalable (pour les traitements en centre agréé) doivent être acquis avant d'envisager toute excavation.

Des données géotechniques complémentaires peuvent être nécessaires en cas de terrassement à proximité de zones sensibles (bâtiments, voirie) ou dans le cas de confinement (étude géotechnique pour tenue des terrains ou pour dimensionnement d'un soutènement si besoin).

Pour le confinement, plusieurs données sont nécessaires :

- les aspects géotechniques (afin de s'assurer de la tenue des terrains) : teneur en eau naturelle, limites d'Atterberg, essais pressiométriques, de perméabilité, etc.
- les aspects environnementaux (impact du confinement à long terme, compatibilité chimique, vérification de la perméabilité de couverture de surface) ;
- la définition du projet : objectifs de traitement, surface concerné et volume ;
- le site : accessibilité, emplacement, obstacles, etc. ;
- la nature des polluants ;
- l'aquifère potentiellement concerné.

PARAMETRES DE SUIVI

Les paramètres à suivre lors d'une opération d'excavation sont les suivants :

- les concentrations en polluants ;
- le suivi des teneurs en polluants dans les terres sur site :
 - fond et bords de fouille,
 - paramètres relatifs à l'acceptation dans les centres d'élimination agréés ;
- le suivi des terres traitées hors site :
 - les bordereaux de suivi et acceptation dans les centres d'élimination agréés,
 - le transport selon la RTMD (Règlement pour le Transport des Matières Dangereuses) si nécessaire ;
- le contrôle de la qualité des terres apportées en remblais.

Les mesures de confinement conduisent à la mise en œuvre de dispositifs de **restriction d'usage** d'une part pour garder la mémoire de leur présence et d'autre part pour préciser les modalités d'exploitation et d'entretien éventuellement nécessaires au maintien de leur pérennité. En particulier, une surveillance environnementale appropriée doit être mise en place pour vérifier l'absence d'impact sur les milieux lorsqu'un confinement des pollutions a été décidé.

Il faut donc distinguer :

- les mesures de contrôle réalisées juste après les travaux de confinement,
- les mesures de suivi à long terme.

Les mesures de contrôle et de suivi doivent être inscrites dans les obligations des servitudes :

- Pour être efficace, toute mesure de confinement doit être accompagnée de mesures de contrôle qui permettent d'en assurer l'intégrité. Il existe de nombreuses méthodes de détection et de localisation de défauts : géomembrane conductrice, jet d'eau, sonde mobile, système fixe de détection de localisation et d'alarme, cloche à vide, mise en pression du canal central, test à la pointe émoussée (au tournevis), spectrométrie infrarouge, liquide coloré sous pression, thermographie infrarouge, ultrasons...
- Le suivi devra être obligatoirement à long terme et devra permettre de vérifier son fonctionnement et de suivre l'évolution de son efficacité. Le but est de pouvoir caractériser autant que faire se peut qualitativement et quantitativement le flux de matière échangé avec l'extérieur.

Le suivi doit permettre de s'assurer de l'efficacité des mesures de confinement mises en place. Le plus souvent, il consistera à prélever des échantillons dans l'eau souterraine ou dans l'eau de surface afin d'en vérifier la qualité et de suivre son évolution (conditions du milieu, sous-produits de dégradation...). Des prélèvements d'eau au droit de la source de pollution sont aussi recommandés. Un programme de suivi des émissions atmosphériques (poussières, émissions gazeuses ou autres) peut également être approprié, le cas échéant.

Une vérification régulière du terrain doit être effectuée pour s'assurer que les mesures de confinement sont toujours en place et fonctionnelles et que l'usage qui est fait du terrain ne remet pas en question l'intégrité de ces mesures. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'instituer un programme d'entretien des ouvrages.

Par ailleurs, il est nécessaire de réaliser le suivi des servitudes, citons par exemple : absence de culture potagère, absence d'arbre à racines profondes, présence de filets avertisseurs. Ces servitudes doivent aussi permettre de garder la mémoire de ces travaux dans le temps.

De plus, lorsque les mesures de confinement le requièrent, un contrôle des mouvements physiques du terrain, du système de pompage ou de collecte des eaux, de l'état des infrastructures en place (clôtures, barrières, fossés de drainage...) doit être effectué.

DUREE DU TRAITEMENT

La durée totale est estimée à environ 2,5 mois, décomposée comme suit :

- préparation administrative et technique : 2 semaines ;
- excavation : 3 semaines (hypothèse d'une cadence de 500 m³/jour environ) ;
- prélèvements de contrôle en fond de fouille + analyses en laboratoire : 2 semaines ;
- remblaiement : 3 semaines ;
- confinement : 1 semaine.

SEUILS DE RECEPTION

La réception sera faite sur les différents milieux concernés (prélèvements de sols en fond et bords de fouille et prélèvements de gaz du sol en fond de fouille).

Si les concentrations mesurées sont supérieures aux teneurs résiduelles considérées dans la présente ARR prédictive, alors les présents calculs sanitaires devront être mis à jour pour valider l'acceptabilité de la dépollution ou les travaux de terrassement devront être poursuivis.

ESTIMATION FINANCIERE

Les coûts des excavations dépendent principalement des volumes de sols à traiter et des cadences. L'estimation financière est basée sur le volume total de terres impactées à évacuer présenté en Tableau 45.

Le confinement de 1 200 m³ a été considéré par rapport aux informations transmises par le client. Au vue de la zone destinée à accueillir le futur merlon, une hypothèse d'un merlon de 80 m de long, 15 m de large et 1 m de haut a été considérée. La surface nette prise en compte est donc de 1 200 m² pour une couverture inférieure (si la réalisation du confinement ne peut être réalisée au-dessus du niveau de hautes eaux) et de 1 390 m² pour une couverture supérieure. En considérant un recouvrement de 10% de la surface nette, les superficies considérées sont donc respectivement de 1 320 et 1 529 m².

Tableau 48 : Estimation des coûts

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (€H.T)	Total (€H.T)
Organisation et suivi du chantier	FT	1	10 000	10 000
<i>Ce prix comprend : Etablissement des dossiers administratifs, Mise en place et suivi du chantier (clôture, etc.) Réception du chantier</i>				
Amenée et repli du matériel	FT	1	1 000	1 000
Terrassement	m3	5 990	50	299 500
Confinement d'une partie des terres sur site	m3	1 200	0	0
Mise en place d'une couverture semi-perméable (hors végétalisation) supérieure	m2	1 529	20	30 580
Mise en place d'une couverture perméable inférieure	m2	1 320	20	26 400
Evacuation en centre de traitement	tonnes	8 622	115	991 530
Apport de remblais sains dans la fouille	m3	5 990	15	89 850
Suivi des travaux	J	15	450	6 750
Prélèvement de bord et fonds de fouilles	FT	1	800	800
Prélèvements de fonds de fouilles en gaz du sol	FT	1	1 000	1 000
Rapport de fin de travaux	FT	1	1 500	1 500
TOTAL				1 458 910

Les prix indiqués ci-dessus sont donnés à titre indicatif sur la base du retour d'expérience de FONDASOL et/ou sur la base de prix indiqué sur le site internet <https://www.selecdepol.fr/> de l'ADEME et du BRGM.

O.4.3.2. Etape 2 : mesure constructive : drainage des gaz sous dalle

Les premiers calculs de risques sanitaires réalisés en considérant le remblaiement des zones de pollution concentrée par des sables (géologique similaire à la géologie mise en évidence au droit de ces zones) conduit à des risques inacceptables (cf. § Q.6.3).

Afin de rendre compatibles les teneurs résiduelles avec le projet, il avait été étudié dans note précédent rapport 2 solutions de gestion : un remblaiement des zones de pollution concentrée par des limons et le remblaiement des zones de pollution concentrée par des sables nécessitant également la mise en place d'un vide sanitaire. Toutefois, vous nous avez indiqué qu'aucune de ces deux solutions n'étaient envisageables d'un point de vue technique sur site compte tenu notamment de la mise en place d'inclusion rigide dans les sols sous le futur bâtiment afin de recevoir les descentes de charge.

Ainsi, cette nouvelle version du rapport étudie la mise en place d'un système de drainage des gaz sous le dallage du futur bâtiment, après excavation des zones de pollution concentrée et remblaiement par des sables.

PRINCIPES

Cette technique consiste à créer une légère dépression sous la dalle d'un bâtiment, afin de bloquer les flux convectifs d'air pollué allant initialement vers le bâtiment (ce qui permet in fine d'éviter que les polluants n'entrent dans le bâtiment). Ces polluants volatils sont ensuite rejetés à l'atmosphère au-dessus du bâtiment (idéalement après traitement). Cette méthode peut être soit passive, soit active (nécessitant alors un extracteur consommant de l'énergie).

APPLICABILITE

Un système de drainage sous bâtiment peut être envisagé dans un bâtiment à construire comme dans un bâtiment existant.

Lorsqu'elle est envisageable, cette méthode présente l'avantage d'empêcher ou de limiter le transfert des polluants volatils des sols sous-jacents vers le bâtiment, contrairement à une solution d'amélioration de la ventilation.

Néanmoins, en fonction des cas (notamment les niveaux d'abattelements nécessaires), cette solution peut être excessive (tant du point de vue technique qu'économique) par rapport à une amélioration de la ventilation d'un bâtiment à construire (VMC) de ce dernier (cette solution a été étudiée dans le cadre des calculs de risques mais aucun taux de ventilation raisonnable ne permet d'atteindre des niveaux de risques sanitaires acceptables).

Dans le cas d'un bâtiment à construire, sa mise en œuvre est généralement plus simple, moins onéreuse et son efficacité accrue, puisque cette mesure constructive est intégrée dès la conception du projet qui tient compte de la problématique de remontée de vapeurs existante. En l'absence d'occupants dans un bâtiment à construire, les aspects liés à la communication avec les occupants et à la gestion de la gêne occasionnée pendant les travaux sont inexistantes. Enfin, les modalités de contrôle et de maintenance du dispositif peuvent également être simplifiées, en étant anticipées et définies dès la phase de conception. Il est néanmoins rappelé qu'à l'heure actuelle, ces mesures constructives ne sont pas habituelles pour les opérateurs du bâtiment. Elles nécessitent une vigilance accrue de la part des maîtres d'ouvrage et surtout des maîtres d'œuvre. Pour cela, il leur est fortement conseillé de s'attacher les compétences d'un bureau d'étude spécialisé qui peut les accompagner pendant toute la durée du projet de la conception à la réalisation puis à la mise en service. La communication vis-à-vis des futurs occupants et la conservation de la mémoire de la situation sont des sujets importants à aborder aussi, y compris dans le cas des bâtiments à construire.

APPLICABILITE – AVANTAGES/INCONVENIENTS

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • présente une garantie pour les futurs usagers ; • technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats significatifs, • compétitivité en termes de coût et de performance. 	<ul style="list-style-type: none"> • dans le cas de bâtiment à construire, peu de facteurs limitants sont identifiés puisque le projet peut être adapté en conséquence. La réalisation de bâtiments de forme simple sans une multitude de longrines et autres fondations facilite la propagation de l'aspiration sous l'ensemble de la dalle. Néanmoins, même pour des bâtiments complexes et/ou en présence de longrines, drainer les gaz sous dalle est très probablement envisageable sous réserve d'augmenter le nombre de points d'aspiration ou de drains d'aspiration et d'anticiper les pertes de charges associées lors du choix de l'extracteur ; • gestion des effluents gazeux à prendre en compte dans le projet d'aménagement ; • nécessite un suivi sur le long terme ; • nécessite un dimensionnement préalable ; • peu adaptée sur les grandes surfaces ; • la pollution résiduelle n'est pas traitée.

MOYENS MATERIELS

Dans le cas d'un **système de drainage sous dalle (SDSD) passif**, il est crucial d'isoler thermiquement tout conduit qui ne se trouve pas dans une pièce chauffée. Dans ce cas, le projet EVALSDS recommande des tuyaux de diamètre 200 mm minimum, afin d'optimiser le phénomène de tirage thermique.

Une protection contre la pluie, les oiseaux et les insectes (type guêpes, frelons, ...) est également fortement recommandée. Dans le cas d'un **SDSD passif**, des chapeaux extracteurs statiques peuvent également être placés au sommet des conduits afin d'améliorer l'efficacité du tirage sans consommation d'énergie (utilisation de l'énergie du vent pour créer une dépression dans la conduit).

Dans le cas d'un **système de drainage sous dalle actif**, en fonction du débit extrait, un sifflement plus ou moins important peut s'entendre à proximité des conduits ou de l'extrémité du conduit.

Les moyens matériels nécessaires sont détaillés ci-dessous :

- **Massif drainant** : aplani et compacté, constitué de graviers dont la granulométrie doit être la plus homogène possible afin d'assurer une bonne perméabilité du massif drainant et donc faciliter une mise en dépression de l'ensemble du volume de massif drainant. Le compactage soigné évite que l'étanchéité par membrane ne puisse être remise en cause si le massif drainant vient à se compacter naturellement et que le poids du béton de la dalle endommage la membrane.

Une granulométrie minimale de 2 cm est recommandée. Le projet EVALSDS recommande une granulométrie de 3 cm dans le cadre d'un **SDSD passif**. L'épaisseur minimale recommandée est 15 cm et devra également être au minimum de 10 cm plus importante que le diamètre du drain utilisé. Le projet EVALSDS indique qu'une épaisseur de 20 cm est envisageable pour un **SDSD passif** équipé d'un système de drains. Dans le cas d'un **SDSD passif** utilisant un puisard (et non un réseau de drains), une épaisseur de 30 cm est recommandée. Cette recommandation pourra également être suivie dans le cadre d'un **SDSD actif**. Le massif de graviers devra entièrement recouvrir le réseau de drains, que l'on positionnera à mi-hauteur du massif drainant. Une attention particulière doit être portée à l'**absence de fines** à la surface des graviers, afin d'éviter de colmater les réseaux d'aspiration et/ou d'endommager

l'extracteur éventuellement mis en place. Des **géocomposites** de drainage sont également disponibles. Ces matériaux de 3 à 4 cm d'épaisseur doivent être placés entre les sols en place et la dalle et remplacent la couche de graviers évoquée précédemment. Ils sont composés de deux géotextiles de filtration ou de drainage des gaz et de drains perforés régulièrement espacés entre ces deux géotextiles. Selon le modèle choisi, la membrane d'étanchéité est soit intégrée au géocomposite (dans ce cas, il s'agit d'imperméabilisation, c'est-à-dire que l'étanchéité n'est pas complète et qu'une faible proportion de gaz peut la traverser), soit à dérouler par-dessus (dans ce cas, il s'agit d'un confinement complètement étanche, dont l'installation et l'étanchéité est réalisée par une société spécialisée). Le dimensionnement du dispositif est généralement réalisé par le fabricant afin de tenir compte à la fois de la problématique environnementale liée au dégazage, et de celle liée à la compression du géocomposite par la dalle béton sus-jacente. En ce qui concerne l'étanchéité de dispositif (en périphérie, à l'interface des lès ou au niveau des émergences (cheminées, ...), les préconisations du fabricant doivent être respectées. Ces géocomposites sont disponibles sous forme de rouleaux d'environ 50 m de long par environ 2 m de large.

