

DÉCHARGE DE LA PILA
EVALUATION DES VARIANTES
D'ASSAINISSEMENT

VERSION 2

Fribourg, le 31.05.2018
FR2706.918.600

CSD INGENIEURS SA

Route Jo-Siffert 4 - Givisiez

Case postale 384

CH-1701 Fribourg

t +41 26 460 74 74

f +41 26 460 74 79

e fribourg@csd.ch

www.csd.ch

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	11
1.1 Historique et contexte général	11
1.2 Objectif et cadre légal de l'analyse de variantes	11
1.3 Démarche	11
2. DONNÉES DE BASE	12
2.1 Contexte géologique et hydrogéologique	12
2.1.1 Cadre géologique	12
2.1.1.1 Description générale	12
2.1.2 Caractéristiques du site	13
2.2 Hydrogéologie	14
2.2.1 Description générale	14
2.2.2 Interventions sur l'hydrogéologie du site	15
2.2.3 Caractéristiques hydrauliques de la Sarine	15
2.2.4 Relation nappe – Sarine	17
2.3 Potentiel de mobilisation et flux de polluants	17
2.3.1 Polluants déterminants	17
2.3.2 Volumes de matériaux par classe selon le contenu en PCB et distribution sur le site	18
2.3.2.1 Volumes et type de matériaux	18
2.3.2.2 Stock de PCB	19
2.3.2.3 Distribution des PCB sur le site de la Pila	19
2.3.2.4 Zone haute	20
2.3.2.5 Zone basse	21
2.3.2.6 Comparaison entre zone haute et zone basse	22
2.3.2.7 Distribution des PCB en profondeur	22
2.3.3 Flux de polluants en provenance de la décharge	24
2.3.3.1 Flux de PCB par érosion des talus de la décharge	24
2.3.3.2 Flux de PCB à partir de glissements de terrain	25
2.3.3.3 Flux de polluants à partir des eaux souterraines	26
2.3.4 Synthèse des flux de polluants en provenance de la décharge	27
2.3.5 Contraintes spécifiques liées au site	29
2.4 Objectifs d'assainissement	29
2.4.1 Objectifs d'assainissement formulés par les autorités	30
2.4.2 Exigences supplémentaires formulées par les autorités	31
2.4.3 Objectifs résultant des études complémentaires	31
3. MESURES D'ASSAINISSEMENT POSSIBLES (ÉTAPE 1)	34

3.1	Principes	34
3.2	Conditions d'applicabilité	34
4.	PROCÉDÉS D'ASSAINISSEMENT TECHNIQUEMENT RÉALISABLES (ÉTAPE 2)	37
4.1	Conditions et contraintes liées au site	37
4.1.1	Facteurs déterminants pour le site de la Pila	37
4.1.2	Contraintes spécifiques liées au site	37
4.1.3	Conséquences sur le choix de procédés techniquement réalisables	38
4.2	Procédés techniquement réalisables	38
4.2.1	Procédés hors / sur site	38
4.2.2	Procédés in situ	38
4.2.3	Évaluation détaillée des procédés	39
4.3	Prétraitement nécessaire des matériaux	44
4.3.1	Possibilités et contraintes d'un prétraitement sur site	46
4.3.2	Type de matériaux, catégories selon OLED	48
4.3.3	Filières d'acheminement envisageables	49
4.3.3.1	Stockage définitif en décharge contrôlée	49
4.3.3.2	Traitement thermique	50
4.3.3.3	Lavage physico-chimique	52
5.	IDENTIFICATION DES VARIANTES D'ASSAINISSEMENT	53
5.1	Secteurs du site contaminé nécessitant un assainissement selon le potentiel de pollution	53
5.1.1	Flux de PCB depuis la décharge sans assainissement	53
5.1.2	Zones d'apport de déchets dans le cours d'eau	54
5.1.3	Dépassements de 10 x les valeurs de concentrations admises dans les eaux souterraines selon Annexe 1 OSites	54
5.2	Conclusions des études complémentaires	56
5.3	Identification des variantes techniquement réalisables	57
5.4	Description des variantes techniquement réalisables	61
5.4.1	Situation actuelle du site	61
5.4.2	Variante 1 : assainissement total du site	61
5.4.2.1	Description des mesures d'assainissement	61
5.4.2.2	Mesures de remise en état / remise en culture / végétalisation	64
5.4.2.3	Suivi et surveillance post-assainissement	64
5.4.2.4	Volumes de déchets et masses de PCB éliminés	64
5.4.2.5	Flux résiduel	65
5.4.2.6	Effet sur la qualité des eaux de la Sarine	66
5.4.2.7	Estimations des coûts	66
5.4.3	Variante 2: assainissement partiel du site contaminé	67
5.4.3.1	Description des mesures d'assainissement	67

5.4.3.2	Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation	68
5.4.3.3	Suivi et surveillance post-assainissement	69
5.4.3.4	Volumes de déchets et masses de PCB éliminés	70
5.4.3.5	Flux résiduel	71
5.4.3.6	Effet sur la qualité des eaux de la Sarine	75
5.4.3.7	Objectifs d'assainissement atteints / non atteints	75
5.4.3.8	Estimation des coûts	76
5.4.4	Variante 3 : assainissement partiel de la zone haute	76
5.4.4.1	Description des mesures d'assainissement	76
5.4.4.2	Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation	78
5.4.4.3	Suivi et surveillance post-assainissement	78
5.4.4.4	Volumes de déchets et masses de PCB éliminés	78
5.4.4.5	Flux résiduel	80
5.4.4.6	Effet sur la qualité des eaux de la Sarine	81
5.4.4.7	Objectifs d'assainissement atteints / non atteints	81
5.4.4.8	Estimation des coûts	82
5.4.5	Variante 4 : assainissement partiel de la zone haute	83
5.4.5.1	Description des mesures d'assainissement	83
5.4.5.2	Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation	83
5.4.5.3	Suivi et surveillance post-assainissement	84
5.4.5.4	Volume à assainir et masse PCB	85
5.4.5.5	Flux résiduel	87
5.4.5.6	Objectifs d'assainissement atteints / non atteints	88
5.4.5.7	Effet sur la qualité des eaux de la Sarine	88
5.4.5.8	Estimation des coûts	89
5.5	Comparaison des variantes : volumes et masses de PCB extraits	89
6.	ÉVALUATION DES VARIANTES TECHNIQUEMENT RÉALISABLES (ÉTAPE 4)	90
6.1	Critères déterminants	90
6.2	Évaluation de la faisabilité	90
6.3	Évaluation de l'efficacité	91
6.4	Évaluation du respect de l'environnement et de l'apport écologique	92
6.5	Évaluation des coûts	93
6.5.1	Précision du calcul des coûts en fonction de la phase du projet	93
6.5.2	Incertitudes des coûts du poste « transport et élimination des matériaux (traitement, valorisation) »	94
6.5.3	Estimation du coût des différentes variantes en tenant compte des incertitudes	96
6.6	Comparaison des variantes en termes de coût/ efficacité	99
7.	SYNTHÈSE – CHOIX DE LA VARIANTE OPTIMALE	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Volume de la décharge et des couches inférieures – matériaux en place	13
Tableau 2.2	Volumes et masses PCB par classe de PCB. À titre de comparaison masse PCB selon l'investigation de détail 2009 [15]	19
Tableau 2-3	Volumes et masses de PCB présents dans la zone haute de la décharge	21
Tableau 2-4	Volumes et masses PCB présents dans la zone basse de la décharge	21
Tableau 2-5	Répartition des volumes et des masses PCB entre la zone haute et la zone basse	22
Tableau 2-6	Flux annuels de matière et de PCB par érosion (état 0 sans palplanches)	25
Tableau 2-7	Flux sortant de PCB. Comparaison entre une « semaine normale » et une « semaine de turbinage continu ».	27
Tableau 4-1	Identification de procédés d'assainissement. X : faisable et efficace / (x) : moyennement faisable et efficace / - : non applicable	42
Tableau 4-2	Volumes des matériaux en fonction des classes de contamination < 10 ppm PCB et > 10 ppm PCB.	47
Tableau 4-3	Catégories des matériaux sur le site / zone haute classés selon leur teneurs en PCB. * pour des installations disposant d'une autorisation selon Annexe 4 point 1.2 OLED	48
Tableau 5-1	Variante d'assainissement techniquement réalisables	60
Tableau 5-2	Variante 1 : Volumes / masses excavés en fonction des classes de concentration PCB (géostatistique 2009 et 2010).	65
Tableau 5.3	Variante 1 : Volumes de déchets et masses de PCB présents dans la décharge. En jaune : masses des catégories PCB retenues pour l'estimation des coûts de transport et d'élimination (cf. chap. 5.4.2.7)	65
Tableau 5.4	Estimation des coûts pour la variante 1	66
Tableau 5.5	Variante 2 : Synthèse des volumes et masses PCB éliminés et laissés en place.	70
Tableau 5.6	Variante 2 : Volume de déchets et d'alluvions présents dans la zone haute en fonction des classes de concentration en PCB (géostatistique 2009 et 2010).	71
Tableau 5.7	Variante 2 : Volume total de déchets et d'alluvions excavés pour la variante 2 et masses correspondantes par catégories	71
Tableau 5.8	Flux PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine pour l'état 0 (rapport [6], figure 6-3). Les concentrations sont les moyennes / maximales analysées dans la période 2012-2016 .	72
Tableau 5.9	Flux de PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine (calcul avec concentrations maximales indiqué dans le Tableau 5.8), avant et après assainissement (excavation).	73
Tableau 5.10	Flux hydraulique et PCB dissous en cas de crue extrême Q1'000. Crue septembre 2016 : les concentrations retenues sont les concentrations maximales analysées lors de la crue de septembre 2016	74

Tableau 5.11	Flux résiduel avant et après assainissement, pour la situation normale (état 0), la crue septembre 2016 et pour une crue extrême Q1'000	75
Tableau 5.12	Estimation des coûts de la variante 2	76
Tableau 5.13	Variante 3 : Synthèse des volumes et masses de PCB éliminés et laissés en place.	79
Tableau 5.14	Variante 3 : Volume et masse de déchets et d'alluvions présents dans la zone à excaver en fonction des classes de concentration en PCB (géostatistique 2009 et 2010).	79
Tableau 5.15	Flux PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine (calculé pour une situation avec concentrations maximales dans les eaux souterraines selon tableau précédent), avant et après assainissement (excavation).	80
Tableau 5.16	Flux résiduel avant et après assainissement (calculé pour une situation avec concentrations maximales dans les eaux souterraines selon tableau précédent), pour la situation normale (état 0), la crue de septembre 2016 et pour une crue extrême Q1'000	81
Tableau 5.17	Estimation des coûts de la variante 3.	82
Tableau 5.18	Variante 4 : Synthèse des volumes et des masses de PCB éliminés et laissés sur place.	86
Tableau 5.19	Variante 4 : Volumes et masses de déchets et d'alluvions excavés en fonction des classes de concentration PCB (géostatistique 2009 et 2010).	86
Tableau 5.20	Flux hydraulique et PCB dissous pour l'état 2016 et état 0 (avant réalisation des mesures urgentes d'assainissement)	87
Tableau 5.21	Estimation des coûts de la variante 3.	89
Tableau 5.22	Comparaison des volumes moyens de déchets et matériaux et des masses de PCB extraites pour les 4 variantes (chiffres arrondis)	89
Tableau 6-1	Notation des variantes pour les critères de faisabilité	91
Tableau 6-2	Notation des variantes pour les critères d'efficacité	91
Tableau 6-3	Notation des variantes pour les du respect de l'environnement et de l'apport écologique	92
Tableau 6.4	Synthèse de l'estimation des coûts des 4 variantes	93
Tableau 6.5:	Incertitudes sur les coûts des 4 variantes pour la position « transport et élimination des matériaux (traitement, valorisation) »	96
Tableau 6.6:	Évaluation de l'incertitude totale sur les coûts des 4 variantes d'assainissement de la décharge de la Pila	97
Tableau 6.7:	Notation des variantes d'assainissement sans pondération	99
Tableau 6.8:	Notation des variantes d'assainissement avec pondération	100
Tableau 6.9:	Calcul du ratio coût/ efficacité pour les variantes d'assainissement	100
Tableau 6.10:	Points bruts obtenus par les variantes pour les différents critères et pour le coût calculé selon la méthode au carré	101
Tableau 6.11:	Points ramenés à 5 pour tous les critères	101
Tableau 6.12:	Points pondérés	101