- **Puisards/drains** : le choix entre ces deux possibilités est conditionné par la configuration du bâtiment où le SDSD sera mis en place. Dans le cas d'un puisard, différents modèles existent dans le commerce, qu'ils soient initialement prévus pour gérer une problématique liée au radon ou non. De forme cylindrique ou cubique, leur taille est généralement de l'ordre de 50 cm de côté pour une hauteur moindre. La présence d'un orifice bas pour l'évacuation des éventuels condensats est recommandée. La surface d'ouverture doit être d'environ 1/3 de sa périphérie (EVALSDS, 2018). Dans le cas d'un drain, ceux utilisés pour le drainage de l'eau peuvent être utilisés. Les tubes crépinés utilisés pour des piézomètres peuvent également être employés. Leur diamètre est classiquement compris entre 80 et 100 mm. La mise en place d'un géotextile autour des drains ou des puisards est recommandée.
- **Membranes** : qu'il s'agisse d'un SDSD actif ou passif, bien qu'elle ne soit pas obligatoire, l'ajout d'une membrane entre le massif drainant et la dalle béton est recommandée, afin d'améliorer l'étanchéité du dispositif, notamment en cas de défaillance de l'extraction. Dans la mesure du possible, les membranes sont d'un seul tenant afin d'éviter de devoir raccorder plusieurs lès. Si cela était nécessaire, les lès peuvent être soit thermosoudés par une entreprise spécialisée (proposition à privilégier), soit collés par une matière adhésive. Le recouvrement de deux lès est généralement de 15 à 20 cm (BRGM, 2014 et EVALSDS, 2018). Si des prélèvements d'air de sol doivent être réalisés, il peut être judicieux de vérifier l'absence d'interférences entre les substances volatiles présentes dans la colle et les substances recherchées (notamment en cas de prélèvement d'air du sol sous la dalle avant la mise en service de l'extraction). Une attention toute particulière doit être portée à l'absence d'objets contondants ou pointus lors de la mise en place de la membrane sur le massif de gravier. Une fine couche de sable sur un géotextile peut être mise en place sous la membrane pour la protéger (EVALSDS, 2018).

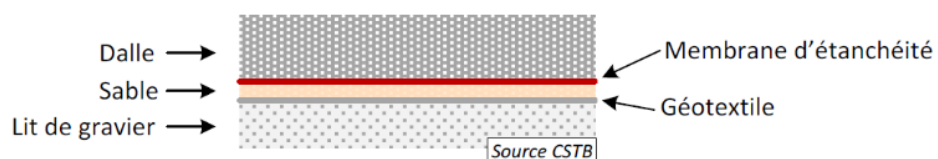


Figure 48 : Couche de sable sous la membrane (Source : EVALSDS, 2018)

L'étanchéité le long des murs, des dalles ou au passage de réseaux (notamment le réseau d'aspiration) doit également être parfaite. Différentes possibilités sont proposées dans le guide BRGM (2014) et dans le guide EVALSDS (2018).

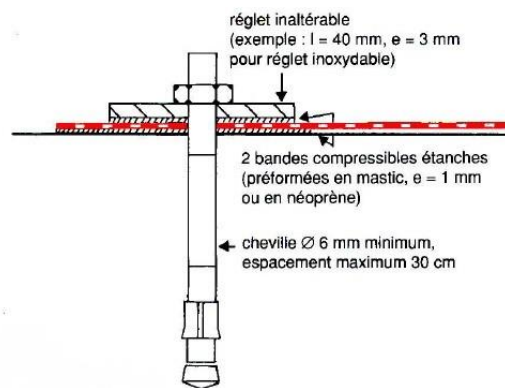


Figure 49 : Proposition de fixation d'une membrane à un mur (source : BRGM, 2014, d'après CFG, 1991)

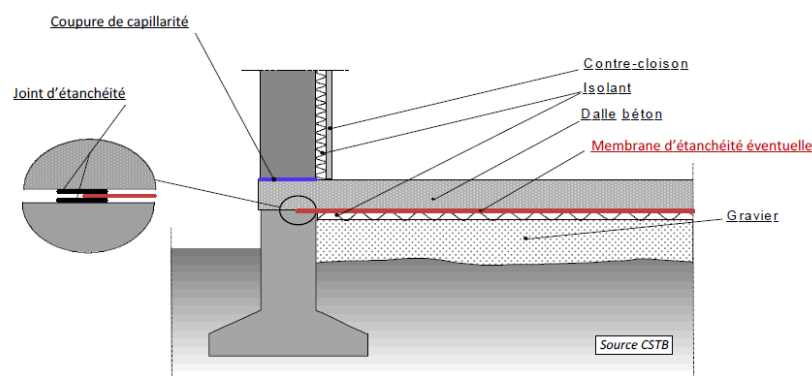


Figure 50 : Exemple de conception dans le cas d'une dalle portée sur terre-plein (source : EVALSDS, 2018)

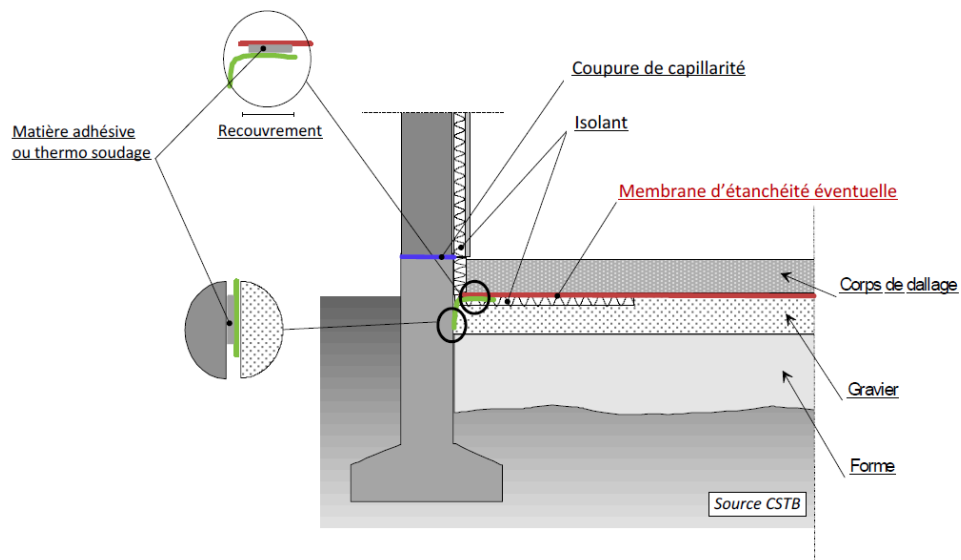


Figure 51 : Exemple de conception dans le cas d'un dallage indépendant sur terre-plein (source : EVALSDS, 2018)

- **Dalle béton** : en fonction de l'usage (résidentiel, industriel, avec ou sans passage de véhicules légers ou lourds), l'épaisseur de la dalle doit être adaptée. Classiquement, pour un usage industriel, la dalle est armée est d'épaisseur minimale de 15 cm (norme NF P 11-213-3, Mai 2007 et DTU 21, Juin 2017). Il faudra cependant prendre l'attache d'une société spécialisée pour dimensionner correctement la dalle en fonction des besoins et des contraintes. Au-delà de la question de l'épaisseur de la dalle, ses

caractéristiques sont à étudier avec précision, notamment en ce qui concerne la diminution de sa perméabilité à l'air. Améliorer l'étanchéité de la dalle permet de limiter les chemins préférentiels et l'intrusion de vapeurs de polluants volatils dans le bâtiment.

- **Réseau d'aspiration** : les réseaux d'aspiration sont classiquement en PVC. Néanmoins, en fonction des polluants rencontrés, du PE peut être utilisé. Ils doivent être raccordés de manière étanche. Si du PVC « écoulement » ou du PEHD peuvent être employés (notamment pour les parties enterrées ou aériennes (évacuation de l'extracteur)), l'utilisation de matériaux plus solides (PEHD « pression » par exemple) peut être envisagée notamment si des conduits peuvent être endommagés par les occupants du bâtiment (ex : passage de canalisations non protégées dans certaines pièces du bâtiment). Le diamètre utilisé est classiquement de l'ordre de 10 à 15 cm de diamètre comme pour la taille du drain. Afin d'homogénéiser la mise en dépression sous dalle sous l'ensemble du bâtiment, l'utilisation de vannes de réglage peut être envisagée. Une attention particulière doit être portée à la vérification de l'absence de chemins préférentiels (par les passages de réseaux à travers les murs ou les dalles) facilitant la circulation des vapeurs à l'intérieur d'un bâtiment et/ou depuis le sol jusqu'à l'intérieur du bâtiment.
- **Réseau d'évacuation** : l'air aspiré sous la dalle doit être évacué à l'extérieur du bâtiment à une distance suffisamment importante de toute ouverture. Des tuyaux métalliques ou en PVC écoulement, raccordés de manière étanche, peuvent être utilisés. A noter qu'il existe des tuyaux plastiques de différents diamètres, formes et couleurs permettant de limiter, autant que faire se peut, les désagréments esthétiques. En période hivernale, il est très fréquent que l'humidité naturellement présente dans l'air du sol condense dans la cheminée d'évacuation. Il est donc crucial de prévoir un moyen d'évacuer cette eau afin d'éviter qu'elle ne bouche le circuit d'évacuation et/ou endommage l'extracteur éventuellement utilisé. Dans le cas d'un bâtiment à construire, il est judicieux de prévoir de placer le réseau d'évacuation dans des gaines techniques, ce qui assure à la fois une isolation thermique et une maîtrise des nuisances esthétiques et sonores. Dans le cas d'un **SDSD passif**, il est crucial d'isoler thermiquement tout conduit qui ne se trouve pas dans une pièce chauffée. Dans ce cas, le projet EVALSDS recommande également des tuyaux de diamètre 200 mm minimum, afin d'optimiser le phénomène de tirage thermique. Dans le cas d'un **SDSD actif**, en fonction du débit extrait, un sifflement plus ou moins important peut s'entendre à proximité des conduits ou de l'extrémité du conduit. Une protection contre la pluie, les oiseaux et les insectes (type guêpes, frelons, ...) est également fortement recommandée. Dans le cas d'un SDSD passif, des chapeaux extracteurs statiques (cf. EVALSDS, 2018) peuvent également être placés au sommet des conduits afin d'améliorer l'efficacité du tirage sans consommation d'énergie (utilisation de l'énergie du vent pour créer une dépression dans la conduit).
- **Point de contrôle** : un ou plusieurs points de contrôle peuvent être réalisés par carottage à travers la dalle et mise en place d'un tube, équipé d'un bouchon amovible. Une attention particulière doit être apportée à l'étanchéité de ce dispositif, afin de ne pas risquer de créer un chemin préférentiel d'intrusion de vapeurs dans le bâtiment. Ces points de contrôle permettent de vérifier la dépression créée sous la dalle pendant toute la durée de vie de l'installation et de prélever des gaz de sol sous la dalle, notamment avant la mise en service de l'installation et avant son éventuel démantèlement. En cas d'utilisation de décapant ou de colle (exemple : collage de tubes PVC/PEHD), une attention particulière doit être portée au séchage et à la ventilation du tuyau avant installation, notamment si des prélèvements d'air du sol sous la dalle doivent être réalisés avant la mise en dépression.

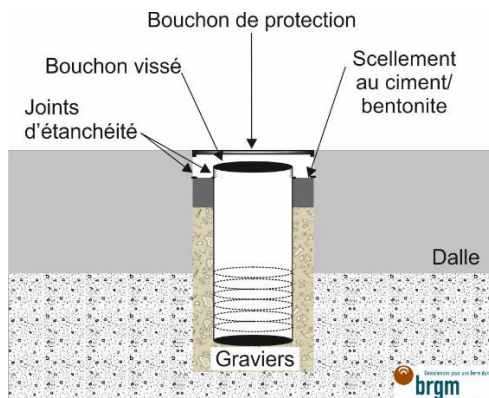


Figure 52 : Schéma de principe d'un point de contrôle

- Extracteur** : dans le cas d'un **SDSD actif**, l'extracteur doit être choisi en fonction de la superficie à gérer, de la perméabilité du milieu où l'aspiration est réalisée (massif drainant sous une dalle créée), des pertes de charges associées au réseau d'extraction. Pour mémoire, plus le débit développé par un extracteur est important, plus la dépression créée est faible. Dans le cas d'aspiration dans des massifs drainants spécialement créés, des extracteurs développant des débits allant jusqu'à 400 m³/h pour une dépression allant jusqu'à 200 Pa (en entrée d'extracteur, la dépression sous la dalle devant être de l'ordre de 4 à 10 Pa) pour une puissance électrique consommée de l'ordre de 40 à 80 W peuvent être rencontrés (pour des bâtiments simples de type pavillon). L'installation d'un dispositif permettant de régler la puissance consommée par l'extracteur permettra d'optimiser la consommation électrique de l'installation (voire les nuisances sonores). Dans le cas d'un **SDSD actif**, la question de la nuisance sonore engendrée par l'extracteur (fonctionnement 24h/24h, 7j/7j) est très importante à prendre en compte. Dans le cadre d'un bâtiment à construire, une manière simple consiste généralement à placer des extracteurs d'un local technique dédié, insonorisé le cas échéant. On privilégie un accès aisé à ce bâtiment (exemple : porte donnant directement sur l'extérieur) afin de faciliter les opérations de maintenance et d'entretien. Des caissons d'insonorisation peuvent être spécialement développés pour les extracteurs envisagés.
- Raccordement électrique** : il convient d'étudier la pertinence de créer un réseau électrique indépendant assurant un fonctionnement sans interruption même en cas de défaillance du système électrique du bâtiment. Des compteurs horaires (voire énergétiques) sont également envisageables, afin de s'assurer que le taux de fonctionnement de l'appareil est bien suffisant (24h/24, 7j/7, 365j/an), voire de mesurer la consommation électrique associée (utile pour indemniser les occupants du bâtiment, le cas échéant).
- Contrôle de la dépression** : outre les manomètres utilisés pour contrôler la dépression créée sous la dalle au niveau des points de contrôle (par exemple : lors des visites de contrôle – sensibilité de l'ordre du Pa), le contrôle de la dépression créée par le dispositif est réalisé à l'aide d'un (ou plusieurs) dispositif(s) de mesure permanent(s) (qu'il(s) fonctionne(nt) en continu ou non), pouvant être reliés à un système de veille pour assurer le bon fonctionnement via une connexion internet ou téléphonique. Ainsi, des capteurs de pression différentielle, mesurant la différence de pression effective entre l'air sous la dalle et la pièce, sont privilégiés.

Remarque : L'utilisation de manomètres, à la place des capteurs de pression différentielle, peut également être envisagée. Néanmoins, lorsque ces manomètres sont reliés aux tuyaux d'aspiration (et non connectés directement aux points de contrôle réalisés à travers la dalle), ils ne permettent pas de vérifier la dépression effective sous la dalle, mais seulement de l'estimer à l'aide de tests réalisés lors de la mise en service du dispositif. Il convient, dans ce

cas, de prouver que la seule mesure réalisée à l'aide du manomètre suffit à garantir l'existence, en permanence (ou presque notamment dans les cas des systèmes passifs, au cours desquels des inversions ponctuelles de pression peuvent être rencontrées), d'une dépression suffisante sous la dalle.

DONNEES NECESSAIRES AU DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement à réaliser est généralement relativement simple. En effet, la maîtrise de la perméabilité et de l'homogénéité du massif drainant mis en place vont grandement augmenter l'efficacité du dispositif.

- Surface traitée : un point d'extraction (une cheminée d'extraction) d'un **SDSD passif** permet généralement de créer des dépressions satisfaisantes et homogènes dans un lit de graviers jusqu'à une surface d'environ 250 m² (ordre de grandeur dépendant des perméabilités à l'air du sol et du plancher bas du bâtiment) (BRGM, 2014 et EVALSDS, 2018). Le résultat est d'autant plus satisfaisant que le lit de gravier est perméable et homogène. Un ou plusieurs puisards ou réseaux de drains peuvent être raccordés à ce point d'extraction. Un raccordement de ce réseau à un extracteur mécanique accentue la dépression et la surface concernées.
- Choix du type de point d'aspiration (drain horizontal ou puisard vertical) : ce choix dépend à la fois :
 - de la configuration du bâtiment (notamment au regard du cheminement possible de la canalisation d'évacuation et donc de l'endroit où la canalisation peut ressortir de la dalle). Dans le cas d'un SDSD passif, on essaiera de placer la canalisation d'évacuation le plus au centre possible du bâtiment pour profiter au maximum du tirage thermique et pour limiter les pertes de charges (cas d'un bâtiment à créer). Dans les cas simples, l'utilisation d'un puisard, plus simple à mettre en œuvre, est envisageable pour un **SDSD passif** et donc également pour un **SDSD actif**.
 - de la forme simple ou complexe de l'ancrage du bâtiment ou de la pièce devant faire l'objet d'un **SDSD** (bâtiment/pièce simple (rectangulaire ou carré) ou bâtiment/pièce de forme plus complexe),

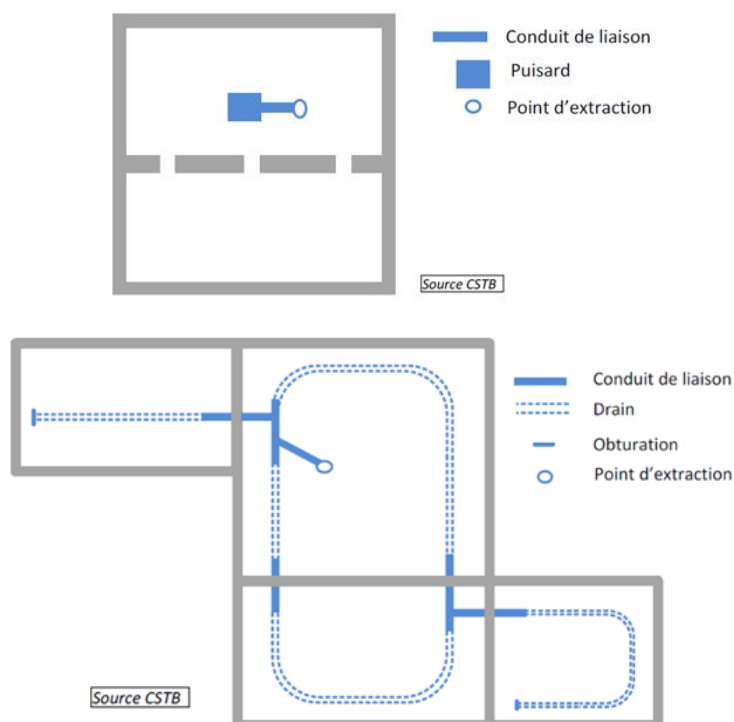


Figure 53 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration dans des bâtiments de formes différentes (source : EVALSDS, 2018)

- **de la surface concernée** : un drain permet généralement de générer une dépression plus homogène et de traiter des surfaces légèrement plus importantes qu'un puisard.

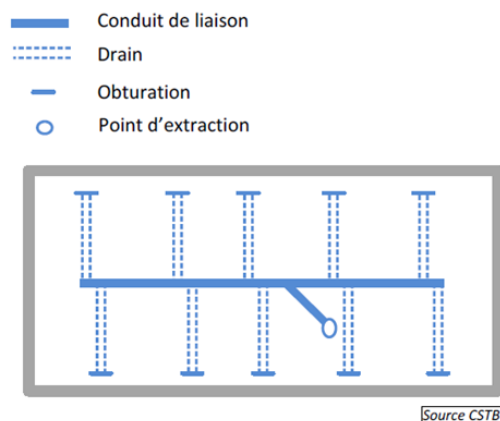


Figure 54 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration par drain (source : EVALSDS, 2018)

- **de la présence de longrines ou de fondations** : dans ce cas, des puisards reliés entre eux ou des réseaux de drains permettent de connecter les différents compartiments.

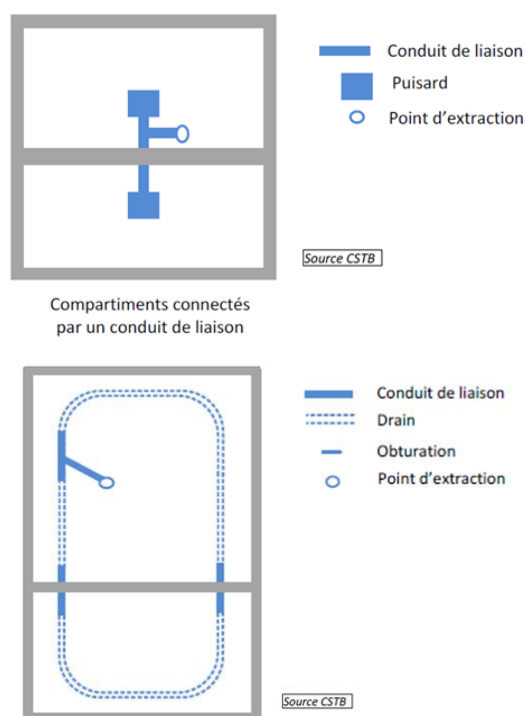


Figure 55 : Schéma de principe de réseaux d'aspiration en cas de présence de longrines ou de fondations. (source : EVALSDS, 2018)

- **de la perméabilité des sols sous-jacents** : la dépression créée est d'autant plus satisfaisante que la différence de perméabilité entre le massif drainant et les sols sous-jacents est importante. Plus les sols sous-jacents sont perméables par rapport au massif drainant, plus l'usage d'un drain est recommandé. A titre d'information, dans le cadre du projet EVALSDS,

l'utilisation d'un réseau de drain (pour un **SDSD passif**) est recommandée lorsque le ratio perméabilité du gravier/perméabilité du sol est inférieur à 1000. Dans le cas d'un réseau de drain en râteau, plus le sol sous-jacent est perméable, plus la distance inter-drain doit être faible. Une distance inter-drain comprise entre 2 à 4 m pour un **SDSD passif** permet généralement d'obtenir une bonne homogénéité de dépression (de l'ordre de 14 Pa, variation de dépression comprise entre 3 et 6 %), lorsque la perméabilité du sol sous-jacent est inférieure à 10^{-11} m², en considérant une perméabilité de massif de gravier de 10^{-8} m²) (BRGM, 2014 et EVALSDS, 2018).

- **Choix de l'extracteur (cas des SDSD actif) :** dans le cas de la mise en place d'un **SDSD actif** sous une dalle reposant sur un massif drainant, la perméabilité importante du massif drainant n'engendre qu'une perte de charge limitée. Par conséquent, il n'est généralement pas nécessaire de recourir à des extracteurs développant des couples (débit/dépression) importants. La surface à traiter et la complexité du réseau d'aspiration et de refoulement (entraînant donc des pertes de charge) est néanmoins à prendre en compte lors du dimensionnement. Pour mémoire, il ne s'agit pas de dépolluer, ni même d'attirer les vapeurs de la sub-surface mais simplement de bloquer les flux convectifs vers le bâtiment et de facto de procéder au captage par aspiration des polluants volatils qui remontent naturellement vers le bâtiment. La dépression générée doit donc être suffisamment élevée pour permettre ce captage des flux de vapeurs sous dalle puis leur évacuation en toiture, et pas trop forte pour ne pas accentuer les remontées de vapeurs au droit du bâtiment et éventuellement aboutir à un effet contreproductif.

PARAMETRES DE SUIVI

Il s'agira dans un premier temps de dimensionner le système d'extraction à mettre en œuvre sous la dalle (caractéristiques de l'éventuel système d'extraction à mettre en œuvre au cas où le système passif ne serait pas suffisant, nombre de tubes crépinés /drains nécessaires en fonction de la surface de la pièce, adapté aux composés présents de manière résiduelle dans les sols : HCT, HAP, BTEX).

D'une manière générale, dans le cadre d'une problématique d'intrusion de vapeurs dans un bâtiment, une attention particulière doit être portée à la vérification de l'absence de chemins préférentiels (par les passages de réseaux à travers les murs ou les dalles) facilitant la circulation des vapeurs à l'intérieur d'un bâtiment et/ou depuis le sol jusqu'à l'intérieur du bâtiment (par exemple : du sous-sol vers le RDC, du RDC vers le 1er étage...).

Idéalement, un suivi de l'installation à distance est recommandé afin de limiter la gêne pour les occupants du bâtiment.

La mise en place d'un bilan quadriennal devra intégrer :

- un contrôle de l'intégrité de la dalle béton à chaque visite ou inspection.
- un contrôle de l'ensemble de l'installation à chaque visite ou intervention (extracteur (si installé), relevé du temps de fonctionnement (si SDSD actif), vérification de la dépression sous dalle et du débit total d'aspiration, ajustements éventuels (débits, puissance, réglages des vannes, etc) ...).
- un contrôle de la qualité de l'air (1er niveau au-dessus de la dalle et rejet) tous les 3 mois la première année, puis possibilité d'adaptation de la fréquence en fonction de l'évolution des résultats (stabilité ou baisse).

DUREE

La durée de mise en place doit être prévue dans le cadre de la construction du bâtiment.
La durée totale du suivi doit être identique à la durée d'exploitation du bâtiment.

ESTIMATION FINANCIERE

Les coûts des excavations dépendent principalement des volumes de sols à traiter et des cadences.

La superficie du bâtiment concerné par un drainage des gaz sous-dalle a été estimée à environ 1 200 m² sur la base de la cartographie des zones de pollution concentrée réalisées (paragraphe O.2.4). Environ 10% de surface supplémentaire pour les recouvrements de la couverture est à prendre en compte, soit 120 m².

La mise en place du drainage a été estimée à environ 5 jours.

Le contrôle et suivi a été estimé à 4x par an pendant 4 an (mise en place d'un bilan quadriennal).

Tableau 49 : Estimation des coûts pour l'étape 2 : drainage des gaz sous dalle

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (€H.T)	Total (€H.T)
Organisation et suivi du chantier	FT	1	10 000	10 000
<i>Ce prix comprend : Etablissement des dossiers administratifs, Mise en place et suivi du chantier (clôture, etc.) Réception du chantier</i>				
Amenée et repli du matériel	FT	1	1 000	1 000
Mise en place d'un drainage passif	m2	1 320	35	46 200
Suivi des travaux	J	5	450	2 250
Contrôle et suivi	U	16	850	13 600
Rapport de fin de travaux	FT	1	1 500	1 500
TOTAL				74 550

Les prix indiqués ci-dessus sont donnés à titre indicatif sur la base du retour d'expérience de FONDASOL et/ou sur la base de prix indiqué sur le site internet <https://www.selecdepol.fr/> de l'ADEME et du BRGM.

O.4.4. Synthèse des solutions retenues

Le tableau ci-dessous fait la synthèse des solutions de gestion proposées et étudiées.

Tableau 50 : Synthèse des solutions de gestion proposées

Solution de gestion	Etape de traitement	Coûts estimés (k€)	Avantages	Inconvénients	Objectifs de dépollution	Durée
Solution I : excavation, confinement d'une partie des terres et évacuation en centre de traitement ou d'enfouissement hors-site du reste	Etape I : excavation des terres impactées sous le futur bâtiment et confinement sur site de 1 200 m ³	entre 1 430 et 1 460 k€	<ul style="list-style-type: none"> technique simple et rapide, présente une garantie de résultats : les seuils de dépollution atteints sont aisément contrôlables via les analyses de fonds et de flancs de fouille, applicable à de nombreux composés ; elle est particulièrement bien adaptée pour éliminer une source de pollution très concentrée et limitée dans l'espace (hot spot) ou une source de pollution difficilement traitable par d'autres techniques (contaminants récalcitrants, mélange de pollution, concentrations élevées), permet de confiner un très grand nombre de polluants, particulièrement bien adapté pour les grands volumes de pollution par des composés inorganiques voire mixte, technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs, compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants. 	<ul style="list-style-type: none"> les risques typiques des terrassements doivent être considérés : explosion, endommagements d'infrastructures enterrées, chute de personne dans la fouille, les pollutions ne sont pas détruites et restent en place : aucune action n'est réalisée sur le volume et la toxicité des déchets. La seule action est relative à la réduction importante du transfert de pollution, il est primordial de garder la mémoire de la pollution et d'instaurer des restrictions, il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme, il est nécessaire d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement (endommagement du confinement du au gel/dégel, tassement différentiel, passage d'engins, dessiccation, attaque de rongeurs, végétation, ...), la couverture permet seulement de limiter les transferts verticaux (eaux pluviales, gaz, contact, réenvols de poussières) mais ne permet pas de contrôler les flux horizontaux, la mise en place notamment au niveau des soudures doit être irréprochable, il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitudes ...), <p>étant donné que les confinements existants n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.</p>	Seuils de dépollution définis dans l'ARR à atteindre (paragraphe Q).	2,5 mois
	Etape 2 : drainage des gaz sous dalle	75 k€	<ul style="list-style-type: none"> présente une garantie pour les futurs usagers ; technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats significatifs, compétitivité en termes de coût et de performance. 	<ul style="list-style-type: none"> dans le cas de bâtiment à construire, peu de facteurs limitants sont identifiés puisque le projet peut être adapté en conséquence. La réalisation de bâtiments de forme simple sans une multitude de longrines et autres fondations facilite la propagation de l'aspiration sous l'ensemble de la dalle. Néanmoins, même pour des bâtiments complexes et/ou en présence de longrines, drainer les gaz sous dalle est très probablement envisageable sous réserve d'augmenter le nombre de points d'aspiration ou de drains d'aspiration et d'anticiper les pertes de charges associées lors du choix de l'extracteur ; nécessite un suivi sur le long terme ; nécessite un dimensionnement préalable ; peu adaptée sur les grandes surfaces ; <p>la pollution n'est pas traitée.</p>	Absence d'objectifs.	Egale à la durée de vie du bâtiment (50 ans en moyenne en France, tous bâtiments confondus).