Tableau 7-1	Synthèse des effets et caractéristiques des différentes variantes ¹⁾ risque de dépassements ponctuels de 10 x valeurs de concentrations en PCB dans les eaux souterraines en cas de crue exceptionnelle)	102
-------------	---	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1	Profil géologique schématique.	12
Figure 2-2	Coupe hydrogéologique illustrant le fonctionnement du système	14
Figure 2-3	Photo aérienne présentant la situation de la décharge par rapport à la centrale de Hauterive ; photo extraite de Google	15
Figure 2-4	Variation du niveau de la Sarine à l'aval de la centrale, situation « normale », antérieure à 2016.	16
Figure 2-5	Variation du niveau de la Sarine à l'aval de la centrale. Janvier à juin 2016	16
Figure 2.6	Situation des deux secteurs de la décharge	20
Figure 2-7	Répartition probable des concentrations en PCB entre 569 et 573 m.s.m.	23
Figure 2-8	Répartition spatiale des classes de contamination par les PCB dans les déchets situés directement sur les alluvions [15].	24
Figure 2-9	Coupe schématique d'un glissement de terrain	26
Figure 2-10	Modèle n° 3 : évolution stock PCB dans la couche sédimentaire de 0-15 cm avec un apport annuel aléatoire en PCB identique au modèle n° 2 mais avec une perte du stock PCB dans les sédiments « enfouis en profondeur » en fonction des crues de temps de retour observés sur la Sarine entre 1968 et 2017. Tiré de [6].	26
Figure 2-11	Hiérarchisation des flux par zone de la décharge (Etat 0 correspond à l'Etat actuel)	28
Figure 3-1	Conditions d'applicabilité d'une mesure	35
Figure 3-2	Conditions auxquelles une mesure est applicable	35
Figure 4-1	Tableau figurant dans l'OFEV, 2016 [2]	39
Figure 4-2	Procédé général de traitement sur le site BAZO à Oberglatt	45
Figure 5-1	Contribution des zones haute et basse de la décharge aux flux de PCB sous forme dissoute et solide. La taille des flèches / texte reflète l'importance du flux	53
Figure 5-2	Sondages présentant des dépassements de 10 x la valeur de concentration pour le PCB et l'ammonium selon Annexe 1 OSites.	55
Figure 5-3	Plan de situation des secteurs à assainir selon scénario C (cf Rapport mesures complémentaires)	62
Figure 5-4	Lixiviat virtuel : détermination du Lixiviat virtuel de 1 µg/l	63
Figure 5.5	Extrait de l'investigation de détail [15] . Couche des alluvions de 565 – 567 m.s.m.	63
Figure 5.6	Zone du « hot-spot » et zone d'appel du puits PP1 (situation piézométrique du 22.-24.08.16).	78
Figure 6.1 :	Précision du calcul des coûts selon la phase du projet (CRB, Centre Suisse d'études pour la rationalisation de la construction)	94
Figure 6.2:	Incertitude sur le coût total de chaque variante et part du coût	98

ANNEXES

Annexe A	Procès-verbal de la séance du 30 mars 2017 et lettre du SEn du 23.04.2018	106
Annexe B	Liste des procédés hors site, sur site et in situ	107
Annexe C	Synthèse des 3 scénarios de suppression de flux PCB sous forme solide et dissoute. Extrait de [6]	108
Annexe D	Plan de situation et profils de l'état actuel	117
Annexe E	Variante 2: plans de situation, Profils	119
Annexe F	Variante 3 : Plan de situation, profils état futur, situation 2D, vue 3D	120
Annexe G	Variante 4 : Plan de situation, profils état futur, situation 2D, vue 3D, schéma de la paroi	121
Annexe H	Détail de l'évaluation des coûts d'assainissement pour les variantes 1 à 4	122
Annexe I	Critères retenus pour l'évaluation des variantes	123
Annexe J	Cas de crue exceptionnelle (HQ1'000)	124

PRÉAMBULE

CSD confirme par la présente avoir exécuté son mandat avec la diligence requise. Les résultats et conclusions sont basés sur l'état actuel des connaissances tel qu'exposé dans le rapport et ont été obtenus conformément aux règles reconnues de la branche.

CSD se fonde sur les prémisses que :

- le mandant ou les tiers désignés par lui ont fourni des informations et des documents exacts et complets en vue de l'exécution du mandat,
- les résultats de son travail ne seront pas utilisés de manière partielle,
- sans avoir été réexaminés, les résultats de son travail ne seront pas utilisés pour un but autre que celui convenu ou pour un autre objet ni transposés à des circonstances modifiées.

Dans la mesure où ces conditions ne seraient pas remplies, CSD déclinera toute responsabilité envers le mandant pour les dommages qui pourraient en résulter.

Si un tiers utilise les résultats du travail ou s'il fonde des décisions sur ceux-ci, CSD décline toute responsabilité pour les dommages directs et indirects qui pourraient en résulter.

1. Introduction

1.1 Historique et contexte général

Le présent rapport s'inscrit dans la suite des démarches en relation avec le projet d'assainissement de l'ancienne décharge de la Pila. Il complète les résultats des études réalisées dans le cadre des mesures complémentaires et présente puis évalue les variantes d'assainissement permettant d'atteindre les objectifs d'assainissement fixés par les autorités et basés sur le cadre légal et réglementaire en vigueur.

Dans sa détermination du 8 juillet 2016, le Service de l'environnement du canton de Fribourg a demandé de revoir la démarche d'évaluation des variantes d'assainissement sur la base du module de l'aide à l'exécution de l'OFEV. Évaluation des variantes d'assainissement, un module de l'aide à l'exécution « Assainissement des sites contaminés » daté du 19 février 2014.

Le présent rapport suit donc la trame proposée par cette publication.

1.2 Objectif et cadre légal de l'analyse de variantes

L'analyse de variantes a pour objectif d'identifier et décrire la variante d'assainissement optimale, c'est-à-dire celle qui permet d'atteindre les objectifs d'assainissement avec le meilleur rapport coût/ efficacité.

Conformément à l'art. 4 OSites, les mesures prises pour assainir un site contaminé doivent correspondre à l'état de la technique : ce terme désigne les procédés technologiques qui ont fait leurs preuves dans la pratique (ou lors de tests) et qui peuvent dans les faits être appliqués à d'autres sites.

Par ailleurs, l'art 32^e, al. 4 LPE prévoit que la Confédération ne verse d'indemnités que pour les mesures qui respectent l'environnement¹, sont économiques² et respectent l'état de la technique.

1.3 Démarche

La démarche d'évaluation des variantes d'assainissement pour le site de la Pila suit la procédure par étapes proposée par l'OFEV, à savoir :

- Étape 1 : parmi les mesures d'assainissement possibles, identifier dans les grandes lignes celles qui sont adaptées au site concerné.
- Étape 2 : identifier les procédés d'assainissement qui sont réalisables sur le plan technique.
- Étape 3 : élaborer des variantes en combinant les procédés réalisables sur le plan technique.
- Étape 4 : évaluer les variantes réalisables sur le plan technique selon les critères suivants : applicabilité, efficacité, respect de l'environnement, apport écologique, coûts et choisir la variante optimale.

¹ Une mesure est réputée respectueuse de l'environnement lorsqu'elle est conforme à toutes les dispositions légales relatives à la protection de l'environnement.

² Une mesure d'assainissement est jugée économique s'il s'agit de la mesure la plus pertinente et la moins onéreuse parmi les mesures requises possibles.

2. Données de base

2.1 Contexte géologique et hydrogéologique

2.1.1 Cadre géologique

2.1.1.1 Description générale

La décharge de la Pila est située dans un méandre de la Sarine et posée dans une auge morphologique creusée dans la molasse par la rivière. Le remblai formé par les déchets repose directement (ou par endroits au-dessus d'un paléosol) sur les alluvions graveleuses récentes déposées par le cours d'eau. La partie sommitale de la décharge est adossée, sur son versant Sud-Ouest, à la falaise de molasse formant l'encaissant rocheux et aux graviers appartenant à la formation dite de « la Tuffière ».

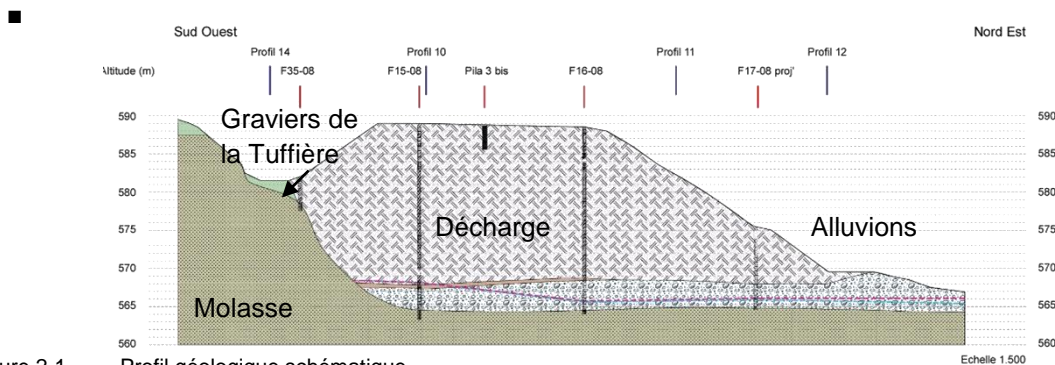


Figure 2-1 Profil géologique schématique.

L'agencement général des formations géologiques de la zone de la Pila peut être présenté de la manière suivante (des terrains les plus anciens aux plus récents) :

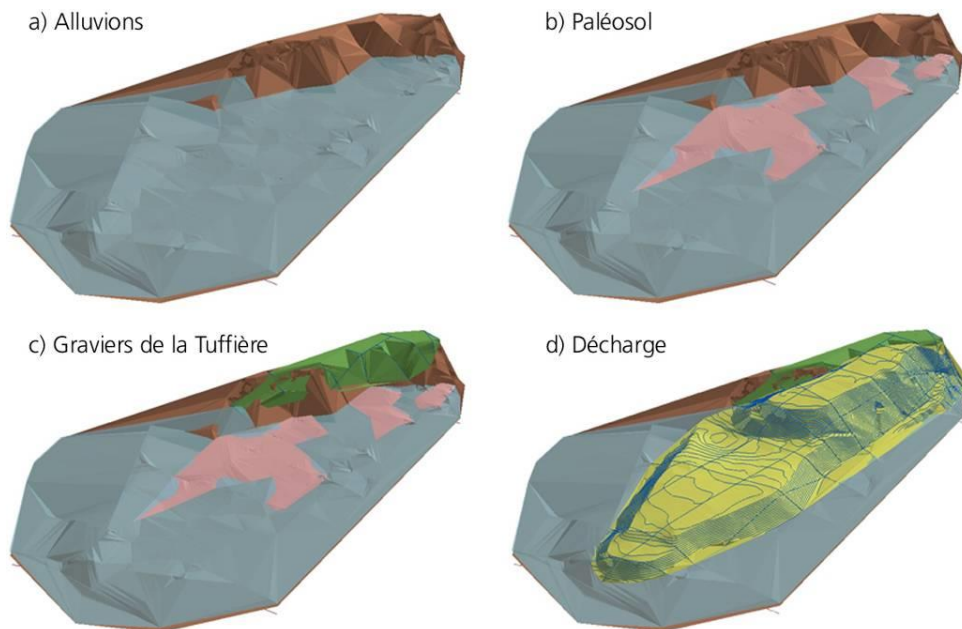
- La molasse burdigalienne tertiaire constitue le soubassement rocheux. Elle plonge de quelques degrés vers l'Est.
- Les graviers fluvioglaciaires reposent sur la molasse dont le toit est situé, dans le secteur, entre 550 et 580 mètres d'altitude. Ces graviers ont été déposés sous forme de dépôts de progression au début de l'épisode glaciaire du Würm. Ils sont actuellement exploités dans la gravière de la Tuffière, ce qui a donné le nom local de "Graviers de la Tuffière" à cette formation.
- Durant la glaciation du Würm, de la moraine informe s'est déposée sur tout le secteur, recouvrant les dépôts précédents. Elle est le produit du délavage de la moraine graveleuse par les eaux de fusion.
- A la fin de la glaciation, des dépôts fluvio-glaciaires et glacio-lacustres se sont déposés à l'arrière de la Pila et sur le site de Châtillon. Ces graviers ont été exploités par les différentes gravières de Châtillon.
- L'érosion récente a modelé les terrains en entaillant la vallée dans le fond de laquelle la Sarine a creusé son cours. Celle-ci a déposé des alluvions sur les berges de son lit molassique.

2.1.2 Caractéristiques du site

Comme le montre le profil géologique de la figure 2-1, la décharge s'appuie vers le SO en partie sur une falaise molassique prolongée vers l'Est par les Graviers de la Tuffière puis par une arête molassique qui court d'Est en Ouest sur toute la marge Sud de la décharge. La nappe située sous la décharge, dans les alluvions, est limitée vers le sud par cette arête du substratum molassique qui l'isole de la Sarine en amont de l'usine électrique d'Hauterive.

Un modèle 3D du site, composé de la décharge, des alluvions, des graviers et du paléosol a été élaboré. Les volumes, présentés dans le

tableau 2-1 ci-dessous ont été évalués sur la base des données topographiques et géologiques collectées dans le cadre de l'investigation de détail. Les volumes des alluvions et graviers pris en compte dans le calcul sont uniquement ceux situés dans l'emprise de la décharge. Le paléosol ne constitue pas un fond continu, il est représenté là où il a été reconnu par forage. L'emprise maximale des déchets est de 22'000 m².



Type	Volume en place [m ³]
a) Alluvions	67'000
b) Paléosol	3'000
c) Gravieres	7'000
d) Volume décharge	195'000
Volume total	272'000

Tableau 2-1 Volume de la décharge et des couches inférieures – matériaux en place

2.2 Hydrogéologie

2.2.1 Description générale

Une nappe souterraine, située sous le corps de la décharge, s'écoule dans les alluvions sous-jacentes. Cet aquifère est alimenté et influencé par différents apports :

- **La Sarine:** le marnage de la Sarine, lié au turbinage opéré par l'usine hydroélectrique d'Hauterive, induit, par augmentation de la pression, une élévation du niveau de l'eau contenue dans la décharge.
- **Les apports depuis les graviers:** les précipitations infiltrées dans les graviers qui se trouvent à l'amont de la décharge s'écoulent à l'interface avec la molasse et peuvent atteindre le corps de la décharge et les alluvions sous-jacentes. Cette alimentation par les graviers se matérialise à l'extrémité Nord-Ouest du site par la présence de tuf dominant une zone humide mais peut exister ailleurs dans le périmètre de la décharge, au contact des graviers et du corps de déchets.
- **Les eaux météoriques :** qui s'infiltrent dans le corps de la décharge.

La coupe hydrogéologique ci-dessous résume les principales caractéristiques du système :

Du fait de la différence de perméabilité entre les grès burdigaliens (10^{-6} m/s) et les alluvions récentes (10^{-3} m/s), le **substratum molassique** peut être considéré comme peu perméable et forme donc la **limite inférieure du système** (1). Le talus molassique présent au sud-ouest du site forme également la limite latérale du système ; il a également été montré que le prolongement de ce talus vers le sud-est forme une crête molassique qui empêche les communications permanentes entre l'amont du méandre et la nappe phréatique en dehors des périodes de crue.

La nappe phréatique est en **contact hydraulique avec la Sarine** (2) au niveau de la bordure nord- du site. De ce fait, les variations du niveau de cette dernière influencent directement les variations piézométriques de la nappe phréatique.

Les graviers fluvioglaciers de la Tuffière en amont du talus molassique sont le siège d'un **écoulement d'eau pelliculaire qui se déverse dans les alluvions récentes** (3) soit de manière directe ou alors via les déchets lorsque ceux-ci reposent directement sur la molasse.

En dernier lieu, une part des précipitations recharge la nappe phréatique (4).

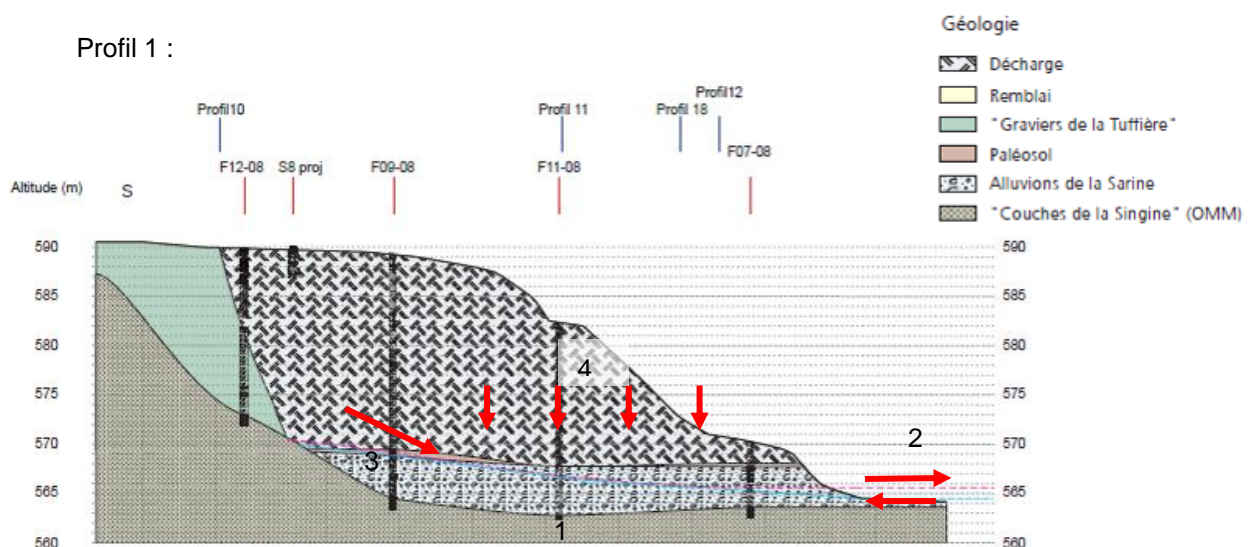


Figure 2-2 Coupe hydrogéologique illustrant le fonctionnement du système

2.2.2 Interventions sur l'hydrogéologie du site

Entre 2011 et 2013 les mesures préliminaires à l'assainissement ont modifié les écoulements souterrains du site de la Pila ; les travaux suivants ont été réalisés :

- Exécution d'un confinement périphérique partiel le long des berges à l'aide d'un rideau de palplanches d'une longueur totale de 190 mètres.
- Réalisation de 4 puits de pompage à l'intérieur du rideau de palplanches afin de maintenir la nappe à un niveau inférieur à celui de la Sarine de sorte que le gradient hydraulique soit orienté vers la décharge et empêche ainsi l'exportation de polluants, ceci en appui au confinement physique périphérique.
- Quatre drains subhorizontaux de 20 à 50 mètres de long sont en service pour l'interception du flux amont. Les eaux captées sont récoltées dans une chambre de contrôle et rejetées dans la Sarine.

2.2.3 Caractéristiques hydrauliques de la Sarine

Les caractéristiques hydrauliques de la Sarine au droit de la décharge sont fortement liées aux conditions d'exploitation des ouvrages hydroélectriques de Groupe E (centrale d'Hauterive, barrage de Rossens).

La décharge se trouve dans un méandre de la Sarine comme le montre la Figure 2-3 ci-après. La centrale hydroélectrique de Hauterive se trouve à la pointe de ce méandre et influe sur les variations du niveau de la rivière. En effet, les niveaux à l'aval de la centrale subissent des variations liées à la production électrique.

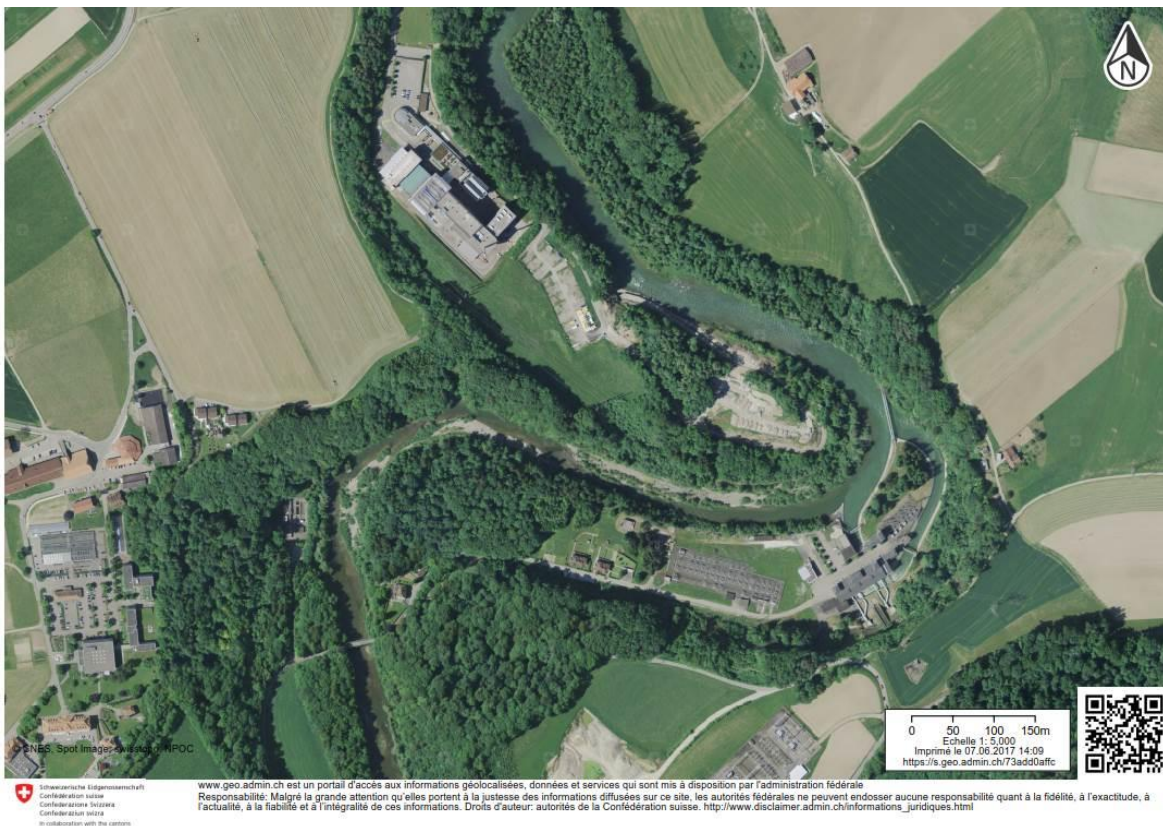


Figure 2-3 Photo aérienne présentant la situation de la décharge par rapport à la centrale de Hauterive ; photo extraite de Google

Le niveau de la Sarine est influencé par le turbinage de la centrale d'Hauterive, où le niveau de la rivière est d'environ 1.20 m supérieur en hautes eaux qu'en basses eaux.

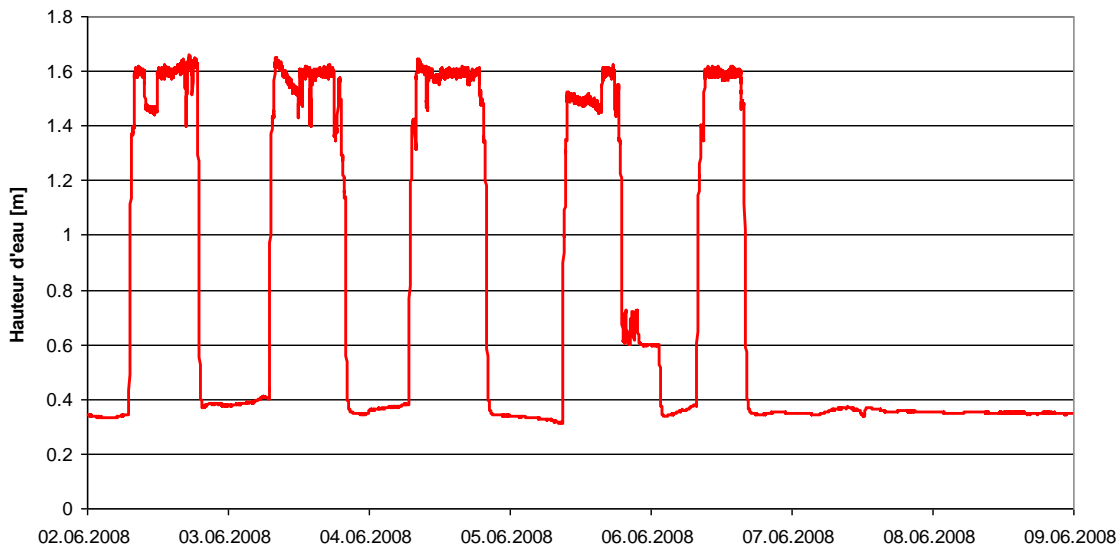


Figure 2-4 Variation du niveau de la Sarine à l'aval de la centrale, situation « normale », antérieure à 2016.