P. CONTROLE DE L'EFFICACITE ET DE LA PERENNITE DES MESURES DE GESTION

P.I. Mesures proposées pour la gestion du risque en phase travaux

P.I.I. Protection des travailleurs et des riverains

Compte tenu de la présence dans les sols d'anomalies en métaux lourds, d'HAP, de BTEX, de PCB et d'HCT, FONDASOL Environnement préconise la mise en œuvre de mesures de protections collectives ou d'équipements de protection individuelle afin d'empêcher :

- le contact direct avec les sols ;
- l'inhalation et l'ingestion de poussières de sols ;
- l'inhalation de vapeur.

Le respect des consignes suivantes de gestion de l'hygiène et de la sécurité sur le chantier permet de limiter les expositions :

- limitation de la présence de personnel en extérieur, en contact avec les terres : emploi d'engins de terrassement à cabine close et pressurisée par exemple ;
- port d'équipements adéquats de protection individuelle : gants, combinaison, masques à poussières ou à cartouches si besoin ;
- respect des règles simples d'hygiène ;
- l'interdiction de manger, de boire et de fumer dans la zone de chantier ;
- lavage des mains et changement de vêtements à la fin de chaque poste ;
- arrosage des zones de travail afin de limiter les envols de poussière (si besoin).

Le niveau de concentration et la nature des risques présentés par les substances rencontrées dans les sols seront annexés au cahier des charges des travaux. Si le chantier est soumis à obligation de coordination, les recommandations générales seront retranscrites par le coordonnateur SPS du chantier dans le plan général de coordination (PGC) en matière de sécurité et de protection de la santé.

En tout état de cause, la définition précise des mesures appliquées en cours de chantier sera déterminée par l'entreprise réalisant les travaux, sur la base de l'évaluation des risques¹⁶ prescrite dans le cadre du Code du Travail. Ces mesures seront retranscrites, si applicables, dans le plan particulier de sécurité et de protection de la santé (PPSPS).

¹⁶ Article R4121-1 du code du travail : « L'employeur transcrit et met à jour dans un document unique les résultats de l'évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs à laquelle il procède en application de l'article L. 4121-3. Cette évaluation comporte un inventaire des risques identifiés dans chaque unité de travail de l'entreprise ou de l'établissement. »

Nous recommandons de prendre en compte les dispositions mentionnées dans le guide relatif à la « *Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites industriels pollués* » édité par l'ADEME et l'INRS en 2002.

P.1.2. Découverte d'une anomalie non encore identifiée

Compte tenu du caractère non exhaustif du diagnostic, la découverte d'anomalies non connues à ce jour reste possible. Cet aléa sera pris en considération dans le Dossier de Consultation des Entreprises. Les zones concentrées d'anomalies¹⁷ devront faire l'objet d'un traitement adapté, conformément à la Politique Nationale d'approche des sites et sols pollués.

En cas de découverte, les mesures à mettre en œuvre en urgence sont les suivantes :

- avertir la maîtrise d'ouvrage ;
- faire appel au prestataire externe qualifié en charge du suivi des terres excavées qui se prononcera sur les mesures de gestion spécifiques à engager ;
- placer les terres excavées sur une zone de confinement temporaire ;
- clôturer la zone et baliser la fouille en attente de mesures de gestion adaptées.

Toute personne intervenant sur le site et découvrant une contamination devra en avvertir le propriétaire du terrain ou toute personne en relation contractuelle avec l'occupant.

P.2. Surveillance environnementale

Le plan de gestion doit préciser les modalités de surveillance des milieux (proposition d'un réseau d'ouvrages de surveillance adapté, protocole de prélèvement, programme analytique, fréquence de surveillance, ...).

Les mesures mises en œuvre seront validées par un dossier de récolement sur la base des dossiers d'ouvrage exécutés.

Tableau 51 : Surveillance des milieux

		Solution de traitement concernée
Contrôle sur les sols		
Paramètres	HAP, BTEX et PCB	x
Fréquence	Ponctuelle	
Budget	600 à 1 000 €H.T.	
Contrôle sur les gaz du sol		
Paramètres	Hydrocarbures volatils C5-C16 (méthode TPH), naphtalène et BTEX	x
Fréquence	Ponctuelle	
Budget	800 à 1 200 €H.T.	
Contrôle sur l'air ambiant lié à la mesure constructive (drainage sous-dalle)		
Paramètres	Hydrocarbures volatils C5-C16 (méthode TPH), naphtalène et BTEX	x
Fréquence	Bilan quadriennal	
Budget	10 000 à 20 000 €H.T.	

¹⁷ Par exemple, terres imprégnées d'hydrocarbures.

P.3.Mise en œuvre de restrictions d'usages

Dans le cas où des pollutions résiduelles sont laissées en place, la mise en œuvre de dispositifs de restriction d'usage est essentielle puisqu'il s'agit du seul moyen qui permet de garantir que l'usage futur d'un site reste compatible avec les modalités de gestion décidées et mises en œuvre, au cours du temps en :

- **informant** de l'état de pollution d'un terrain à tout acquéreur ou utilisateur d'un terrain ;
- **encadrant** toute futures interventions sur site ;
- **pérennisant** la conservation et la mise en disposition dans le temps grâce à la Conservation des Hypothèses et/ou l'intégration de l'information aux documents d'urbanisme (PLU par exemple).

La restriction d'usage en matière de sols pollués est une limitation du droit de disposer de la propriété d'un terrain. Cette limitation consiste en un ensemble des recommandations, précautions, voire interdiction sur la manière d'utiliser, d'entretenir, de construire ou d'aménager, compte tenu de la présence de substances polluantes dans le sous-sol.

Cinq outils permettent de conserver la mémoire :

- la servitude d'utilité publique (SUP) ;
- le porter à connaissance (PAC) et le projet d'intérêt général (PIG) ;
- la restriction d'usage conventionnelle au profit de l'Etat (RUCPE) ;
- la restriction d'usage entre parties (RUP).

Les différents types de servitudes sont détaillés dans le Tableau 52.

Nota : en règle générale, les restrictions d'usage ne peuvent limiter ou interdire les usages existants.

Tableau 52 : Les différents types de servitudes possibles

Types de servitudes	Fondement	Portée (possibilités vis-à-vis du milieu sol)	Report dans les documents d'urbanisme	Publication au service de publicité foncière
SUP La décision de se porter sur un outil différent ne sera justifié que s'il est démontré que la SUP n'est pas applicable au cas traité.	Partie législative : articles L515-8 à 12 Code de l'environnement : articles R.515-24 à R.515-31, R.512-39-3, R.512-46-27 Circulaire du 18 octobre 2005 relative à la cessation d'activité Circulaire du 8 février 2007 relative aux installations classées	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable aux sites et aux autres terrains • Applicable à un grand nombre de propriétaires • Elle permet de contourner l'opposition des propriétaires • Indemnisation des propriétaires des terrains (demande à réaliser dans un délai de 3 ans) • Réalisation d'une enquête publique (délai de 1 mois) sauf si la SUP ne concerne qu'un petit nombre de propriétaires (moins de 5) ou des surfaces limitées • Signée par le Préfet 	Oui	Oui
PAC	Code de l'urbanisme : articles L.121-2 et R.121-1	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable aux sites et aux autres terrains 	Oui	Non

Types de servitudes	Fondement	Portée (possibilités vis-à-vis du milieu sol)	Report dans les documents d'urbanisme	Publication au service de publicité foncière
		<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'indemnisation des propriétaires des terrains 		
PIG	Code de l'urbanisme : articles L.121-9 et R.121-3	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable aux sites et aux autres terrains • Applicable à un grand nombre de propriétaires • Préférée aux SUP lorsque la pollution n'est pas attribuable à un exploitant en particulier ou lorsque l'exploitant responsable de la pollution est défaillant • Pas d'indemnisation des propriétaires des terrains • Signée par le Préfet 	Oui	Non
RUCPE	<p>Circulaire du 19 juin 1981 « Installation classée – Etablissement de servitudes au profit de l'Etat »</p> <p>Circulaire du 8 février 2007 relative aux installations classées</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Convention passée entre le propriétaire et le représentant de l'Etat (Préfet) • Utilisée dans des raisons particulières où la mise en place de la restriction d'usage doit avoir lieu rapidement, dans enquête publique : vente, cession, clôture de liquidation, ... • Consentement du propriétaire • Adaptée lorsque l'exploitant responsable de la pollution est défaillant. • Applicable au site en priorité • Pas d'indemnisation des propriétaires des terrains • Signée par le Préfet et le(s) propriétaire(s) de(s) parcelle(s). 	Non, sauf si complété par PAC	Oui
RUP	Droit de contracter entre parties (exploitant, propriétaire)	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable au site • Adaptée lorsque l'exploitant responsable de la pollution est défaillant. • Pas d'indemnisation des propriétaires des terrains • Accord des signataires • Vérification par l'administration de la pertinence des mesures • Elle est signée par le propriétaire et toute partie prenant acte. 	Non, sauf si complété par PAC	Oui

Compte tenu de la connaissance du site, nous recommandons de mettre en place une restriction d'usage de type SUP.

Celle-ci concernera l'occupation des sols, les usages du sous-sol et l'utilisation des eaux souterraines tels que détaillé dans le Tableau 53.

Tableau 53 : Restriction d'usages

Occupation des sols		Usage du sous-sol		Utilisation des eaux souterraines
Autorisée	Non autorisée	Autorisé	Non autorisé	
<ul style="list-style-type: none"> • Usage industriel (dalle d'un seul tenant de 6 m x 6 m) et bureaux en dehors de la zone impactée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Jardins non recouverts • Tout aménagement non précisé dans « occupation autorisée » sans en avoir au préalable vérifié la compatibilité avec l'état des milieux 	<p><u>Avec prescription particulière :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Traitement des terres impactées en HCT, HAP, BTEX et PCB et réception des travaux ; • Mise en place d'un drainage des gaz du sol sous dalle sous le bâtiment ; • Confinement d'une partie des terres impactées en extérieur et sous couverture semi-perméable ; • Mise en place des canalisations d'amenée d'eau potable dans des fosses de sables propres et implantées en dehors des zones impactées. Dans le cas de figure où les canalisations d'eau potable seraient implantées dans des zones impactées, les canalisations devront être métalliques ou en matériaux anti-perméation (type tricouche par exemple). • Gestion appropriée des déblais en cas d'excavation et traçabilité du devenir des déblais. • Information des entreprises en cas de travaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tout usage non précisé dans « usage autorisé » sans en avoir au préalable vérifié la compatibilité avec l'état des milieux ; • Réutilisation des terres sur site sous bâtiment. 	<p><u>Prescriptions particulières :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Une étude devra être réalisée pour toute utilisation éventuelle de la nappe, y compris pour la surveillance de sa qualité.

Q. ANALYSE DES ENJEUX SANITAIRES (A320)

L'Analyse des Risques Résiduels a pour objectif de garantir que les impacts liés aux sources résiduelles de contamination, sont acceptables au sens de la Politique Nationale de gestion des sites et sols pollués.

Q.I. Méthodologie - Présentation de la démarche

L'objectif d'une réhabilitation est de garantir des expositions résiduelles qui soient acceptables. En effet, une pollution ne présente un risque que dans la mesure où des expositions ou des modes de contamination sont possibles.

La seule considération du niveau de pollution intrinsèque d'un milieu, sans considérer les usages de ce milieu ou les mesures de gestion qui conduisent à couper les transferts ou les voies d'exposition, n'a pas de sens dans le cadre d'une gestion fondée sur la maîtrise des risques.

L'Analyse des Risques Résiduels (ARR) est l'outil dédié à cet effet. Il s'agit d'une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS) menée sur les expositions résiduelles qui prend en compte l'ensemble des mesures de gestion envisagées et les scénarios d'usages futurs du site.

Ainsi, l'Analyse des Risques Résiduels n'est effectuée que lorsque le Plan de Gestion ne permet pas d'éliminer de façon définitive les sources de pollution ou de supprimer les voies de transfert entre les sources de pollution et les populations.

L'ARR est ainsi une EQRS qui valide le Plan de Gestion et ne peut conclure qu'à des risques acceptables (Figure 56).

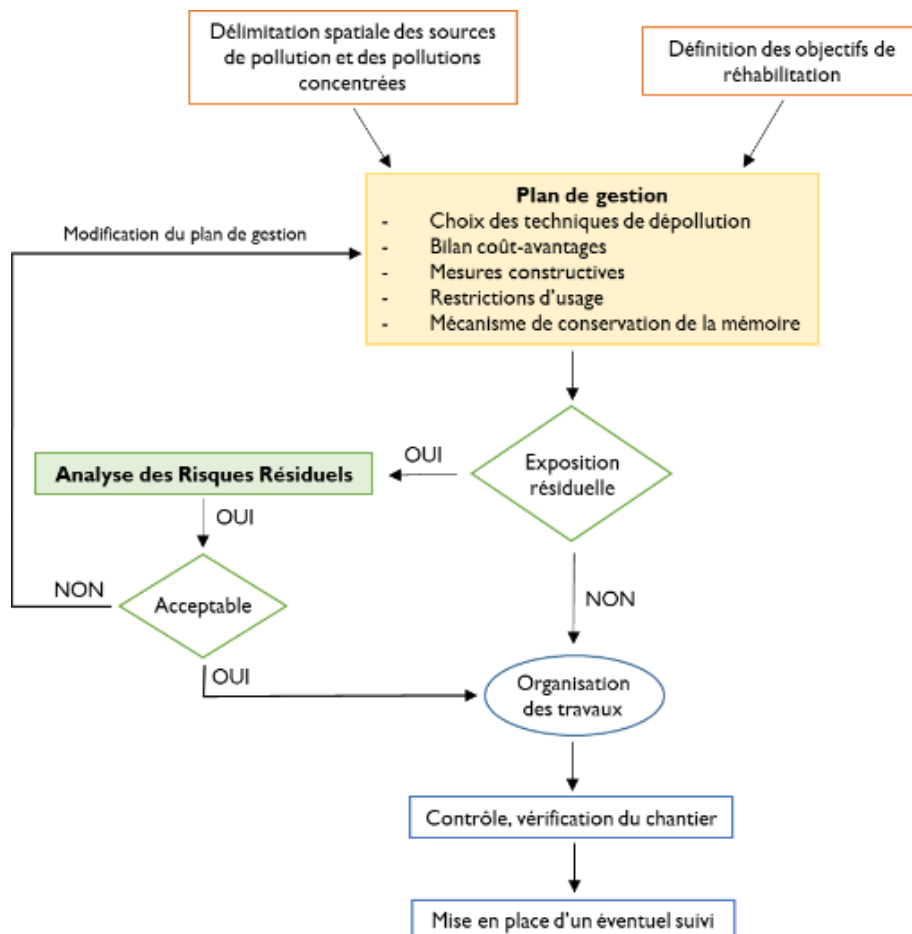


Figure 56 : Principe de l'Analyse des Risques Résiduels

L'Analyse des Risques Résiduels, proposée par FONDASOL Environnement, est réalisée conformément au guide du Ministère de l'Environnement : « La démarche d'Analyse des Risques Résiduels » Version 0 de février 2007.

L'évaluation des risques repose sur quatre étapes :

- Etape 1 : Identification des dangers : quels sont les effets indésirables que les différentes substances peuvent avoir sur l'homme ?
- Etape 2 : Estimation des relations doses-réponses pour les substances considérées : quelle est la valeur entre la dose d'exposition à la substance et la réponse de l'organisme exposé (choix de la Valeur Toxicologique de Référence ou VTR) ?
- Etape 3 : Estimation des expositions : qui est exposé à la substance dangereuse, où, comment, à quel niveau d'exposition et pendant combien de temps ?
- Etape 4 : Caractérisation des risques sanitaires : quel est le niveau de risque, la probabilité de survenue du danger, en comparant les doses d'exposition aux VTR.

Une discussion des incertitudes des calculs est également intégrée à l'étude.

Q.2. Sélection des substances et des concentrations

Le choix des substances et des concentrations se base sur les règles suivantes. En première approche on considère :

- en intérieur, une fois les zones de pollution concentrée retirées :
 - les teneurs maximales retrouvées des sols restants en place (en **violet**), pour les composés non soumis à des seuils de coupure et non associés à des valeurs dans les gaz du sol ;
 - les seuils de coupure retenus (en **rouge**) pour le naphtalène et les BTEX ;
- en extérieur, en cas de confinement sur site des terres impactées :
 - les concentrations maximales (sur l'ensemble des résultats de sols) retrouvées dans les sols (en **vert**).

D'après les résultats d'analyses dans les différents milieux (sol, eaux souterraines et gaz du sol), les concentrations retenues sont présentées dans le Tableau 54 suivant.

Tableau 54 : Substances et teneurs retenues dans l'Analyse des Risques Résiduels pour la voie inhalation depuis les sols (calcul principal)

Composés mesurés au moins une fois lors des différentes campagnes	Concentration maximale mesurée dans les sols restant en place (mg/kg) – en intérieur	Concentration par rapport aux seuils de dépollution définis dans les sols (mg/kg) – en intérieur	Concentration maximale mesurée dans les sols (mg/kg) – en extérieur en cas de réutilisation sur site	Prise en compte pour la voie inhalation
Métaux				
Mercure	0,64 (ST35 (0,05-1,00) -> 0,032)	Absence de seuil de dépollution	0,64 (ST35 (0,05-1,00) -> 0,032)	Oui composé quantifié dans les sols restant en place. Une teneur égale à 5% ¹⁸ de la concentration maximale mesurée dans les sols est considérée.
COHV				
Trichlorométhane	< LQ	Absence de seuil de dépollution	< LQ	Non composé non quantifié dans les sols (mais quantifié dans les eaux souterraines : calcul présenté en incertitude).
BTEX				
Benzène	0,16 (ST17(0,05-0,60))	Seuil de 8 mg/kg selon la répartition moyenne des BTEX au droit des échantillons pollués en BTEX : ST5/1 (0,10-1,10), SD1/1 (0,05-1,50) et ST38 (0,05-1,00) Benzène : 0,5% = 0,04 arrondi à 0,05 (car correspond à la LQ) Toluène : 1,5% = 0,12 Ethylbenzène : 28% = 2,2 Xylènes : 70% = 5,6	0,16 (ST17(0,05-0,60))	Oui, seuils de dépollution et confinement en extérieur à valider.
Toluène	0,37 (ST39(0,05-1,00))		0,48 (ST33(0,05-1,00))	
Ethylbenzène	2,1 (ST39(0,05-1,00))		7,7 (ST5/1 (0,10-1,10))	
Xylènes	6 (SD7/1 (0,05-1,50))		21,78 (ST5/1 (0,10-1,10))	
Hydrocarbures				
Hydrocarbures C5-C16¹⁹	Ali. C5-C6 : 0,34 (ST40(0,05-1,00)) Ali. C6-C8 : 0,63 (PA1 (0,50-1,30)) Ali. C8-C10 : 4,7 (ST40(0,05-1,00)) Aro. C8-C10 : 13 (ST39(0,05-1,00)) C10-C12 : 17,7 (ST40(0,05-1,00)) C12-C16 : 110 (SD3/1 (0,05-1,50))	Absence de seuil de dépollution	Ali. C5-C6 : 0,34 (ST40(0,05-1,00)) Ali. C6-C8 : 0,63 (PA1 (0,50-1,30)) Ali. C8-C10 : 4,7 (ST40(0,05-1,00)) Aro. C8-C10 : 13 (ST39(0,05-1,00)) C10-C12 : 380 (ST6/1 (0,30-1,30)) C12-C16 : 2000 (ST6/1 (0,30-1,30))	Oui composé quantifié dans les sols restant en place et confinement en extérieur à valider.
HAP				
Naphtalène	0,89 (ST33(0,05-1,00))	Seuil de 0,8 mg/kg	343 (ST6/1 (0,30-1,30))	Oui, seuil de dépollution et confinement en extérieur à valider.

¹⁸ D'après le rapport du BRGM Le mercure et ses composés. Comportement dans les sols, les eaux et les boues de sédiments, rapport BRGM/RP-51890-FR de juin 2003, chapitre « Spéciation du mercure dans les sols » : « Dans les sols naturels et les sols pollués, les composés organiques du mercure sont présents. Le mercure n'a pratiquement été trouvé que sous la forme méthylée. [...]. Toutefois, le taux de méthylmercure est le plus souvent inférieure à 5% ».

¹⁹ Pour les hydrocarbures totaux, en l'absence de distinction entre les fractions aliphatiques et aromatiques, les calculs sont menés en appliquant la concentration totale aux deux fractions et en retenant la répartition conduisant à des risques les plus élevés. Ici : les hydrocarbures aliphatiques sont considérés en C10-C12 et aromatiques en C12-C16.

Q.3. Etape I : Identification des dangers

L'exposition à une substance toxique peut produire des effets biochimique, histologique ou morphologique, se traduisant par des altérations spécifiques d'un organe, d'un système ou d'une fonction (système hématopoïétique, fonctions de reproduction par exemple), ou d'un processus biochimique ou biologique (cancer et mutagénicité).

Ces effets varient selon l'intensité, la voie, la fréquence et la durée de l'exposition mais aussi en fonction de l'espèce, du sexe, de l'âge et de l'état de santé des populations exposées. Ils peuvent être réversibles ou irréversibles, immédiats ou différés.

La variété et la sévérité des effets toxiques observés dans les populations augmentent généralement avec le niveau d'exposition : c'est la relation dose-effet. Elle est clairement à distinguer de la relation dose-réponse définie comme décrivant la relation entre la fréquence de survenue d'une pathologie dans une population et le niveau d'exposition à un composé toxique.

Q.3.1. Effets à seuil (déterministes)

Les effets à seuil correspondent aux effets aigus et à certains effets chroniques non cancérogènes, non génotoxiques et non mutagènes, dont la gravité est proportionnelle à la dose. Selon cette approche classique de la toxicologie, les effets ne surviennent que si une certaine dose est atteinte et dépasse les capacités de détoxification, de réparation ou de compensation de l'organisme : il existe donc une dose limite en-dessous de laquelle le danger ne peut apparaître. Le danger n'a théoriquement pas lieu de survenir si ces seuils ne sont pas dépassés. Au-delà du seuil, l'intensité de l'effet croît avec l'augmentation de la dose administrée.

Dans ce cas, les valeurs toxicologiques de référence sont généralement construites sur la base de l'effet critique. Il peut être différent selon la voie d'exposition de l'organisme :

- pour une exposition par voie orale, les valeurs toxicologiques de référence sont exprimées en masse de substance par kilogramme de poids corporel de la cible et par jour (mg/kg pc/j). Ces valeurs sont définies comme étant l'estimation de la quantité de produit à laquelle un individu peut théoriquement être exposé (par ingestion) sans constat d'effet nuisible, sur une durée déterminée et sur la base de toutes les informations actuelles,
- pour une exposition par voie respiratoire, les valeurs toxicologiques de référence s'expriment en masse de substance par m³ d'air ambiant (mg/m³) et correspondent à la teneur de produit dans l'air ambiant à laquelle un individu peut être exposé sans constat d'effet nuisible.

Cet effet est caractérisé par le calcul d'un Quotient de Danger (QD) par substance (lorsque la substance présente un effet à seuil), par milieu et par cible (adulte et enfant distinctement).

Q.3.2. Effets sans seuils (probabilistes)

Un effet sans seuil se définit comme un effet qui apparaît quelle que soit la dose reçue. La probabilité de survenue croît avec la dose, mais l'intensité de l'effet n'en dépend pas. L'hypothèse classiquement retenue est qu'une seule molécule de la substance toxique peut provoquer des changements dans une cellule et être à l'origine de l'effet observé. A l'origine, la notion d'absence de seuil était associée aux effets cancérogènes uniquement. Aujourd'hui, cette notion recouvre également des effets sur la reproduction (reprotoxicité) et les mutations génétiques (mutagénicité).

Pour les substances à effets sans seuil, la Valeur Toxicologique de Référence est généralement appelée Excès de Risque Unitaire (ERU). Il s'agit de la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu contracte un cancer s'il est exposé pendant sa vie entière à une unité de dose ou de concentration de toxique. Cet indice est l'inverse d'une dose et s'exprime en (mg/kg/j)⁻¹ ou (mg/m³)⁻¹.

Cet effet est caractérisé par le calcul d'un Excès de Risque Individuel (ERI) par substance (lorsque la substance présente un effet sans seuil), par milieu et par cible (adulte et enfant distinctement).

Q.4. Etape 2 : Estimation de la relation doses-réponses et choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)

La sélection des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) est effectuée conformément aux prescriptions établies par la circulaire n°DGS/EAI/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 ».

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**.

L'ensemble des voies d'exposition a été traité en effets chroniques, correspondant à de longues durées d'exposition (d'une année à une vie entière pour l'US-EPA, 1989).

Lorsqu'elles existent, les VTR retenues les composés sélectionnés dans l'étude sont présentées ci-après (cf. détail en Annexe I6).

Tableau 55 : Valeurs Toxicologiques de Référence retenues pour la voie inhalation

Impression Bibliothèque	Dénomination	N° CAS	DJT Inhalation	Année	Nom source d'information	ERU Inhalation	Année	Nom source d'information
	Symbole		VTRs,inh			VTRss,inh		
	Unité		mg/m3			(mg/m3)-1		
Date de Mise à jour			Avril 2021		juin-20	juin-20		
Substances (Dénomination int)								
Métaux et métalloïdes								
Mercure			7439-97-6	0,00003	2008	OEHHA	-	
Composés Organo-halogénés Volatils (COHV)								
Trichlorométhane TCmA [chloroforme]			67-66-3	0,0976	1998	ATSDR	-	Choix INERIS nov 2019 Rapport INERIS-20-200358-2173530-V1.0 de
Trichlorométhane [chloroforme] (effets cancérogènes)			67-66-3	0,063	2008	Anses	-	Choix INERIS nov 2019 Rapport INERIS-20-200358-2173530-V1.0 de
BTEX & CAV								
Benzène			71-43-2	0,01	2008	ANSES	0,026	Anses
Toluène			108-88-3	19	2017	Anses	-	
Ethylbenzène			100-41-4	1,5	2016	Anses	-	Choix INERIS nov 2019 Rapport INERIS-20-200358-2173530-V1.0 de
Xylènes			1330-20-7	0,2	2007	ATSDR	-	
Hydrocarbures aliphatiques								
Hydrocarbures aliphatiques C5-C6			Aliph>5-6	-		-		
Hydrocarbures aliphatiques C6-C8			Aliph>6-8	18,4	1997	-		Volumes 3 et 4 du Total Petroleum Hydrocarbons Working Group.
Hydrocarbures aliphatiques C8-C10			Aliph>8-10	1	1997	-		
Hydrocarbures aliphatiques C10-C12			Aliph>10-12	1	1997	-		
Hydrocarbures aliphatiques C12-C16			Aliph>12-16	1	1997	-		
Hydrocarbures aromatiques								
Hydrocarbures aromatiques C8-C10			Aroma>8-10	0,2	1997	-		Volumes 3 et 4 du Total Petroleum Hydrocarbons Working Group.
Hydrocarbures aromatiques C10-C12			Aroma>10-12	0,2	1997	-		
Hydrocarbures aromatiques C12-C16			Aroma>12-16	0,2	1997	-		
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)								
Naphtalène			91-20-3	0,037	2013	Anses	0,0056	Anses

Q.5. Etape 3 : Estimation des expositions

Q.5.1. Définition du budget espace-temps

L'évaluation des expositions repose notamment sur les fréquences et les durées de présence des cibles sur le site, des caractéristiques des aménagements, ... Ces paramètres constituent les données d'entrée du modèle de calculs. L'ensemble des paramètres d'entrée du modèle est synthétisé dans le Tableau 56 conformément aux hypothèses suivantes.

Les cibles considérées sont les futurs travailleurs adultes.

Le budget espace-temps retenu dans les calculs des risques sanitaires est présenté dans le tableau ci-après.

Tableau 56 : Paramètres du budget espace-temps

N°Cible :			Cible 1
Profil de la cible		Unité	Ouvrier
			
			Adulte
Usage			Ouvrier
Période d'exposition			16 à 58 ans
Budget espace-temps		Unité	Ouvrier
Profil corporel			
hresp	Hauteur de respiration	m	1,5
Durée d'exposition			
E _f	Nombre de jour d'exposition théorique annuelle / Nombre de jours de présence dans l'année	jour/an	220
T	Durée d'exposition théorique	année	42
T _m	Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (Substances à effet à seuil T _m =T substance sans seuil d'effet : T _m est assimilé à la durée de la vie entière, prise conventionnellement égale à 70 ans)	année	70
Inhalation d'air intérieur			
ti _{intérieur}	Nombre d'heures par jour en intérieur	h/j	8,00
Inhalation d'air extérieur			
ti _{extérieur, sur site}	Nombre d'heures par jour en extérieur	h / jour	1,00

Q.5.2. Estimation des concentrations dans les différents milieux

Q.5.2.1. Estimation des concentrations dans l'air intérieur

La modélisation des transferts des gaz des sols vers l'air intérieur se base sur le développement de 2 principaux outils utilisés en France qui intègrent le transport diffusif et le transport convectif :

- le modèle de Johnson et Ettinger²⁰ (1991), recommandé par l'US EPA (2004a), qui prend en compte la convection et la diffusion des vapeurs dans le sol et **au niveau du plancher d'un bâtiment**. Il est adapté aux constructions en dallage indépendant (avec fissuration périphérique de la dalle liée au séchage).;
- le modèle VOLASOIL²¹ (Waitz et al., 1996), actuellement recommandé par le RIVM (institut néerlandais pour la protection de la santé et de l'environnement). Ce modèle conçu pour représenter le transfert des polluants dans l'air intérieur d'un bâtiment construit sur **vide sanitaire** à partir d'une source dans le sol ou dans une nappe peu profonde, prend en compte la convection et la diffusion des vapeurs dans le sol et la convection à travers le plancher.

Les équations de ces deux logiciels ont été réécrites par nos soins sous Excel, dans le fichier référencé en interne F.E.R.S. (Fondasol Evaluation des Risques Sanitaires).