Jusqu'en 2015, l'usine produisait de l'électricité lorsque la consommation était élevée (journées et soirées) et n'en produisait pas ou peu le reste du temps (nuits et week-ends, Figure 2-4). Depuis 2016, à la faveur des exigences du marché, Groupe E turbine à l'usine électrique d'Hauterive de manière plus irrégulière qu'auparavant et la production d'électricité tend à être nettement plus élevée, avec des situations de basses eaux nettement moins fréquentes (Figure 2-5).

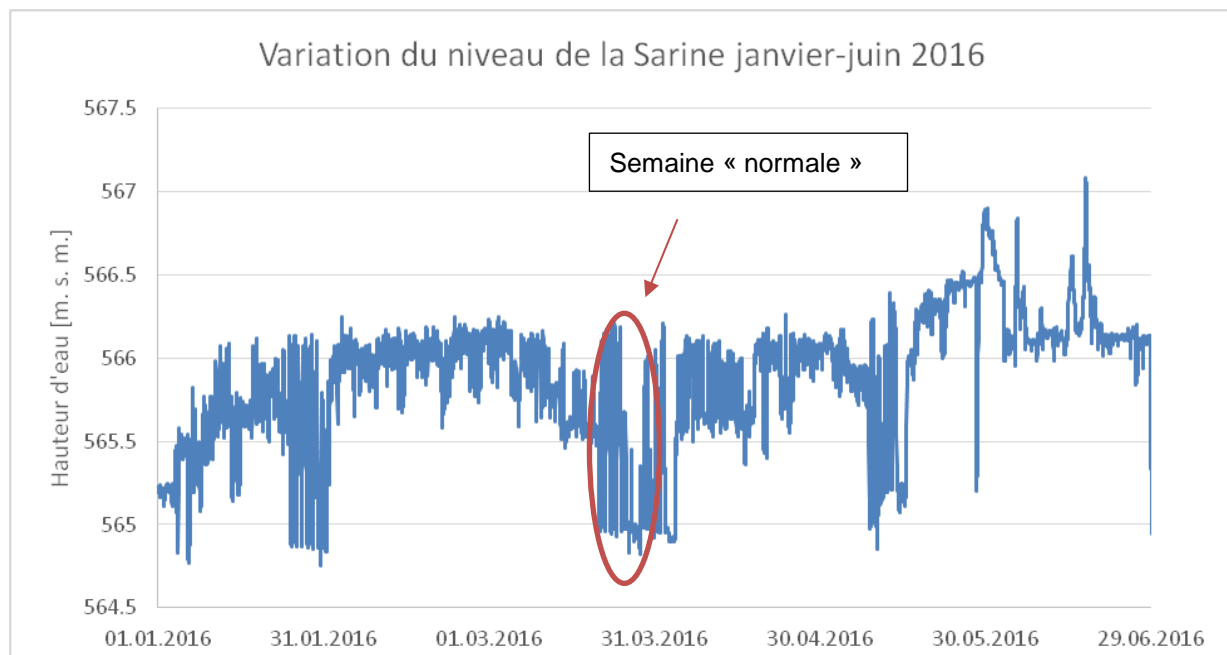


Figure 2-5 Variation du niveau de la Sarine à l'aval de la centrale. Janvier à juin 2016

Le niveau à l'amont de la centrale peut être supposé, sauf événement exceptionnel, quasi constant et ne subir que des variations saisonnières (débits de dotation de 2.5-3.5 m³/s en respectivement hiver et été, imposés au barrage de Rossens).

Crues

Des crues exceptionnelles peuvent se produire sur le tronçon de rivière qui jouxte la décharge. Les derniers événements de ce type ont eu lieu le 23 août 2005 et le 9 août 2007.

Lors de la crue de 2005, le débit au barrage de Rossens a atteint une valeur de 650 m³/s, soit un temps de retour d'environ 100 ans. L'usine hydroélectrique d'Hauterive a été noyée et a dû être arrêtée. Selon les informations transmises par Groupe e, le niveau de l'eau dans l'usine, soit à l'amont de la Pila, est monté jusqu'à 570.1 m.s.m.

Lors de la crue de 2007, le débit de la Sarine au droit de la Pila est monté jusqu'à 430 m³/s, soit un temps de retour d'environ 40 ans. Ce débit comprend le débit de turbinage maximal de l'usine hydroélectrique d'Hauterive (85 m³/s) qui était en fonction.

Dans le cadre de vérifications de la sécurité aux crues du barrage de Rossens, le bureau Hydrique a établi un scénario de crue avec un temps de retour de 1000 ans. La crue HQ₁₀₀₀ retenue dans le cadre de cette étude s'étend sur une durée de 36 heures et atteint un débit de pointe de 1050 m³/s. L'Annexe J présente le détail de l'évaluation du cas de la crue exceptionnelle.

2.2.4 Relation nappe – Sarine

Des échanges entre l'aquifère situé sous le corps de la décharge et la Sarine ont lieu en fonction des variations de niveau de la rivière.

Le scénario de turbinage influence les échanges d'eau entre la décharge et la Sarine et, par conséquent, les flux de polluants qui parviennent dans la rivière.

2.3 Potentiel de mobilisation et flux de polluants

2.3.1 Polluants déterminants

Les polluants principaux présents sur le site de la Pila et à l'origine du besoin d'assainissement sont les PCB et, dans une moindre mesure, l'ammonium.

Les analyses réalisées dans le cadre des études précédentes montrent que les métaux ne représentent pas un problème aigu dans la décharge. Ces constatations sont corroborées par les analyses des eaux souterraines, qui n'ont pas mis en évidence de teneurs particulièrement élevées en métaux.

Les autres substances retrouvées dans les lixiviats sont, les hydrocarbures C₁₀-C₄₀, les nitrites puis, dans une moindre mesure le carbone organique dissous (COD), les composés organo-halogénés extractibles (EOX³) et le chrome VI. Aucune anomalie importante n'a cependant été détectée et les autres polluants ne semblent pas constituer une menace immédiate.

³ Le paramètre global EOX représente les composés organiques lipophiles, peu volatiles, et inclut les PCB. La comparaison des teneurs en PCB et en EOX dans les lixiviats OTD ne permet toutefois pas d'établir une corrélation utilisable.

2.3.2 Volumes de matériaux par classe selon le contenu en PCB et distribution sur le site

2.3.2.1 Volumes et type de matériaux

Les volumes de matériaux ainsi que la cartographie 3D de la répartition spatiale, associés à des classes de contamination par les PCB, ont été déterminés par modélisation géostatistique en 2009 par le bureau KIDOVA [14]. Les résultats sont décrits dans les rapports [14], [12] et [10]. Cette étude géostatistique se base sur les résultats d'analyses des échantillons prélevés dans le corps de la décharge et dans les alluvions sous-jacents, effectuées lors des investigations techniques et de détail. Les volumes de matériaux déterminés dans le modèle géostatistique ont tenu compte de l'ensemble des données de PCB de tous les groupes de matériaux : déchets, alluvions et graviers interglaciaires. La modélisation géostatistique a fourni une classification des matériaux fondée uniquement sur les PCB, sans tenir compte d'autres paramètres comme les métaux lourds ou l'ammonium.

Les résultats montrent, pour l'ensemble du site, un phénomène de contamination très hétérogène sur le plan horizontal. Les cartes de la répartition spatiale de la contamination des matériaux se caractérisent par une grande incertitude. Ceci « tient d'une part à la variabilité horizontale de la contamination, d'autre part au grand nombre de classes de teneurs appliqué ».

Les mesures préliminaires à l'assainissement (réalisées entre 2012-2014) ainsi que les analyses de matériaux prélevés dans la zone en glissement évacuée dans le cadre des mesures urgentes (rapport d'étude complémentaire, 2017 [6]) ont permis d'affiner les connaissances sur la nature des déchets déposés et sur la répartition spatiale des PCB. Les éléments suivants ont pu être confirmés ou mis en évidence :

- Hétérogénéité importante à très importante des déchets déposés.
- Présence importante de condensateurs et de déchets de condensateurs dans la partie nord de la zone haute, en surface et en profondeur.

Ces observations soulignent la grande incertitude sur la classification des matériaux en termes de détermination de la teneur totale en PCB (présence de porteur de PCB à très hautes concentrations) et de la représentativité de l'analyse. Comme déjà mentionné dans le rapport de l'investigation de détail, cette incertitude est autant plus importante du fait qu'« à l'incertitude du laboratoire s'ajoute une variabilité liée à l'échantillonnage ». Les résultats du modèle géostatistique reflètent ces incertitudes et ces constats.

Pour l'évaluation des variantes d'assainissement, les volumes et masses de PCB estimés dans les études géostatistiques de 2009 (pour le site entier) et de 2010 (pour la zone haute et la zone basse) ont été repris sans modification. Les volumes et masses de matériaux présents dans la décharge sont présentés dans le tableau ci-dessous en fonction des 6 classes de teneurs en PCB qui correspondent aux valeurs limites des différentes filières d'élimination. Les erreurs relatives sur la moyenne des catégories sont particulièrement importantes pour les volumes des catégories 5 et 6 pour lesquelles elles sont estimées à respectivement 23 % et 54%.

Pour tenir compte de la grande incertitude liée à la classification par intervalles, l'erreur sur la moyenne a été considérée pour évaluer la répartition des volumes pour les classes supérieures à 10 ppm. En admettant un volume total des déchets invariable, les volumes des classes supérieures à 10 ppm ont été « maximisés » en ajoutant l'erreur sur la moyenne. La somme des erreurs (positives) a ensuite été déduite de chaque classe < 10 ppm PCB proportionnellement à l'erreur sur la moyenne respective. Le total des volumes des 3 classes > 10 ppm augmente ainsi de 12'450 m³ ce qui correspond à 14% du volume total des trois classes concernées.

2.3.2.2 Stock de PCB

L'investigation de détail [15] estimait qu'environ 20 t de PCB est présent sur le site (cf. tableau ci-dessus). Le calcul de la masse totale de PCB présent sur le site s'est basée, dans la cadre de cette première étude, sur toutes les analyses, représentant chacune un élément de volume correspondant à une épaisseur de 2 m. L'étude géostatistique a permis de compléter ces informations en introduisant des données relatives à l'incertitude de la répartition des différentes classes de matériaux.

Le rapport des mesures complémentaires [6] (chapitre 5.2) calcule la masse PCB par classe avec les concentrations moyennes par classe. En comparant ces 2 façons de calculer la masse PCB, on constate que les masses diffèrent principalement pour la classe 50-1'000 ppm PCB : en effet il s'agit de la classe la plus susceptible de présenter une variabilité très importante des concentrations en PCB en raison de la présence de déchets de condensateurs.

Au total, un volume de 280'000 m³ de déchets et d'alluvions contaminés par les PCB et contenant une masse moyenne de 31 t de PCB est présent sur le site.

		Volume avec erreur max. sur classes PCB > 10 ppm				Masse PCB: multiplication du volume avec teneur moyenne de la catégorie. Densité: 1.8		
Catégorie	PCB [mg/kg ms]	Volume Geostat. 2009		Erreur sur la moyenne		Concentration moyenne des catégories [mg/kg]	Masse PCB [kg]	Masse PCB ID, 2009 [kg]
		[m3]		[m3]				
1	$x < 0.1$	50'300	17%	-6'413	43'887	0.05	5	4
2	$0.1 < x < 1$	60'900	9%	-3'395	57'505	0.55	60	59
3	$1 < x < 10$	93'500	7%	-2'641	90'859	5.50	930	612
4	$10 < x < 50$	48'500	11%	5'335	53'835	30.00	2'620	1'722
5	$50 < x < 1000$	20'600	23%	4'738	25'338	525.00	19'470	9'607
6	$1000 < x$	4'400	54%	2'376	6'776	1000.00	7'920	7'553
total		278'200			278'200		31'005	19'557

Tableau 2.2 Volumes et masses PCB par classe de PCB. À titre de comparaison masse PCB selon l'investigation de détail 2009 [15]

2.3.2.3 Distribution des PCB sur le site de la Pila

L'ancienne décharge de la Pila comporte deux secteurs qui se distinguent par leur topographie : la « zone haute » et la « zone basse », de part et d'autre du profil 5 (voir figure 2-6 ci-dessous). Ces deux zones se différencient par :

- leur hydrogéologie ; le flux amont n'a pas d'influence sur la zone basse et la différence hebdomadaire entre le flux entrant et sortant vers la Sarine est uniquement lié à l'infiltration des précipitations.
- le flux de polluants exportés vers la Sarine ; selon les résultats des dernières études, plus de 90 % des PCB sont exportés depuis la zone haute de la décharge.
- la proximité directe avec la Sarine pour la zone haute et un éloignement de la zone basse du lit mouillé de la rivière,
- le degré de pollution des déchets et des alluvions sous-jacentes. La part de volume classé dans les catégories 1-2-3 (des plus faibles teneurs en PCB) est un peu plus grande dans la zone basse (elle est de 79 % en moyenne au lieu de 69 % dans la zone haute et 74 % dans toute la décharge), et la part du volume classé dans les catégories 4-5-6 (des plus fortes teneurs en

PCB) y est en conséquence plus petite (21 % en moyenne au lieu de 31 % dans la zone haute et 26 % en moyenne dans toute la décharge).

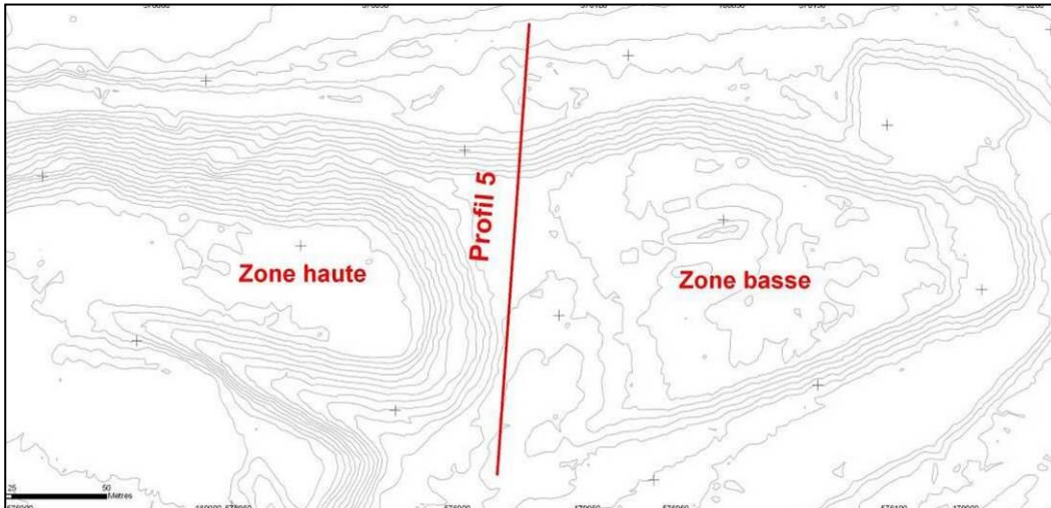


Figure 2.6 Situation des deux secteurs de la décharge

2.3.2.4 Zone haute

La zone haute de la décharge, actuellement confinée par la réalisation des mesures préliminaires à l'assainissement, se caractérise par son contact direct avec la Sarine. Ce secteur contribuait, avant la réalisation des mesures préliminaires à l'assainissement, de façon prépondérante à l'exportation de PCB vers la rivière, que ce soit de manière diffuse via les eaux souterraines, de manière concentrée via les exfiltrations ou par l'érosion des berges ou de la décharge. Avant le confinement les flux de polluants exportés depuis cette zone présentaient des teneurs moyennes dépassant dix fois la valeur OSites avec une fréquence quotidienne. Les flux de PCB issus de ce secteur représentaient plus de 90% du flux total de polluants exportés dans la rivière depuis le site de la Pila. Outre l'exportation des polluants par les eaux souterraines, la topographie de la zone haute permettait l'exportation particulière liée à l'érosion de la décharge. Des événements épisodiques comme des glissements de terrain ont également entraîné des PCB directement dans la Sarine

L'épaisseur du corps de la décharge sur la zone haute peut atteindre un peu plus de 20 mètres et l'épaisseur des alluvions sous-jacentes un peu plus de 5 mètres.

Les volumes par classe PCB de la zone haute indiqués dans le tableau suivant ressortent de l'étude géostatistique de 2010 [13]. Comme pour le site entier (cf. chap. 2.3.2.1), l'erreur sur la moyenne a été reprise pour évaluer une répartition des volumes avec une prépondérance sur les classes supérieures à 10 ppm. La zone haute de la décharge, qui occupe la moitié de l'emprise de la décharge, représente 60% du volume total des déchets et des alluvions contaminés, contenant jusqu'à 70% de la masse totale de PCB.

Classe		Volume	Erreur max sur les volumes des classes PCB > 10 ppm			Masse PCB: multiplication du volume avec teneur moyenne de la catégorie. Densité: 1.8	
Catégorie	PCB	Moyenne	Erreur sur la moyenne			Concentration moyenne	Masse PCB.
	[mg/kg]	[m ³]				[mg/kg]	[kg]
1	x < 0.1	25'511	24%	-5'407.91	20'103	0.05	2
2	0.1 < x < 1	33'183	13%	-3'034.56	30'148	0.55	30
3	1 < x < 10	56'602	9%	-2'015.53	54'586	5.50	560
4	10 < x < 50	32'210	13%	4'314	36'524	30.00	1'740
5	50 < x < 1000	14'203	29%	4'086	18'289	525.00	13'420
6	1000 < x	3'072	67%	2'059	5'131	1000.00	5'530
TOTAL		164'781			164'781		21'282

Tableau 2-3 Volumes et masses de PCB présents dans la zone haute de la décharge

2.3.2.5 Zone basse

La zone basse de la décharge renferme des déchets qui se trouvent à une plus grande distance du cours d'eau, ce qui induit une diffusion beaucoup plus faible et plus lente des polluants. Sur le côté nord, le pied des déchets est situé à une distance d'environ 25 mètres du lit mouillé de la Sarine en hautes eaux. Toutefois, les profils géophysiques réalisés en 2010 puis les investigations complémentaires de 2016 ainsi que le modèle hydrogéologique numérique montrent qu'un flux provenant de la petite Sarine peut ainsi traverser la zone basse depuis l'extrémité est de la décharge. De plus, en cas de crues la Petite Sarine peut passer par-dessus la crête molassique et entraîner des polluants en direction de la Sarine. Les flux de polluants issus de ce secteur représentent 5% du flux total.

La zone basse de la décharge occupe la moitié de l'emprise de la décharge à l'est du profil 5, soit une surface d'environ un hectare. Elle représente un tiers du volume total des déchets, soit environ 70'000 m³, et la moitié du volume des graviers et alluvions, soit environ 40'000 m³. L'épaisseur du corps de la décharge peut atteindre un peu plus de 10 mètres et l'épaisseur des alluvions sous-jacentes un peu plus de 4.7 mètres.

Classe		Volume	Erreur max sur les volumes des classes PCB > 10 ppm			Masse PCB: multiplication du volume avec teneur moyenne de la catégorie. Densité: 1.8	
Catégorie	PCB	Moyenne	Erreur sur la moyenne			Concentration moyenne	Masse PCB.
	[mg/kg]	[m ³]		[m ³]	[m ³]	[mg/kg]	[kg]
1	x < 0.1	24'242	25%	-3'614	20'628	0.05	2
2	0.1 < x < 1	27'750	13%	-1'944	25'806	0.55	30
3	1 < x < 10	37'132	11%	-1'652	35'480	5.50	370
4	10 < x < 50	16'137	20%	3'258	19'395	30.00	870
5	50 < x < 1000	6'275	45%	2'840	9'115	525.00	5'930
6	1000 < x	1'281	87%	1'113	2'394	1000.00	2'310
TOTAL		112'817			112'817		9'512

Tableau 2-4 Volumes et masses PCB présents dans la zone basse de la décharge

2.3.2.6 Comparaison entre zone haute et zone basse

Le tableau suivant souligne l'importance de la zone haute en termes de volumes et de masses de PCB par rapport à la zone basse :

	Volume moyen	Masse PCB. Moyenne	Volume PCB > 10 ppm	Masse PCB > 10 ppm
	<i>[m3]</i>	<i>[m3]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg]</i>
Décharge entière	278'200	30'996	73'500	30'006
Zone Haute	164'781	21'282	49'485	20'690
Zone basse	112'817	9'512	23'693	9'110
Zone basse / zone haute	68%	45%	48%	44%
Zone haute / site total	59%	69%	67%	69%
Zone basse / site total	41%	31%	32%	30%

Tableau 2-5 Répartition des volumes et des masses PCB entre la zone haute et la zone basse

En général, la zone basse est moins polluée par les PCB que la zone haute : seul 32 % du volume est compris dans les catégories les plus polluées (4 à 6) contre 67 % pour la zone haute de la décharge.

2.3.2.7 Distribution des PCB en profondeur

Des condensateurs et matériaux fortement contaminés par les PCB se trouvent en profondeur, à la base du corps de la décharge, aussi bien pour la zone haute que pour la zone basse.

En deçà de la cote 571 m.s.m., un secteur étendu présentant des concentrations supérieures à 10, voire 50 ppm de PCB est présent dans les deux parties de la décharge (voir figure 2-7 ci-dessous).

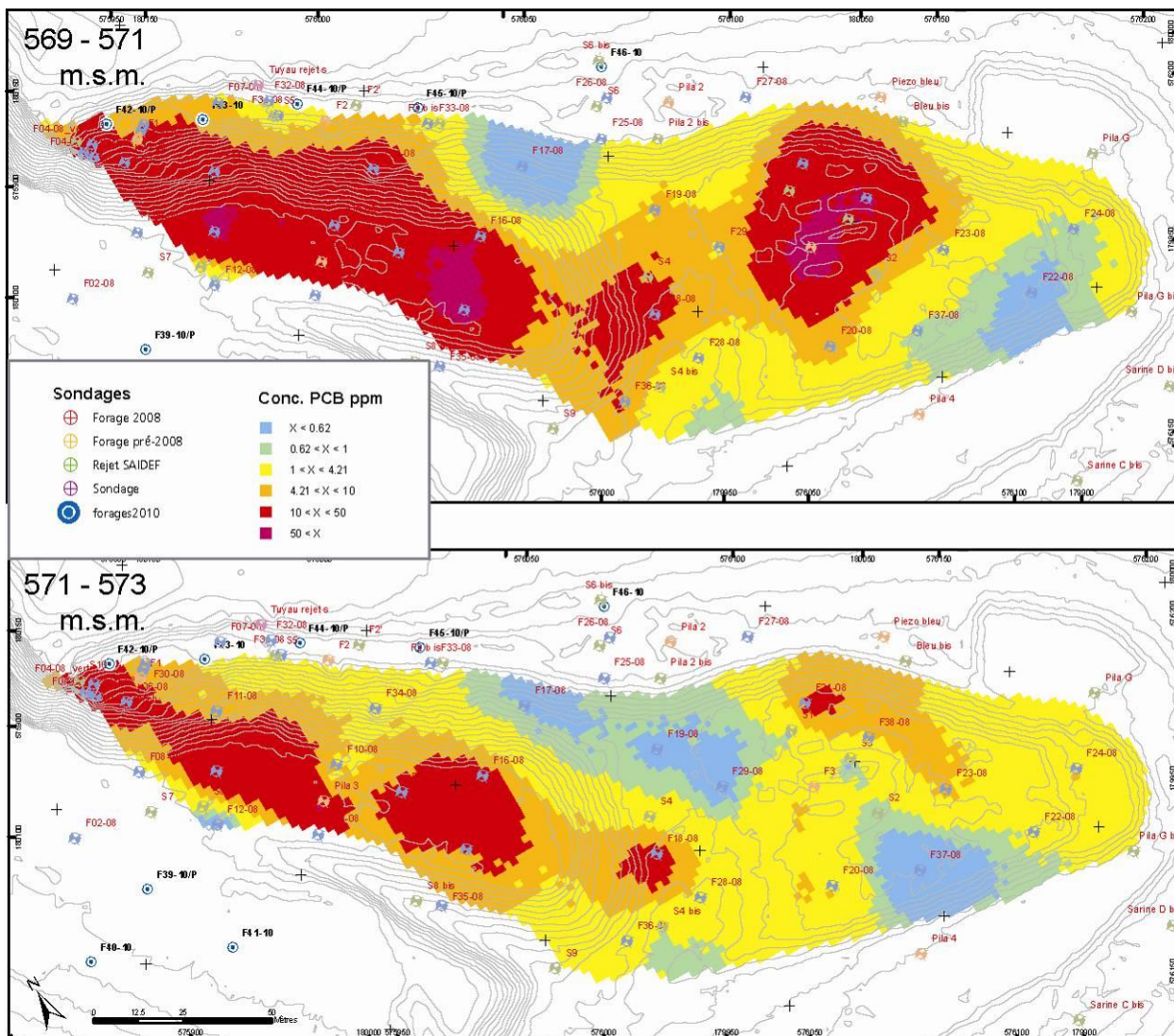


Figure 2-7 Répartition probable des concentrations en PCB entre 569 et 573 m.s.m.