Figure 57 : Choix du logiciel de calcul

Au vu du projet d'aménagement prévu sur le site, le modèle Johnson et Ettinger sera utilisé.

Le transfert des vapeurs du sol vers l'air intérieur des bâtiments est conditionné selon plusieurs effets présentés en Figure 58.

²⁰ 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

²¹ 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

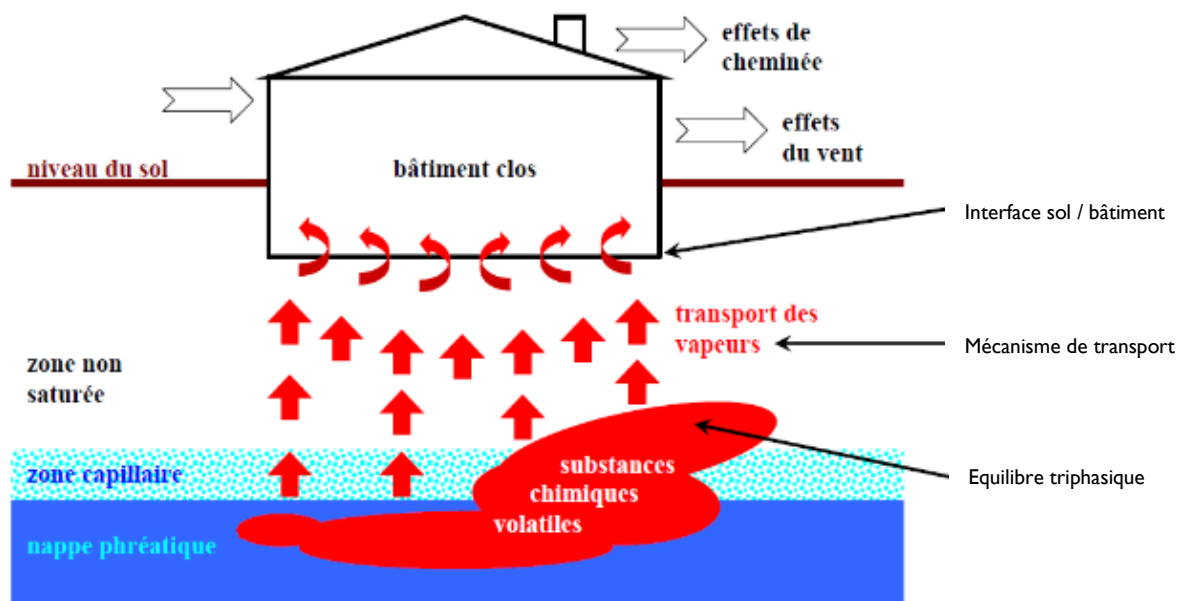


Figure 58 : Schéma de principe du transfert des vapeurs du sol vers l'air intérieur des bâtiments
(Source : INERIS)

Les transferts sont conditionnés par 2 mécanismes principaux :

- le phénomène de diffusion moléculaire : lorsque deux volumes d'air ayant des concentrations différentes en substances sont en présence, les substances se déplacent de façon à tendre vers une concentration homogène des deux volumes d'air,
- le phénomène de convection : c'est la différence de pression entre le sol et l'intérieur de l'habitation entraînant un mouvement d'air depuis le sol vers le bâtiment.

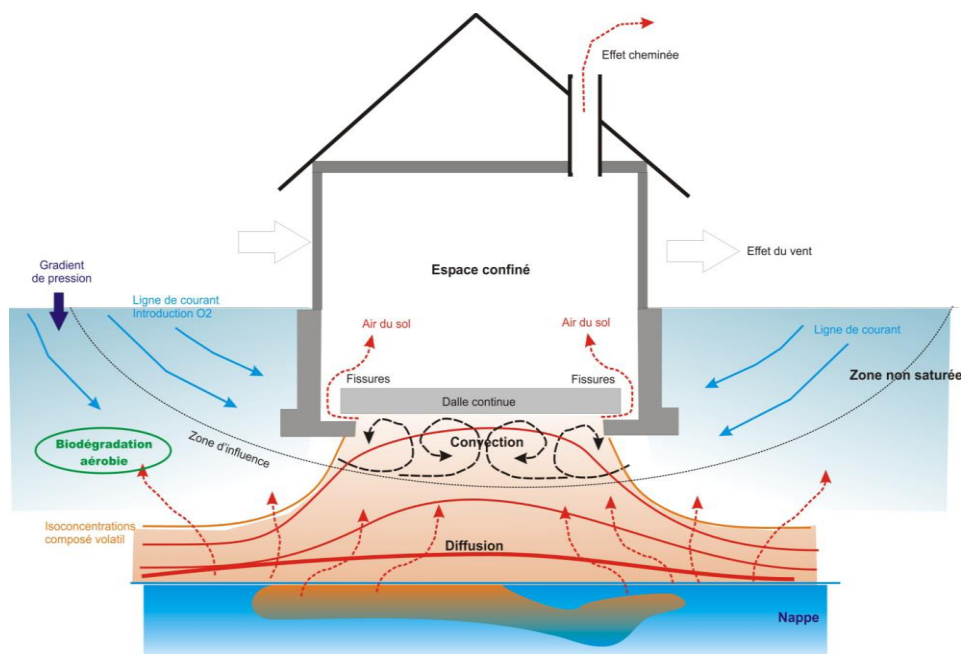


Figure 59 : Schéma de principe du modèle Johnson & Ettinger

Au niveau du bâtiment, le calcul prend en compte les transferts au niveau de la dalle mais pas au niveau des murs du vide sanitaire ou du sous-sol. La moyenne annuelle de la concentration dans le lieu de vie et les niveaux d'exposition par inhalation sont également calculées. Dans le cas d'un bâtiment sur sous-sol, il est possible de distinguer la fraction de temps passé dans le sous-sol et la fraction de temps passé dans les pièces à vivre. La concentration dans la source devra être définie comme une constante.

Les paramètres d'entrée pour Johnson & Ettinger sont présentés dans les figures suivantes.

L'ensemble des équations utilisées pour l'évaluation des concentrations dans l'air intérieur est présenté en Annexe I8.




Paramètre	Valeur retenue	Unité	Justification
Lieu de vie			
			
Taux de renouvellement d'air dans le lieu de vie τ_p	0,0002778	s ⁻¹	Valeur bibliographique issues de l'US-EPA, 2004 retenue pour un usage de bureaux / commerces : 1 vol/h (soit 24 vol/j)
Hauteur du bâtiment h_{building}	13 m		Hauteur mesurée sur plan de coupe / communiquée par le client
Longueur l_{building}	6 m		Trame de murs porteurs considérée par défaut de 6m par 6m
Largeur L_{building}	6 m		
Surface du bâtiment (ou de l'espace clos) A_b	36 m ²		Valeur calculée
Périmètre X_{crack}	24 m		Valeur calculée
			
Dalle béton du bâtiment			
Epaisseur de la dalle du bâtiment L_{crack}	20,0 cm		Données client
Ratio de fissuration dans la dalle η	3,80E-03	sans unité	Valeur proposée par J&E
Porosité à l'eau de la dalle	0,07	sans unité	Valeur bibliographiques
Porosité à l'air de la dalle	0,05	sans unité	
Distance de la source au dallage L_T	50,0 cm		Donnée de terrain
Température T_s du sol	285,65 K		Température moyenne annuelle en France
Densité du sol ρ	1,8 g/cm ³		BP RISC
Couche de sol 1			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la couche l_1 :	50,0 cm		Observation de terrain
Porosité n_1	0,375	sans unité	Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
dont Teneur en eau $\Theta_{\text{eau},1}$	0,054	sans unité	
et Teneur en air $\Theta_{\text{air},1}$	0,321	sans unité	
Perméabilité intrinsèque k_{v1}	9,91E-08	cm ²	
Couche source			
	Source sol		
	Couche 1		
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Profondeur de la source	50,0 cm		
Volume de la source	Source infinie		L'état de la source est considérée stationnaire et implique un régime permanent
Porosité n_{source}	0,375	sans unité	
Teneur en eau $\Theta_{\text{eau,source}}$	0,054	sans unité	
Teneur en air $\Theta_{\text{air,source}}$	0,321	sans unité	
Teneur en carbone organique foc	0,002	sans unité	US-EPA 1996, 2002, 2004 (Bioplume III, Natural Attenuation Decision Support System, 1998)

Figure 60 : Données d'entrée pour l'air intérieur depuis les sols

La source a été placée à 0,5 m de profondeur car cette profondeur correspond à la profondeur minimale des terres présentant des composés à évacuer (ST42). Cette hypothèse est donc majorante.

Tableau 57 : Concentrations calculées dans l'air intérieur

	N° CAS	Concentration dans l'air ambiant intérieur	INERIS valeurs au 30/11/2018			Calculé
			R1	R2	R3	Air ambiant lieu de vie (Calculé à partir de J&E de Plain- pied)
Unité			µg/m3	µg/m3	µg/m3	µg/m ³
Substance						
Métaux et métalloïdes						
Mercure	7439-97-6		0,030	0,200	-	1,07E-02
BTEX & CAV						
Benzène	71-43-2		2	10	30	1,19E+01
Toluène	108-88-3		20 000	21 000	21 000	4,01E+01
Ethylbenzène	100-41-4		-	-	-	1,42E+03
Xylènes	1330-20-7		100	1 000	8 800	8,68E+02
Hydrocarbures aliphatiques						
Hydrocarbures aliphatiques C5-C6	Aliph>5-6		18 000	180 000	-	5,44E+02
Hydrocarbures aliphatiques C6-C8	Aliph>6-8		18 000	180 000	-	6,77E+02
Hydrocarbures aliphatiques C8-C10	Aliph>8-10		1 000	10 000	-	1,76E+03
Hydrocarbures aliphatiques C10-C12	Aliph>10-12		1 000	10 000	-	1,47E+03
Hydrocarbures aliphatiques C12-C16	Aliph>12-16		1 000	10 000	-	
Hydrocarbures aromatiques						
Hydrocarbures aromatiques C8-C10	Aroma>8-10		200	2 000	-	6,90E+02
Hydrocarbures aromatiques C10-C12	Aroma>10-12		200	2 000	-	
Hydrocarbures aromatiques C12-C16	Aroma>12-16		200	2 000	-	1,12E+02
Hydrocarbures Aromatiques						
Naphtalène	91-20-3		-	-	-	1,68E+00

Les concentrations obtenues sont supérieures aux bornes RI pour le benzène, les xylènes, les hydrocarbures aliphatiques C8-C12 et aromatiques C8-C10.

Q.5.2.2. Estimation des concentrations dans l'air extérieur

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 boîte de taille fixée. Comme pour l'air intérieur, la zone de pollution est considérée comme infinie.

Ces équations ont été réécrites par nos soins sous Excel, dans le fichier référencé en interne F.E.R.S. (Fondasol Evaluation des Risques Sanitaires).



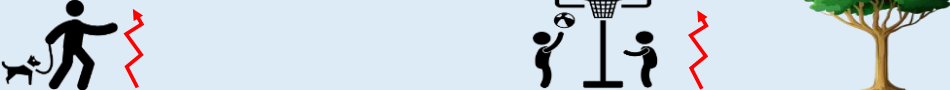
Paramètre	Valeur retenue	Unité	Justification
Vitesse du vent v_{it_v}	3 m.s ⁻¹		Vitesse moyenne observée en France
			
Longueur de la zone d'émission parallèle à la direction du vent $long_zp$	100 m		Valeur mesurée sur plan
Hauteur de la zone de mélange dans l'air ambiant $h_mel\ adulte$	1,5 m		
Recouvrement			
Nature du recouvrement	Enrobé asphalté		
Epaisseur recouvrement h_{couv}	0,10 m		
Porosité du recouvrement	0,03 -		
Teneur en eau du recouvrement	0,000 -		
Teneur en air du recouvrement	0,030 -		
Densité du sol p	1,8 g/cm ³		BP RISC
Couche de sol 1			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la couche l_1	0,5 m		Observation de terrain
Porosité n_1	0,375 -		
dont Teneur en eau $\Theta_{eau,1}$ et Teneur en air $\Theta_{air,1}$	0,054 - 0,321 -		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
Couche source			
Couche source	Couche 1		
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Volume de la source	Source infinie		L'état de la source est considérée stationnaire et implique un régime permanent (approche pénalisante)
Distance de la source L_{source}	0,5 m		
Porosité n_{source}	0,375 sans unité		
Teneur en air $\Theta_{air,source}$	0,321 sans unité		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
Teneur en eau $\Theta_{eau,source}$	0,054 sans unité		
Teneur en carbone organique foc	0,002 sans unité		US-EPA 1996, 2002, 2004 (Bioplume III, Natural Attenuation Decision Support System, 1998)

Figure 6 I : Données d'entrée pour l'air extérieur depuis les sols

La source a été placée à 0,5 m de profondeur car cette profondeur correspond à la profondeur maximale des terres présentant des composés à évacuer (ST42). Cette hypothèse est donc majorante.

L'ensemble des équations utilisées pour l'évaluation des concentrations dans l'air extérieur est présenté en Annexe I8.

Les concentrations dans l'air extérieur sont estimées à partir des concentrations d'entrée retenues dans les différents milieux et rappelées dans le Tableau 54 et résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 58 : Concentrations calculées dans l'air extérieur

	N° CAS	Concentration dans l'air ambiant extérieur	INERIS valeurs au 30/11/2018			Calculé
			R1	R2	R3	Air ambiant extérieur à 1.50 m
Unité			µg/m3	µg/m3	µg/m3	
Substance						
Métaux et métalloïdes						
Mercure	7439-97-6		0,03	0,20	-	2,78E-04
BTEX & CAV						
Benzène	71-43-2		2,00	10,00	30,00	1,66E+00
Toluène	108-88-3		20000,00	21000,00	21000,00	6,54E+00
Ethylbenzène	100-41-4		-	-	-	5,36E+01
Xylènes	1330-20-7		100,00	1000,00	8800,00	1,19E+02
Hydrocarbures aliphatiques						
Hydrocarbures aliphatiques C5-C6	Aliph>5-6		18000,00	180000,00	-	2,40E+01
Hydrocarbures aliphatiques C6-C8	Aliph>6-8		18000,00	180000,00	-	2,99E+01
Hydrocarbures aliphatiques C8-C10	Aliph>8-10		1000,00	10000,00	-	7,79E+01
Hydrocarbures aliphatiques C10-C12	Aliph>10-12		1000,00	10000,00	-	
Hydrocarbures aliphatiques C12-C16	Aliph>12-16		1000,00	10000,00	-	
Hydrocarbures aromatiques						
Hydrocarbures aromatiques C8-C10	Aroma>8-10		200,00	2000,00	-	3,05E+01
Hydrocarbures aromatiques C10-C12	Aroma>10-12		200,00	2000,00	-	5,62E+01
Hydrocarbures aromatiques C12-C16	Aroma>12-16		200,00	2000,00	-	4,94E+00
Hydrocarbures Aromatiques						
Naphtalène	91-20-3		-	-	-	5,44E+00

Les concentrations obtenues sont supérieures aux bornes R1 pour les xylènes.