Ces concentrations élevées de PCB peuvent être trouvées localement jusque dans les alluvions sous-jacentes. La figure ci-dessous met en évidence les résultats des analyses de PCB effectuées dans les eaux souterraines (campagne d'août 2016).

La présence d'huile fortement chargée en PCB a également été constatée au cours des relevés effectués lors de cette campagne : les sondages où la présence d'huile flottant sur la nappe a été constatée sont également indiqués sur la figure 2-8.

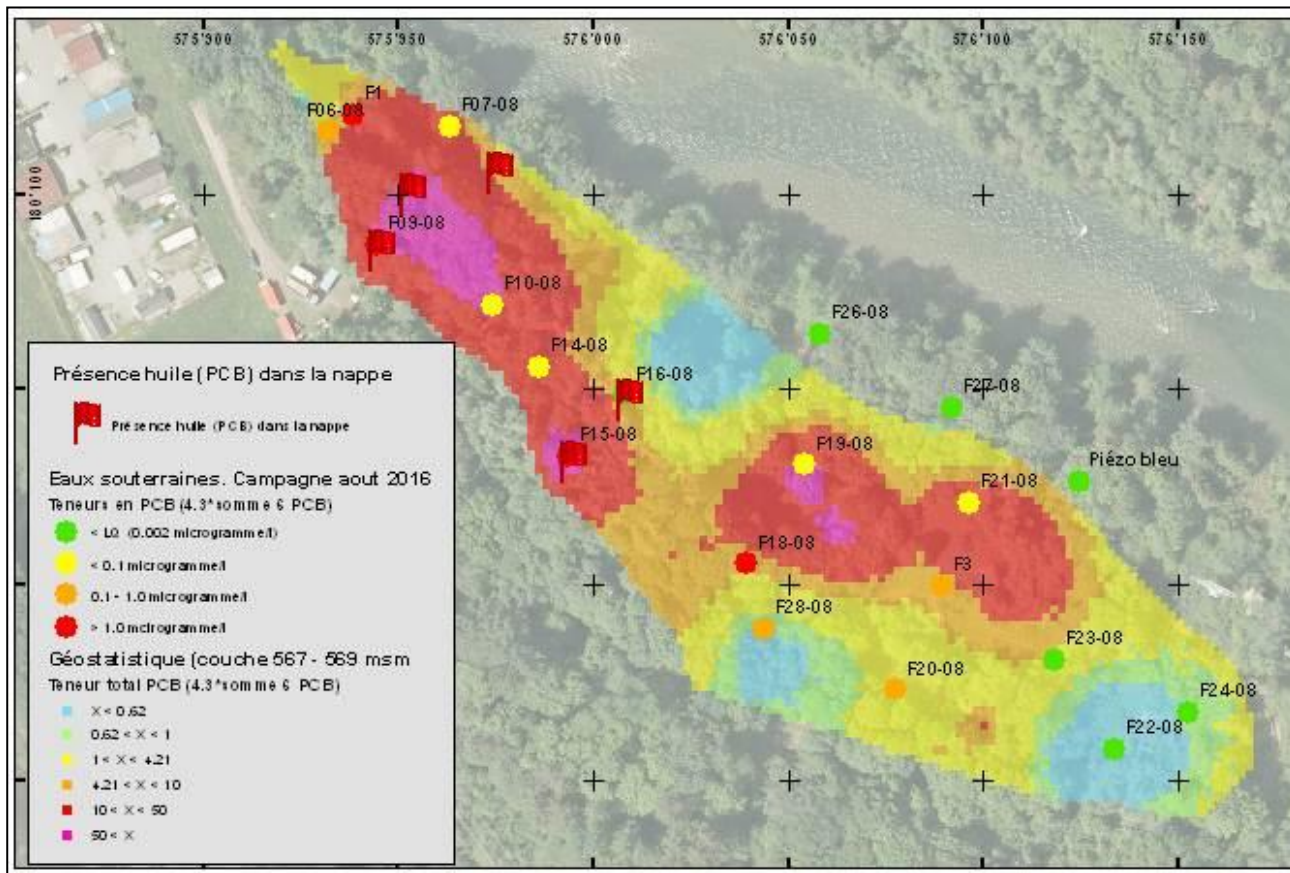


Figure 2-8 Répartition spatiale des classes de contamination par les PCB dans les déchets situés directement sur les alluvions [15].

La présence de poches fortement contaminées en profondeur et la répartition de celles-ci est déterminante pour définir les zones à assainir et les limites d'un éventuel assainissement partiel.

2.3.3 Flux de polluants en provenance de la décharge

2.3.3.1 Flux de PCB par érosion des talus de la décharge

Les flux annuels de matière et de PCB émis depuis la décharge par érosion ont été estimés dans le cadre des études liés aux mesures complémentaires.

Pour quantifier les flux annuels de PCB liés à l'érosion, le bord de la décharge longeant la Sarine a été subdivisé en 6 segments, d'une longueur totale de 300 mètres, représentés chacun par un réceptacle à érosion. Pour chaque segment, les matériaux érodés peuvent atteindre la Sarine.

Les flux de matière ont été extrapolés sur une année en considérant le flux quotidien moyen de chaque échantillon. Cela permet de calculer un flux annuel par mètre linéaire de falaise, respectivement de talus de la décharge. Le flux annuel d'un segment donné est obtenu par multiplication par la longueur du segment.

Les concentrations en PCB appliquées sont les concentrations moyennes de tous les échantillons disponibles du secteur représenté par le réceptacle.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de ce calcul qui représente la situation en 2016 sans confinement de la zone haute de la décharge.

Réceptacle	Longueur segment m	Flux annuel de matière kg MS		Concentration PCB moy. [mg/kg MS]	Flux PCB annuel /segment grammes [g]
		par mètre	par segment		
E1	20	1.90	38	19.75	0.75
E3	10	192.00	1920	85.09	163.38
E2	50	7.80	390	0.33	0.13
E4	70	0.11	7	1.33	0.010
E5	80	0.55	44	2.97	0.13
E6	70	0.98	68	1.82	0.12
Total	300		2'468		165
Estimation 2008			5'000 - 15'000 kg		350 - 1'050 g

Tableau 2-6 Flux annuels de matière et de PCB par érosion (état 0 sans palplanches)

Le flux annuels provenant de l'érosion des talus de la décharge ainsi calculés pour toute la longueur de la décharge (environ 300 mètres) sont de 2'468 kg de matière et 165 grammes de PCB pour l'état actuel de la décharge sans confinement.

2.3.3.2 Flux de PCB à partir de glissements de terrain

Sur la base de la recherche historique réalisée sur l'occurrence des glissements de terrain à proximité et sur la décharge de la Pila, un modèle simplifié a été élaboré dans le cadre des mesures complémentaires pour évaluer les conséquences de glissements de déchets résultant d'un événement extrême comme une crue centennale.

La zone haute de la décharge est principalement concernée par ce phénomène en raison de sa proximité avec le cours d'eau et de ses talus raides, à partir desquels des glissements se sont déjà produits par le passé.

Les calculs géotechniques ont mis en évidence qu'un volume total d'environ 22'000 m³ de déchets, représenté schématiquement sur la coupe ci-dessous, pourrait être déstabilisé suite à une crue centennale, en l'absence de palplanches et de système de pompage. Ce glissement de terrain potentiel se produirait uniquement au droit de la zone haute de la décharge. La masse totale de PCB contenue dans ces matériaux a été estimée, sur la base des analyses et de la présence de déchets de condensateurs, à 5'900 kilos.

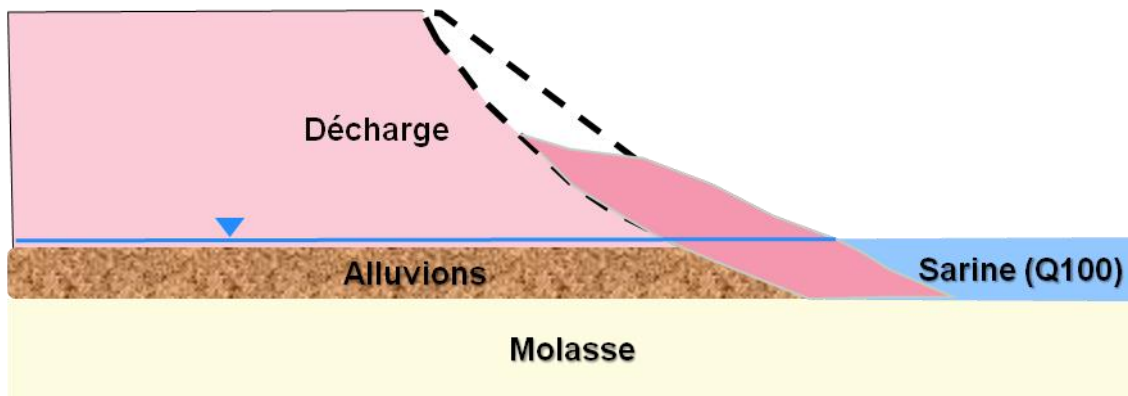


Figure 2-9 Coupe schématique d'un glissement de terrain

Une simulation avec 10% de la masse de déchets, atteignant la Sarine sous forme de petits glissements durant 50 ans, reflète l'évolution du stock dans les sédiments en tenant compte d'une « perte » de PCB liée aux crues et d'un apport généré par une crue susceptible de déstabiliser des matériaux du talus de la décharge en quantités plus ou moins importantes.

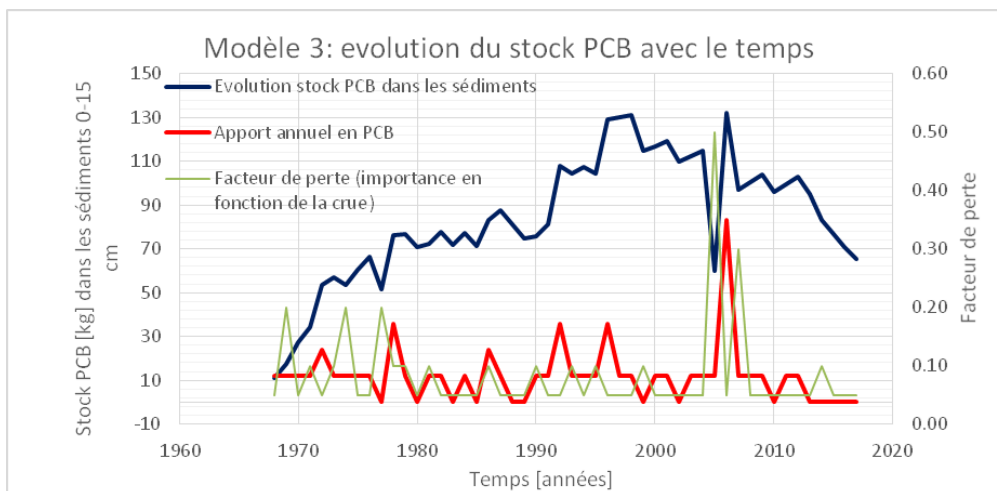


Figure 2-10 Modèle n° 3 : évolution stock PCB dans la couche sédimentaire de 0-15 cm avec un apport annuel aléatoire en PCB identique au modèle n° 2 mais avec une perte du stock PCB dans les sédiments « enfouis en profondeur » en fonction des crues de temps de retour observés sur la Sarine entre 1968 et 2017. Tiré de [6].

Une partie des déchets déstabilisés aboutirait directement dans la Sarine, en pied de décharge, et constituerait sur le long terme une source de production de déchets située directement dans le lit du cours d'eau.