Q.5.3. Estimation des expositions

Q.5.3.1. Exposition par inhalation

Pour la voie respiratoire, la dose d'exposition est généralement remplacée par la concentration inhalée. La concentration moyenne inhalée par jour est calculée de la façon suivante :

$$CI = \left[\sum (Ci \times ti) \right] \times F \times \frac{T}{Tm}$$

avec : CI : concentration moyenne inhalée (mg/m3)

Ci : concentration de contaminant dans l'air inhalé pendant la fraction de temps ti (mg/m3)

ti : fraction du temps d'exposition à la concentration Ci pendant une journée (-)

F : fréquence d'exposition : nombre annuel de jours d'exposition ramené au nombre total annuel de jours (-)

T : durée d'exposition (années)

Tm : période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (années) avec

Tm = DE *365 pour les substances à seuil

Tm = 70*365 pour les substances sans seuil

Les concentrations moyennes inhalées sont calculées à partir des concentrations l'air présentées dans les paragraphes précédents,

Le détail des calculs est donné en Annexe I9.

Q.6. Etape 4 : Calculs de risques sanitaires

Q.6.1. Evaluation des risques à effet seuil : calcul du QD

Le quotient de danger, lorsque l'exposition par inhalation est retenue, est calculé selon :

$$QDi = \frac{CI}{RfC}$$

avec : QDi : Quotient de danger inhalation (-)
CI : Concentration inhalée (mg/m³)
RfCi : VTR à seuil par inhalation (mg/m³)

Pour chaque cible (adulte ou enfant), les QD des substances présentant le même effet critique sur la santé sont ensuite sommés. Cette somme est comparée au seuil de risque acceptable de I défini dans la Circulaire du 8 février 2007.

Notons toutefois que le guide d'avril 2017 recommande uniquement l'addition des quotients de danger uniquement pour les substances ayant le même mécanisme d'action toxique sur le même organe cible.

Q.6.2. Evaluation des risques à effets sans seuils : calculs de l'ERI

L'Excès de Risque Individuel, lorsque l'exposition par inhalation est retenue, est calculé selon :

$$ERLi = CI \times ERUi$$

avec : ERLi : Excès de Risque Individuel par voie Inhalation (-)
CI : Concentration inhalée (mg/m³)
ERUi : Excès de Risque Unitaire par voie Inhalation (mg.m⁻³)⁻¹

Pour chaque cible (adulte ou enfant), les ERI de l'ensemble des substances sont ensuite sommés, quel que soit l'effet critique observé sur la santé. L'ERI adulte et l'ERI enfant sont également sommés puisque la probabilité d'apparition de l'effet sans seuil s'exerce sur la vie entière. Cette somme est comparée au seuil de risque acceptable de 10⁻⁵ défini dans la Circulaire du 8 février 2007. La valeur de 10⁻⁵ correspond à l'apparition d'un cancer (ou autre effet sans seuil étudié) sur une population de 100 000 personnes.

Q.6.3. Conclusions sur l'acceptabilité des risques résiduels

Les résultats des calculs de risques sanitaires sont présentés dans le Tableau 59.

L'ensemble des résultats obtenus sont présentés en Annexe I9.

Tableau 59 : Résultats des calculs de risques sanitaires depuis les seuils de coupure définis dans les sols

Valeurs de risques	QD non cancérogènes		ERI	
	Cible 1	Composé tirant	Cible 1	Composé tirant
	Ouvrier	le risque	Ouvrier	le risque
Inhalation de vapeurs en intérieur Lieu de vie de plain-pied / sur vide sanitaire	2,85E+00	Xylènes, HC aro. C8-C10, HC ali. C8-C12	3,86E-05	Benzène
Inhalation de vapeurs en extérieur	3,74E-02	Xylènes	1,11E-06	Benzène
Risque total	2,88E+00		3,97E-05	
Seuils fixés par la circulaire du 08/02/2007	1,00		1,00E-05	

L'Analyse des Risques Résiduels montre que les risques induits sur le site en intérieur ne sont pas conformes aux exigences formulées dans la Politique de gestion des sites et sols pollués, et notamment à la circulaire de février 2007. En revanche, les risques sont acceptables en extérieur en cas de confinement des terres impactées sur site.

Deux calculs avaient été réalisés en considérant :

- soit la réalisation d'un bâtiment de plain-pied mais le remblaiement de la zone de pollution concentrée par des sols de type limons,
- soit la réalisation d'un bâtiment sur vide sanitaire et le remblaiement de la zone de pollution concentrée par des sols de type sables (géologie observée au droit de la zone d'étude),

et ceux-ci conduiraient à des risques sanitaires acceptables.

Cependant, d'un point de vue technique et en concertation avec les Chantiers de l'Atlantique, notamment compte tenu du fait de la mise en place d'inclusions rigides dans le sol pour répartir les descentes de charge, aucune des deux solutions proposées ci-dessus sont techniquement réalisables.

Un calcul a été réalisé sur la base des concentrations moyennes dans les sols restant en place sous le bâtiment. Toutefois, ceux-ci confirment les risques inacceptables pour l'inhalation intérieur avec QD= 1,34 et ERI = 6,14E-05. La prise en compte des teneurs moyennes dans les sols sous le futur bâtiment ne modifierait pas les conclusions quant à la non compatibilité entre les teneurs résiduelles dans les sols et le projet d'aménagement.

Notons que la modélisation surestime les concentrations calculées dans les gaz du sol à partir d'une source sol (jusqu'à 10 à 1000 fois supérieures à ce qui a été mesurée dans les piézairs selon les composés). Ainsi de nouveaux calculs de risques ont été menés en définissant des seuils de dépollution dans les gaz du sol (en **orange**) pour les composés rendant le calcul de risques sanitaires inacceptables (xylènes, benzène et les hydrocarbures) à atteindre sous bâtiment.

Tableau 60 : Substances et teneurs retenues dans l'Analyse des Risques Résiduels pour la voie inhalation depuis les sols et les gaz du sol (seuils de réception à valider)

Composés mesurés au moins une fois lors des différentes campagnes	Concentration maximale mesurée dans les sols restant en place (mg/kg) – inhalation intérieur	Concentration par rapport aux seuils de dépollution définis dans les sols (mg/kg) – en intérieur	Concentration maximale mesurée dans les gaz du sol (µg/m³)
Métaux			
Mercure	0,64 (ST35 (0,05-1,00) -> 0,032)	Absence de seuil de dépollution	n.a.
COHV			
Trichlorométhane	< LQ	Absence de seuil de dépollution	n.a.
BTEX			
Benzène	0,16 (ST17(0,05-0,60))	Seuil de 8 mg/kg selon la répartition moyenne des BTEX au droit des échantillons pollués en BTEX : ST5/I (0,10-1,10), SD1/I (0,05-1,50) et ST38 (0,05-1,00) Benzène : 0,5% = 0,04 arrondi à 0,05 (car correspond à la LQ) Toluène : 1,5% = 0,12 Ethylbenzène : 28% = 2,2 Xylènes : 70% = 5,6	261 (PA1)
Toluène	0,37 (ST39(0,05-1,00))		31 (PA2)
Ethylbenzène	2,1 (ST39(0,05-1,00))		60 (PA2)
Xylènes	6 (SD7/I (0,05-1,50))		103 (PA2)
Hydrocarbures			
Hydrocarbures C5-C16²²	Ali. C5-C6 : 0,34 (ST40(0,05-1,00)) Ali. C6-C8 : 0,63 (PA1 (0,50-1,30)) Ali. C8-C10 : 4,7 (ST40(0,05-1,00)) Aro. C8-C10 : 13 (ST39(0,05-1,00)) C10-C12 : 17,7 (ST40(0,05-1,00)) C12-C16 : 110 (SD3/I (0,05-1,50))	Absence de seuil de dépollution	Ali. C5-C6 : 4 753 (PA1) Ali. C6-C8 : 13 130 (PA1) Ali. C8-C10 : 114 (PA3) Ali. C10-C12 : 297 (PA2) Aro. C8-C10 : 482 (PZ1) Aro. C10-C12 : 71 (PA2)
HAP			
Naphtalène	0,89 (ST33(0,05-1,00))	Seuil de 0,8 mg/kg	< LQ

²² Pour les hydrocarbures totaux, en l'absence de distinction entre les fractions aliphatiques et aromatiques, les calculs sont menés en appliquant la concentration totale aux deux fractions et en retenant la répartition conduisant à des risques les plus élevés. Ici : les hydrocarbures aliphatiques sont considérés en C10-C12 et aromatiques en C12-C16.

Les résultats des calculs de risques sanitaires avec des seuils de réception à valider en gaz du sol en benzène, xylènes, hydrocarbures C8-C10 sont présentés dans le Tableau 59. L'ensemble des teneurs calculées dans l'air intérieur du futur bâtiment est par ailleurs inférieur aux valeurs de comparaison.

Tableau 61 : Résultats des calculs de risques sanitaires depuis les seuils de dépollution dans les sols et les gaz du sol

Valeurs de risques	QD non cancérogènes		ERI	
	Cible 1	Composé tirant le risque	Cible 1	Composé tirant le risque
	Ouvrier		Ouvrier	
Inhalation de vapeurs en intérieur Lieu de vie de plain-pied / sur vide sanitaire	3,93E-01	Ethylbenzène	1,43E-06	Naphtalène
Inhalation de vapeurs en extérieur	3,74E-02	Xylènes	1,11E-06	Benzène
Risque total	4,31E-01		2,54E-06	
Seuils fixés par la circulaire du 08/02/2007	1,00		1,00E-05	

L'Analyse des Risques Résiduels montre que les risques induits sur le site en intérieur sont conformes aux exigences formulées dans la Politique de gestion des sites et sols pollués, et notamment à la circulaire de février 2007 avec des valeurs seuils dans les gaz du sol.

Q.7. Discussions sur les incertitudes et étude de sensibilité

L'approche de l'incertitude sert à évaluer la possibilité de sur- ou sous-estimation du risque.

En première approche, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

- les substances non volatiles n'ont pas été prises en compte car il est rappelé que seul le transfert par inhalation a été considéré dans la présente EQRS : l'hypothèse apparaît réaliste,
- les teneurs maximales dans les sols résiduels ou les seuils de coupure définis pour les hydrocarbures, le naphtalène, les BTEX et le mercure (sols et gaz du sol pour certains) ;
- tous les QD des substances ont été cumulés sans distinction des organes cibles dans le premier calcul (depuis les concentrations dans les sols). Cela conduit à un risque inacceptable. Or, tous les QD pris séparément sont inférieurs à 1. De plus,
 - les xylènes ont une toxicité ciblée sur les organes respiratoires et une atteinte au développement, le QD pour les xylènes est égal à 8,71E-01, soit proche du seuil égal à 1 ;
 - les hydrocarbures aliphatiques engendrent des modifications hépatiques et hématologiques, le QD pour ces composés est égal à 6,58E-01 ;
 - les hydrocarbures aromatiques engendrent quant à eux une diminution de poids, le QD pour ces composés est égal à 8,06E-01, soit proche du seuil égal à 1.

Les résultats du QD par organes cibles sont donc sensiblement proches de la valeur seuil même en distinguant les organes cibles.

- des incertitudes concernant les valeurs des paramètres choisis subsistent, notamment pour les caractéristiques du sol (perméabilité, teneur en eau, etc.). D'une manière générale, nous avons retenu des hypothèses réalistes, voire majorantes.

Ces hypothèses ne seront donc pas soumises à une étude de sensibilité.

En revanche, compte tenu de la mise en évidence de composés volatils dans les eaux souterraines, les teneurs maximales dans les eaux souterraines (en **bleu**) ont été retenues en incertitude (incertitude 1).

Une deuxième étude d'incertitude (incertitude 2) a été effectuée en considérant uniquement les teneurs maximales mesurées dans les gaz du sol (en **orange**) indépendamment des valeurs de références (bornes RI).

Les concentrations retenues dans les eaux souterraines (incertitude 1) et dans les gaz du sol (incertitude 2) sont présentées dans le tableau suivant. Les données d'entrée pour l'incertitude 1 sont présentées en Figure 62 et Figure 63.

Par ailleurs, compte tenu de la présence de bureaux au centre du bâtiment, même si ceux-ci seront situés en dehors de la zone impactée, un calcul d'incertitude a été réalisé pour un usage de bureaux (3 m x 3 m et 2,5 m de haut) sur la base des résultats en gaz du sol (incertitude 3).

Les résultats de l'étude de sensibilité sont présentés en Tableau 63.

Tableau 62 : Substances et teneurs retenues pour la voie inhalation depuis les eaux souterraines et les gaz du sol (calculs présentés en incertitudes)

Composés mesurés au moins une fois lors des différentes campagnes	Concentration maximale mesurée dans les eaux souterraines (µg/l)	Concentration maximale mesurée dans les gaz du sol (µg/m³)
Métaux		
Mercure	< LQ	n.a.
COHV		
Trichlorométhane	1,8 (PZ1)	n.a.
BTEX		
Benzène	28 (PZ1)	261 (PA1)
Toluène	51 (PZ1)	31 (PA2)
Ethylbenzène	56 (PZ1)	60 (PA2)
Xylènes	130 (PZ1)	103 (PA2)
Hydrocarbures		
Hydrocarbures C5-C16 ²³	Ali. C5-C6 : 39 (PZ1) Ali. C6-C8 : 17 (PZ1) Ali. C8-C10 : 7,5 (PZ1) Aro. C8-C10 : 51 (PZ1) C10-C12 : 38 (PZ1) C12-C16 : 18 (PZ1)	Ali. C5-C6 : 4 753 (PA1) Ali. C6-C8 : 13 130 (PA1) Ali. C8-C10 : 1 114 (PA3) Ali. C10-C12 : 297 (PA2) Aro. C8-C10 : 482 (PZ1) Aro. C10-C12 : 71 (PA2)
HAP		
Naphtalène	26 (PZ1)	< LQ

LQ = Limite de Quantification du laboratoire / n.a. : non analysé

²³ Pour les hydrocarbures totaux, en l'absence de distinction entre les fractions aliphatiques et aromatiques, les calculs sont menés en appliquant la concentration totale aux deux fractions et en retenant la répartition conduisant à des risques les plus élevés.

Figure 62 : Données d'entrée pour l'air intérieur depuis les eaux souterraines




Paramètre	Valeur retenue	Unité	Justification
Lieu de vie  			
Taux de renouvellement d'air dans le lieu de vie τ_p	0,0002778	s ⁻¹	Valeur bibliographique issues de l'US-EPA, 2004 retenue pour un usage de bureaux / commerces : 1 vol/h (soit 24 vol/j)
Hauteur du bâtiment h_{building}	13 m		Hauteur mesurée sur plan de coupe / communiquée par le client
Longueur l_{building}	6 m		Trame de murs porteurs considérée par défaut de 6m par 6m
Largeur L_{building}	6 m		
Surface du bâtiment (ou de l'espace clos) A_b	36 m ²		Valeur calculée
Périmètre X_{crack}	24 m		Valeur calculée
			
Dalle béton du bâtiment			
Epaisseur de la dalle du bâtiment L_{crack}	20,0 cm		Données client
Ratio de fissuration dans la dalle η	3,80E-03 sans unité		Valeur proposée par J&E
Porosité à l'eau de la dalle	0,07 sans unité		Valeur bibliographiques
Porosité à l'air de la dalle	0,05 sans unité		
Distance de la source au dallage L_T	213,0 cm		Donnée de terrain
Température T_s du sol	285,65 K		Température moyenne annuelle en France
Densité du sol ρ	1,8 g/cm ³		BP RISC
Couche de sol 1			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la couche l_1 :	196,0 cm		Observation de terrain
Porosité n_1	0,375 sans unité		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
dont Teneur en eau $\Theta_{\text{eau},1}$	0,054 sans unité		
et Teneur en air $\Theta_{\text{air},1}$	0,321 sans unité		
Perméabilité intrinsèque k_{v1}	9,91E-08 cm ²		
Couche de sol 3			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la frange capillaire L_{cz}	17,0 cm		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
Porosité n_3	0,375 sans unité		
dont Teneur en eau $\Theta_{\text{eau},3}$	0,253 sans unité		
et Teneur en air $\Theta_{\text{air},3}$	0,122 sans unité		
Couche source			
	Source nappe		Constat de terrain
	Couche 3		
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Profondeur de la source	213,0 cm		
Volume de la source	Source infinie		L'état de la source est considérée stationnaire et implique un régime permanent
Porosité n_{source}	0,375 sans unité		US-EPA 1996, 2002, 2004 (Bioplume III, Natural Attenuation Decision Support System, 1998)
Teneur en eau $\Theta_{\text{eau},\text{source}}$	0,253 sans unité		
Teneur en air $\Theta_{\text{air},\text{source}}$	0,122 sans unité		
Teneur en carbone organique foc	0,002 sans unité		

Figure 63 : Données d'entrée pour l'air extérieur depuis les eaux souterraines






Paramètre	Valeur retenue	Unité	Justification
Vitesse du vent v_{it_v}	3 m.s ⁻¹		Vitesse moyenne observée en France
			
Longueur de la zone d'émission parallèle à la direction du vent $long_zp$	100 m		Valeur mesurée sur plan
Hauteur de la zone de mélange dans l'air ambiant h_mel enfant	1 m		
Hauteur de la zone de mélange dans l'air ambiant h_mel adulte	1,5 m		
			
			
Recouvrement			
Nature du recouvrement	Enrobé asphalté		
Epaisseur recouvrement h_{couv}	0,10 m		
Porosité du recouvrement	0,03 -		
Teneur en eau du recouvrement	0,000 -		
Teneur en air du recouvrement	0,030 -		
Densité du sol p	1,8 g/cm ³		BP RISC
Couche de sol 1			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la couche l_1	1,96 m		Observation de terrain
Porosité n_1	0,375 -		
dont Teneur en eau $\Theta_{eau,1}$	0,054 -		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
et Teneur en air $\Theta_{air,1}$	0,321 -		
Couche de sol 3			
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Epaisseur de la frange capillaire L_{cz}	0,17 m		
Porosité n_3	0,375 sans unité		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
dont Teneur en eau $\Theta_{eau,3}$	0,253 sans unité		
et Teneur en air $\Theta_{air,3}$	0,122 sans unité		
Couche source			
Couche source	Couche 3		
Type de sol :	Sable		Constat de terrain
Volume de la source	Source infinie		L'état de la source est considérée stationnaire et implique un régime permanent (approche pénalisante)
Distance de la source L_{source}	2,13 m		
Porosité n_{source}	0,375 sans unité		
Teneur en air $\Theta_{air,source}$	0,122 sans unité		Valeur proposées par modèle J & E pour ce type de sol
Teneur en eau $\Theta_{eau,source}$	0,253 sans unité		
Teneur en carbone organique foc	0,002 sans unité		US-EPA 1996, 2002, 2004 (Bioplume III, Natural Attenuation Decision Support System, 1998)

Tableau 63 : Résultats des calculs de sensibilité

Hypothèse considérées en calcul principal		Valeur considérée en sensibilité	Cible 1	Composé tirant le risque	Cible 1	Composé tirant le risque
Calcul principal avec seuils dans les sols et gaz du sol			4,31E-01	HC aro. C12-C16	2,54E-06	Benzène
Incertitude 1	Concentrations = concentrations depuis les seuils de dépollution sols et gaz du sol	Concentrations = concentrations depuis les seuils de dépollution sols et gaz du sol et concentrations maximales dans les eaux souterraines	9,19E-01	HC aro. C12-C16	5,61E-06	Benzène
Variation incertitude 1			113,39%		120,98%	
Incertitude 2	Concentrations = concentrations depuis les seuils de dépollution sols et gaz du sol	Concentrations = concentrations depuis les gaz du sol et source à 1 cm	3,85E-03	Benzène	4,97E-07	Benzène
Variation incertitude 2			-99,11%		-80,43%	
Incertitude 3	Concentrations = concentrations depuis les seuils de dépollution sols et gaz du sol	Concentrations = concentrations depuis les gaz du sol et source à 1 cm et usage de bureaux de 9 m2 sous 2,5 m de hauteur sous plafond	3,40E-02	Benzène	4,38E-06	Benzène
Variation incertitude 3			-92,12%		72,73%	

L'analyse des incertitudes permet de constater que la qualité dégradée des eaux souterraines ne remet pas en cause l'analyse des risques résiduels. Bien que les niveaux de risque soient proches des valeurs seuils, la modélisation surestimant le risque depuis une source sol ou nappe, il n'est pas apparu nécessaire d'aller au-delà de cette démarche sachant que les concentrations maximales en gaz du sol conduisent à des risques acceptables.

En effet, d'après notre retour d'expérience, la modélisation surestime les concentrations estimées dans les gaz du sol depuis une source sol. L'incertitude réalisée depuis les concentrations maximales mesurées dans les gaz du sol (en limite de la zone de pollution) permet en effet de confirmer que les risques sont acceptables pour un usage industriel.

R. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

R.1. Conclusions

Le site d'étude est divisé en 3 zones principales : un parking de véhicules légers (au sud et à l'est), un centre de tri des déchets (au centre nord), et une plateforme de tri de ferraille et métaux exploitée par la société GDE (à l'extrême nord). Un local de stockage de déchets dangereux, une zone de stockage de déchets dangereux ainsi qu'une plateforme de tri des métaux et ferraille ont été identifiés comme source potentielle de pollution.

L'étude de vulnérabilité des milieux a permis de mettre en évidence une nappe libre peu profonde vulnérable mais sans usage sensible recensé en aval hydrogéologique.

D'après l'étude historique du site, le site a été construit par remblaiement d'une partie de l'estuaire de la Loire entre 1975 et 1996. Le centre de tri des déchets a occupé la partie centrale du site pour le triage de déchets vers les années 1996, avant l'aménagement d'un parking entre 1999 et 2002 sur la partie sud et est du site. Une nouvelle plateforme de tri (encore en activité) a été aménagée entre 2009 et 2012 sur la partie nord du site.

Ainsi, trois sources potentielles de pollution ont été identifiées à l'issue de la visite de site et de l'étude historique. Il s'agit de l'apport de remblais de qualité vraisemblablement médiocre, de stockage de déchets liquides et dangereux ainsi que l'activité de la plateforme de tri des métaux.

Les investigations ont mis en évidence :

- dans les sols : des anomalies généralisées en métaux sur l'ensemble du site ainsi que des fortes teneurs en hydrocarbures C10-C40 et des impacts plus localisés en HAP (dont du naphthalène), en PCB et en BTEX ;
- dans les eaux souterraines : des anomalies en métaux, benzène et HAP ainsi que des teneurs significatives en hydrocarbures volatils C5-C16 ;
- dans les gaz du sol : des anomalies en benzène et hydrocarbures volatils C5-C16.

Les concentrations sont particulièrement élevées pour le cuivre, le plomb et le zinc mais cela est lié à un bruit de fond géochimique global attribuable au site. En revanche, des zones de pollution concentrée en hydrocarbures (une zone impactée en BTEX, HAP et HCT ainsi que deux zones impactées en naphthalène) et trois zones impactées en PCB ont été identifiées au droit du site. Sur la base des analyses disponibles (pollution non délimitée en profondeur), le volume de terre polluée a été estimé à environ 5 990 m³.

Le remblaiement par des sables sans mise en place de mesure constructive conduit à des risques inacceptables.

Afin de rendre compatibles les teneurs résiduelles avec le projet, il avait été étudié dans notre précédent rapport 2 solutions de gestion : un remblaiement des zones de pollution concentrée par des limons et le remblaiement des zones de pollution concentrée par des sables nécessitant également la mise en place d'un vide sanitaire. Toutefois, vous nous avez indiqué qu'aucune de ces deux solutions n'étaient envisageables d'un point de vue technique sur site compte tenu notamment de la mise en place d'inclusions rigides dans les sols sous le futur bâtiment afin de recevoir les descentes de charge.

Ainsi, la solution retenue est l'excavation des terres impactées sous le futur bâtiment et confinement sur site en extérieur d'une partie des terres (1 200 m³ peuvent être réutilisées en merlon sous recouvrement semi-perméable). Les autres terres polluées seront à évacuer en centre de traitement ou d'enfouissement.

Les seuils de réception en fond de fouille ont été définis à : 60 mg/kg en HAP, 0,8 mg/kg en naphthalène, 8 mg/ kg en BTEX et 0,8 mg/kg en PCB.

Sous le bâtiment, il conviendra de faire une réception en gaz des sols avec les seuils suivants : 261 µg/m³ en benzène, 103 µg/m³ en xylènes, 1 114 µg/m³ en hydrocarbures aliphatiques C8-C10, 297 µg/m³ en aliphatiques C10-C12, 482 µg/m³ en aromatiques C8-C10 et 71 µg/m³ en aromatiques C10-C12 dans les gaz du sol.

Cette solution a été estimée entre 1 430 et 1 460 k€.

En cas de non atteinte des seuils de réception sous le futur bâtiment, un drainage des gaz sous dalle pourra être mis en place. Cette mesure constructive a été estimée à environ 75 k€.

L'Analyse des Risques Résiduels montre que les risques induits sur le site et les seuils de dépollution définis, une fois les mesures de gestion mises en œuvre (excavation des terres polluées et validation des travaux avec des prélèvements en fond de fouille dans les sols et les gaz du sol conformes aux seuils, mise en place d'un drainage des gaz sous dalle si les seuils ne sont pas atteints), sont conformes ; les teneurs résiduelles seront donc compatibles avec un usage industriel.

R.2. Recommandations

Compte tenu des impacts mis en évidence au droit du site, FONDASOL Environnement recommande :

- la gestion des zones de pollution concentrée par une entreprise spécialisée afin de remettre en état le site d'étude ;
- le suivi environnemental des travaux de dépollution avec la réalisation de prélèvements de contrôle en cours de travaux, en fond et bords de fouille dans les sols ainsi que des prélèvements de gaz du sol en fond de fouille ;
- le suivi de la qualité des eaux souterraines en phase travaux afin de vérifier que les travaux n'influencent pas la qualité de ce milieu ;
- en cas de mise en place d'un drainage des gaz sous dalle :
 - la mise en place d'un drainage des gaz du sol par une entreprise spécialisée ;
 - le suivi des travaux de construction par une entreprise spécialisée ;
 - la réalisation d'un bilan quadriennal sur la mesure constructive mise en place.

En cas de confinement des terres polluées sur site, la mise en place d'une couverture multicouche semi-perméable (perméabilité comprise entre 10⁻⁶ et à 10⁻⁹ m/s) par une entreprise spécialisée. Il est nécessaire de mettre en place des filets avertisseurs au-dessus du confinement.

Le maintien d'anomalies résiduelles dans les sols du site nécessitera de mettre en place des mesures de conservation de la mémoire du site (à travers une restriction d'usage de type SUP). En cas de changement du projet d'aménagement, ces recommandations seraient à réévaluer.

S. LIMITES DE LA METHODE

Ce document doit être utilisé dans son entier.

Une étude de la pollution du milieu souterrain a pour seule fonction de renseigner sur la qualité des différents milieux investigués (sols, eaux souterraines, gaz du sol, ...). Toute utilisation en dehors de ce contexte, dans un but géotechnique par exemple, ne saurait engager la responsabilité de notre société.

Par ailleurs, ce document a été établi pour un projet d'aménagement spécifique. Toute évolution de ce projet devra donner lieu à une actualisation du présent document. Tout changement d'usage ultérieur pourra conduire à l'établissement de nouvelles mesures de gestion.

Par ailleurs, ce rapport est réalisé sur les données disponibles à la date de réalisation : il rend compte de l'état du milieu à un instant donné. Des événements ultérieurs au diagnostic (interventions humaines, accidents, traitement des terres pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, ou phénomènes naturels) peuvent modifier la situation observée à cet instant.

S.1. Etude documentaire

Cette étude est basée sur une approche documentaire. Les informations présentées ici sont soumises à l'exhaustivité et la fiabilité des documents disponibles et consultables : l'existence d'une information « non identifiée » ou « erronée » est possible. L'exhaustivité et la véracité des informations dont FONDASOL Environnement n'a pas la maîtrise ne peuvent être garanties.

S.2. Investigations

Les prélèvements ne peuvent pas offrir une vision continue de l'état des terrains du site. L'existence d'une anomalie d'extension limitée entre deux prélèvements et/ou à plus grande profondeur, qui aurait échappé à nos investigations, ne peut être exclue. Par ailleurs, l'inaccessibilité de certaines zones peut entraîner un défaut d'observation non imputable à notre société.

D'autre part, le diagnostic permet d'établir un état des lieux de la qualité environnementale des milieux à un instant donné. La survenue d'un incident ou d'une pollution ultérieure à la réalisation des investigations de terrain dans le cadre du diagnostic peut remettre en cause la validité des résultats et des conclusions du diagnostic.

L'échantillonnage du fait de son caractère ponctuel ne permet pas de représenter la totalité des impacts anthropiques (activités et installations humaines ciblées, lors des investigations, en fonction des données disponibles).

Enfin, seule la réalisation de fouilles à la pelle mécanique permet de s'assurer de la présence ou non de DIB dans les terres de remblais. Les déchets enfouis, s'ils ne peuvent être triés à l'avancement des terrassements, peuvent générer des refus en filière ISDI ou en comblement de carrière acceptant les terres sulfatées.

S.3. Gestion d'une pollution identifiée

Le Plan de Gestion s'attache à étudier en priorité les modalités de pollutions concentrées puis à maîtriser les impacts et risques associés et enfin à gérer les pollutions résiduelles et diffuses. Il s'agit d'une étude qui ne vaut pas cahier des charges pour la consultation des prestataires en charge de l'exécution des travaux.



www.groupefondasol.com

VOTRE AGENCE

Agence de Nantes

12 rue Léon Gaumont – ZA de la Pentecôte

44700 – ORVAULT

☎ 02.51.77.86.50

✉ environnement.nantes@fondasol.fr