2.3.3.3 Flux de polluants à partir des eaux souterraines

Selon les précédentes études, les flux de PCB dissous exportés dans la Sarine par les eaux souterraines en provenance de la décharge sont compris dans une fourchette comprise entre 40 et 500 grammes par année.

Pour l'état actuel de la décharge sans confinement de la zone haute, sans palplanches ni pompage, le tableau suivant montre que la quantité de PCB s'exfiltrant de la décharge vers la Sarine varie entre 62 et 157 g/a.

Pour l'état 2016 avec confinement, la quantité de PCB s'exfiltrant de la décharge vers la Sarine se situe entre 3 g/a (moyenne) et 7 g/a (maximum).

	Flux hydraulique (m3/semaine)				Concentration en PCB dissous 4.3 ₆ PCB (ng/l)		Flux de PCB (g/semaine)							
	Etat 2016		Etat 0		moy.	max.	Etat 2016				Etat 0			
	Semaine normale	Turb. continu	Semaine normale	Turb. continu			moy.	max.	Semaine normale	Turbinage continu	Semaine normale	Turbinage continu	moy.	max.
segF61	2'191	1'084	2'256	1'084	14	26	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03	0.06	0.02	0.03
segPB	973	579	1'014	586	3	17	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01
segF27	1'083	561	1'112	593	0.3	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PaIPP4	5	2	282	161	75	300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.01	0.05
PaIPP3	12	5	254	116	50	271	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.01	0.03
PaIPP2	8	3	136	68	42	280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02
PaIF07-PP1	6	2	457	215	1'572	3'883	0.01	0.02	0.00	0.01	0.72	1.77	0.34	0.83
PaIF05-PP1	7	3	253	144	1'572	3'883	0.01	0.03	0.00	0.01	0.40	0.98	0.23	0.56
Somme [semaine]	4'284	2'238	5'764	2'967			0.1	0.1	0.0	0.1	1.2	3.0	0.6	1.5
Somme[année]	222'784	116'366	299'728	154'299			3	7	1	3	62	157	31	80

Tableau 2-7 Flux sortant de PCB. Comparaison entre une « semaine normale » et une « semaine de turbinage continu ».

Plus de 90% de ce flux est dû à l'importante concentration en PCB mesurée en PP1 (zone du hot spot). Les flux ainsi calculés par la nouvelle version du modèle hydrogéologique et sur la base des analyses effectuées entre 2012 et 2016 sont cohérents avec les estimations issues du modèle de 2008 qui calculaient un flux total de PCB de 116 grammes par année.

La modélisation hydrogéologique effectuée en 2016 avec un turbinage en continu, présentée dans le rapport des mesures complémentaires, montre que les flux de PCB sont réduits de moitié avec un régime quasi constant de la Sarine. Concrètement, cela veut dire que les longues périodes de turbinage, destinées à produire de l'énergie de réglage du réseau électrique en continu (contrats SDL pour Swissgrid devenus importants dès 2016), tendent à diminuer l'exportation de PCB par les eaux souterraines vers la Sarine.

2.3.4 Synthèse des flux de polluants en provenance de la décharge

La figure ci-dessous présente, pour les différents états de référence (2016 sans mesures préliminaires et 2016 avec mesures de pompage et de confinement) et les différents vecteurs de PCB possibles (eaux souterraines, glissement, érosion), les contributions relatives des différents flux de PCB provenant de la décharge.

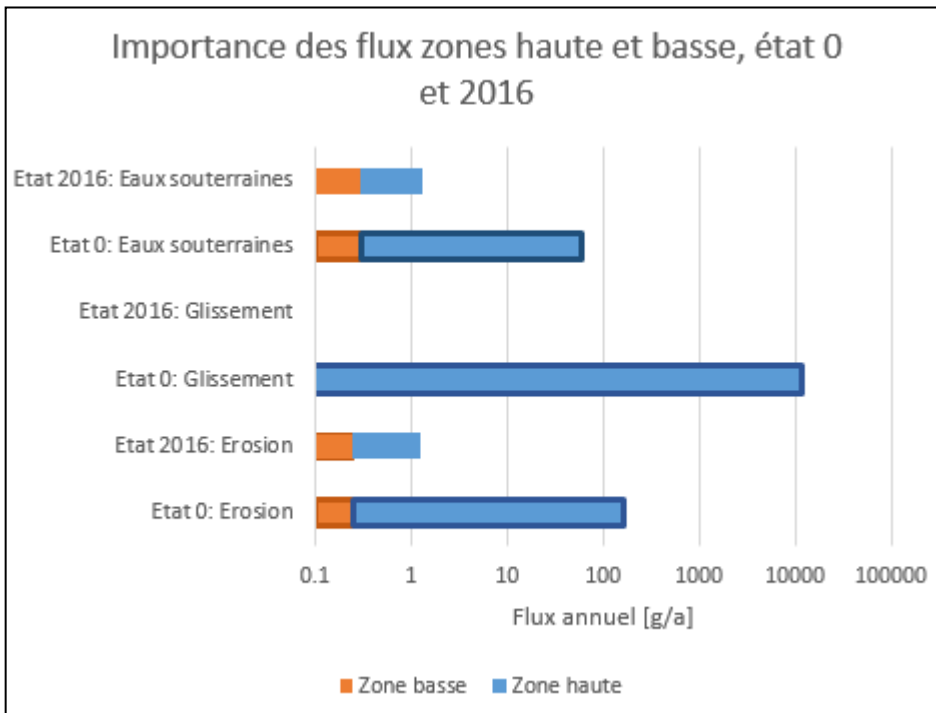


Figure 2-11 Hiérarchisation des flux par zone de la décharge (Etat 0 correspond à l'Etat actuel)

Pour tous les états de référence et tous les flux de PCB possibles, la zone haute est clairement le secteur de la décharge qui contribue de façon prépondérante à l'écoulement de PCB dans la Sarine.

C'est également le secteur potentiellement à l'origine du flux le plus important par déstabilisation d'une partie des talus de la décharge et glissement de déchets et matériaux contaminés dans la rivière.

2.3.5 Contraintes spécifiques liées au site

Le site de la Pila se trouve dans la zone alluviale d'importance nationale de la vallée de la Sarine (Inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale). Le secteur est également classé comme zone de reproduction des batraciens (Inventaire fédéral des sites de reproduction de batraciens d'importance nationale - Objets fixes). De par sa situation, le site de la Pila présente un intérêt dans le domaine de la protection de la nature, en particulier comme site favorable aux amphibiens.

Le réaménagement du site après son assainissement devra permettre de retrouver un caractère conforme à ce classement.

La décontamination du site par excavation totale ou partielle des déchets et d'une partie des alluvions, jusqu'au niveau de la molasse, amènera par endroits le niveau de la topographie finale sous le niveau de la terrasse alluviale d'origine.

Cette situation pourrait amener certaines parties assainies de la décharge à être inondées en quasi permanence.

L'aménagement définitif du site (niveau des terrasses, création éventuelle de bras latéraux, etc.) devra faire l'objet d'une étude spécifique qui sera établie lors de la mise à l'enquête du projet d'assainissement.

Outre le milieu sensible du point de vue de la protection de la nature dans lequel s'inscrit le site de la Pila, d'autres contraintes nécessitent une attention particulière dans le cadre du développement d'un projet d'assainissement :

- Nappe souterraine sous le corps de la décharge baignant des alluvions qui devront en partie être excavés. Le périmètre à assainir se situe en secteur Ao de protection des eaux.
- Exploitation de la Sarine par une usine hydroélectrique sise sur la rive opposée de la décharge. Le turbinage de l'eau (en provenance du barrage de Rossens) occasionne des variations parfois importantes du débit dans le cours d'eau à l'aval de l'usine. Celles-ci induisent une variation du niveau de l'eau le long de la berge aval de la décharge.
- Risques d'inondation lors des crues de la Sarine ; crues extrêmes..
- Géographie du site limitant les possibilités d'accès et de circulation (périmètre délimité par le cours d'eau et la falaise de molasse).
- Présence de lignes électriques aériennes de haute-tension dans les secteurs utilisables pour les installations de chantier.
- Présence de lignes électriques enterrées de moyenne-tension sur le pourtour de la décharge, voir empiétant localement dans la décharge.
- Projet routier de liaison Marly-Matran avec un ouvrage franchissant la Sarine au droit de la Pila (mise à l'enquête du projet prévue en 2020).

2.4 Objectifs d'assainissement

Dans le cas du site contaminé de la Pila, le bien à protéger est la Sarine qui est exposée aux risques de contamination par des PCB provenant de glissements de terrain susceptibles d'entraîner des déchets dans la rivière, d'exfiltrations d'eaux souterraines et par l'érosion des talus de la décharge.

Les objectifs d'assainissement ont été précisés lors d'une séance avec les autorités compétentes le 30 mars 2017 et confirmés dans un courrier du 23 avril 2018. La note de séance et la lettre sont reproduites en Annexe A.

2.4.1 Objectifs d'assainissement formulés par les autorités

Après la remise du projet d'assainissement (par excavation totale des déchets et alluvions pollués) du 28 décembre 2010, l'OFEV s'est positionnée comme suit lors du COPAR du 10 février 2011 : (extrait du PV)

- *.....Le projet d'assainissement devra montrer quel bénéfice l'assainissement apportera de manière générale à l'environnement, y compris aux sédiments de la Sarine et aux poissons. Christophe Wenger mentionne qu'il faut analyser si on peut s'écarter des objectifs d'assainissement selon l'OSites dans ce contexte.*

Dans sa détermination du 6 septembre 2013, l'OFEV précise sa position en relation avec l'analyse des conditions permettant de s'écarter des buts de l'assainissement au sens de l'Art. 15 OSites :

- *Selon l'art. 18, al.1, let. e, OSites, l'autorité doit évaluer si les conditions permettant de s'écarter de l'objectifs fixé pour l'assainissement en vertu de l'art 15, al. 2 et 3 OSites sont remplies ou non. Une compréhension, au moins partielle, de l'évolution de la pollution de la Sarine dans le temps et une fois que les apports de PCB venant de la décharge seront totalement ou partiellement supprimés est donc nécessaire.*
- *Une meilleure connaissance du système décharge Sarine (eau et sédiments) – poissons, devrait permettre de déterminer **quelle concentration de PCB à la sortie du site de la Pila permet d'exclure toute atteinte**. Le chapitre 11, al. 1 de l'annexe de l'OEaux fixe que la qualité des eaux doit être telle que les eaux propices au frai des poissons soient conservées (let. b).*
- *Il ressort des éléments ci-dessus **que la définition des buts d'assainissement doit tenir compte de la pollution de la Sarine et des risques pour les poissons.***

Une séance technique a eu lieu le 30 mars 2017 avec le SEn et l'OFEV afin de mieux cibler les objectifs que doit atteindre l'assainissement en vue de l'identification des variantes d'assainissement. Les points suivants ont été précisés :

- Pas de dépassement de la valeur de 10 x OSites à l'aval à proximité du site (l'aval à proximité du site est considéré comme la bordure aval qui forme le pourtour de la décharge actuelle). Par exemple, la partie de la décharge que l'on laisserait en place dans le cadre d'un assainissement partiel ne doit pas générer d'écoulement vers la zone aval à proximité du site (donc vers la rivière) qui dépasse en « temps normal », hors crue, la valeur correspondant à 10 x OSites (par exemple, = 1 µg/l $4.3 \cdot \sum 6 \text{ i-PCB}$).
- Pas de déchets dans la Sarine : l'assainissement doit permettre d'exclure tout déversement de déchets dans la Sarine (par exemple entraînés par une crue).
- Une dérogation selon l'art. 15 OSites est envisageable pour la zone basse en cas de crue entraînant ponctuellement un dépassement de la valeur de 1 0x OSites en aval à proximité du site, sans effet sur les poissons.

Dans sa lettre du 29.11.17 [16] le SEn précise les conditions d'une dérogation :

- a. Si, ce faisant, on réduit globalement la pollution de l'environnement ;
- b. si cela permet d'éviter des coûts disproportionnés ; et
- c. si les eaux satisfont aux exigences relatives à la qualité des eaux formulées dans la législation sur la protection des eaux.

Il ressort, en particulier des déterminations de l'OFEV, que les conditions d'une dérogation aux objectifs d'assainissement sont liées à la détermination de la concentration de PCB à la sortie du site de la Pila permettant d'exclure toute atteinte aux poissons.

2.4.2 Exigences supplémentaires formulées par les autorités

L'assainissement du site de la Pila ne doit pas entraîner un « transfert » du stock de PCB sur d'autres sites (de décharge par exemple).

Les choix possibles dans le traitement des matériaux doivent s'orienter vers les procédés qui permettent une destruction maximale des PCB.

2.4.3 Objectifs résultant des études complémentaires

Les mesures complémentaires réalisées en 2016 ont eu pour objectifs de déterminer la quantité de PCB dans les eaux et les sédiments de la rivière sans effet pour les poissons.

En comparant ces résultats aux quantités de PCB émises par le site de la Pila et aux quantités de PCB présentes dans la Sarine, il est ensuite possible de déterminer quelle quantité de PCB émise par la décharge permet d'exclure toute atteinte.

Les résultats peuvent être synthétisés comme suit :

Seuil de PCB dissous admissibles dans l'eau de la Sarine pour un poisson à 6.5 pg/gTEQ05	Seuil de PCB dissous admissibles dans l'eau pour un poisson à 3.3 pg/gTEQ05	Quantité maximale (worst case) de PCB émises par les eaux souterraines depuis la décharge
5'228g/an	2'675g/an	115-283g /an

Si l'on considère que la Pila est la seule source de contamination de la Sarine par des PCB, alors une émission de l'ordre de deux kilos de PCB dissous par an pourrait être émise sans atteinte depuis le site de la Pila. Cette valeur de 2.6 kg est d'un ordre de grandeur supérieur aux quantités maximales de PCB que pourrait émettre la décharge sans mesures de confinement.

Les quantités maximales de PCB que pourrait émettre la décharge sans mesures de confinement et sans effet sur le poisson sont par ailleurs du même ordre de grandeur que les quantités de PCB présentes dans l'eau de la Sarine en 2016 à l'amont du site de la Pila.

Les conclusions qui s'imposent à partir de ces résultats sont les suivantes :

1. La concentration de PCB dissous à la sortie du site de la Pila permettant d'exclure toute atteinte est de l'ordre de 2 kilos par an.
2. Les quantités maximales de PCB dissous émises par le site de la Pila pour l'état 0, sans mesures de confinement, sont d'un ordre de grandeur inférieur à la valeur seuil et ne sont pas déterminantes pour le poisson. En considérant le flux de PCB dissous provenant des eaux souterraines et la cible poisson à 3.3 pg/gTEQ05 (ce qui correspond à une concentration moyenne de 2.2 ng/l dans l'eau de la Sarine) les concentrations limites admissibles dans les eaux souterraines devraient être d'environ 8.7 µg/l, en permanence et pour l'ensemble de l'aval de la décharge, pour produire un flux de 2.6 kilos. Cette concentration n'est que ponctuellement atteinte ou dépassée aux environs du puits PP1.

Une dérogation selon l'art. 15 OSites semble donc possible pour le PCB dissous provenant de la décharge, ce qui n'exclut toutefois pas d'intervenir sur les parties du site à l'origine des émissions résiduelles les plus importantes, même sans effet sur les poissons.

3. Les quantités de PCB maximales émises par le site de la Pila sans mesures de confinement sont du même ordre de grandeur que les quantités de PCB présentes dans la rivière à l'amont de la Pila : un assainissement de la décharge coupant ce flux n'aura aucun effet discriminable sur le poisson dans la Sarine.

La majeure partie des PCB présents dans la rivière est piégée dans les sédiments et déchets présents dans les tronçons Pila-Gérine et dans le Lac de Pérolles. Au total, pour la tranche superficielle entre 0 et 15 cm de profondeur, environ 45 kilos de PCB se trouvent dans le tronçon Pila Gérine et environ 20 kilos dans le Lac de Pérolles. Le tronçon Gérine-Pérolles, le moins contaminé, compte environ 500 g de PCB piégé dans les sédiments et déchets.

Les études menées dans le cadre des mesures complémentaires ont mis en évidence le caractère prépondérant de la contamination des sédiments et de la présence de déchets contaminés par les PCB pour expliquer la teneur en PCB présente dans la chair des poissons.

Des valeurs seuils de concentration en PCB dans les sédiments sans effet pour les poissons ont également été définies dans le cadre des études complémentaires :

Seuil de PCB (mg/kg < 2 mm) admissibles dans les sédiments de la Sarine pour un poisson à 6.5 pg/gTEQ05	Seuil de PCB (mg/kg < 2mm) admissibles dans les sédiments de la Sarine pour un poisson à 3.3 pg/gTEQ05
0.058 mg/kg	0.040 mg/kg

Cette contamination sera évacuée progressivement sous l'effet du courant et des crues de la rivière : si l'on se base sur l'historique du régime d'écoulement et des crues disponibles pour la Sarine, la contamination pourrait mettre plusieurs dizaines, voire jusqu'à une centaine d'années à s'évacuer.

La décharge de la Pila, sans confinement et sans mesures de protection, présente un risque à long terme d'entraînement de déchets dans la Sarine. La sensibilité du poisson à la présence de PCB, notamment sous forme de déchets, dans les sédiments est importante : une quantité d'environ 200 grammes de PCB contenue dans les 15 premiers centimètres des sédiments du tronçon Pila-Gérine suffit à atteindre le seuil de PCB admissible de 3.3 pg/g TEQ05. Ce constat est par ailleurs cohérent avec la situation rencontrée sur le tronçon Gérine – Lac, dans lequel une quantité de l'ordre de 500 grammes de PCB présente dans les sédiments est à l'origine d'un faible nombre de dépassements de la valeur seuil pour les poissons.

Les conclusions qui s'imposent à partir de ces résultats sont les suivantes :

1. Les mesures d'assainissement de la décharge doivent permettre d'exclure tout entraînement de déchets ou sols contaminés dans la Sarine.
2. Les effets de ces mesures ne seront pas immédiatement mesurables dans la Sarine, car c'est l'effet d'une évacuation progressive des sédiments contaminés présents dans la rivière qui sera déterminante. Celle-ci dépendra exclusivement du régime hydraulique de la rivière et n'a aucun lien avec l'assainissement du site de la Pila.

Les conditions d'une dérogation à l'art. 15 OSites définies par l'OFEV (sans effet mesurable pour les poissons) concernant les eaux superficielles sont donc remplies pour l'ensemble du site de la Pila.

Ces conditions respectent l'esprit voulu par l'autorité dans l'aide à l'exécution publiée en 2001, qui dit que *« les objectifs d'assainissement respectivement les atteintes maximales admissibles dépendent des milieux à protéger. Ils ne prescrivent pas en quelles concentrations résiduelles les polluants peuvent demeurer sur un site. Ce n'est pas la contamination du sous-sol qui est déterminante, mais les effets éventuels de cette contamination sur les milieux à protéger.lors de l'assainissement d'un site, il n'est donc pas impératif que les polluants en soient éliminés ; on appliquera plutôt le principe de la prévention durable à la source »*.

Les PCB étant des polluants organiques persistants, il paraît judicieux dans une perspective de long terme et indépendamment de l'effet sur les poissons, d'en limiter au maximum les émissions depuis le site de la Pila en adoptant une approche coût efficacité.

3. Mesures d'assainissement possibles (étape 1)

3.1 Principes

L'objectif principal de l'assainissement d'un site contaminé est d'éliminer durablement les atteintes illicites à l'environnement. Pour ce faire, un assainissement doit répondre aux principes suivants, repris de l'aide à l'exécution de l'OFEV :

1. Prévention à la source : un assainissement doit avant tout permettre de limiter les transports de polluants d'un site contaminé vers des biens à protéger, de telle manière que le site ne nécessite plus aucun assainissement sur le long terme. Il doit donc permettre de rester en-dessous des limites fixées par l'OSites pour les eaux (souterraines et de surface), le sol et l'air, limites qui permettent d'établir le besoin d'assainir. Les modalités d'assainissement dépendent du bien à protéger, il n'y a pas nécessairement lieu d'éliminer entièrement les polluants du site concerné (pas d'assainissement « de luxe »).
2. Élimination durable du danger : l'assainissement doit être une solution définitive ; ses effets doivent donc être durables.
3. Résolution du problème de contamination en une ou deux générations : les mesures d'assainissement doivent avoir déployé leurs effets en l'espace de 25 à 50 ans au maximum, de sorte que le site concerné puisse alors être laissé tel quel, sans qu'il soit nécessaire de prendre d'autres mesures particulières.

3.2 Conditions d'applicabilité

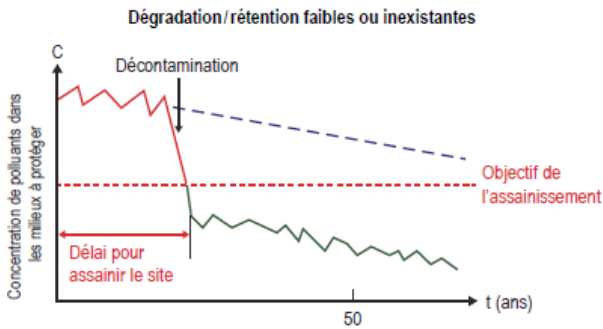
Cette première étape d'identification des mesures d'assainissement possibles consiste à identifier sommairement les mesures permettant d'assainir le site de la Pila.

Selon l'art. 16 OSites, les mesures d'assainissement possibles sont les suivantes :

- Décontamination : opération qui vise à éliminer des substances dangereuses pour l'environnement ;
- Confinement : opération qui vise à empêcher et à surveiller durablement la dissémination des substances dangereuses dans l'environnement ;
- L'atténuation naturelle contrôlée (monitored natural attenuation, MNA) : dans certains cas, les objectifs d'assainissement peuvent être atteints dans le délai prescrit en laissant opérer les processus naturels de dégradation et de rétention des polluants dans le sol.

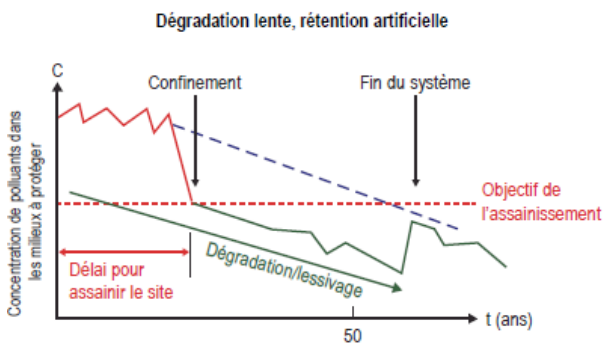
Les conditions d'applicabilité de ces trois mesures d'assainissement dépendent essentiellement du potentiel de dégradation et de rétention des polluants à l'origine du besoin d'assainir.

La figure ci-dessous, reprise de l'aide à l'exécution de l'OFEV, illustre les conditions auxquelles ces trois mesures sont applicables :



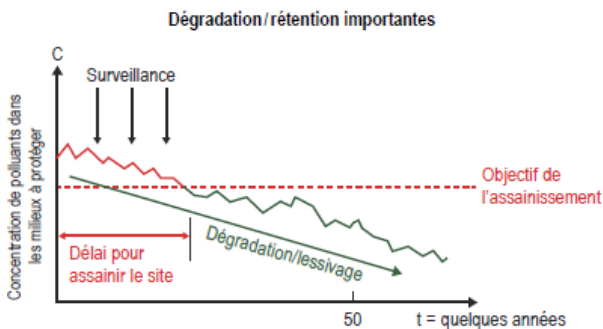
Décontamination

Opération visant à éliminer les polluants, requise lorsque les émissions de polluants persistants ne peuvent pas être ramenées en dessous du seuil admissible dans le délai prescrit (ou en l'espace d'une ou deux générations), en raison d'une rétention ou d'une dégradation insuffisante.



Confinement

Opération essentiellement indiquée lorsque les informations disponibles sur la contamination montrent que les polluants se seront fortement dégradés et que le site pourra être laissé tel quel (c.-à-d. sans devoir prendre d'autres mesures) en l'espace d'une ou deux générations (p. ex. anciennes décharges d'ordures ménagères, sites pollués par des huiles minérales). Elle requiert une surveillance continue jusqu'à ce que les atteintes à l'environnement ne dépassent plus le seuil admis, et ce, sans que d'autres mesures de confinement ne doivent être prises.



Atténuation naturelle contrôlée (MNA)

Mode de gestion des sites pollués consistant à surveiller les processus physiques, chimiques et biologiques naturellement à l'œuvre dans le sol qui permettent de réduire les émissions de polluants. Ne constituant pas une mesure d'assainissement à proprement parler, la MNA est indiquée lorsque les polluants présents se dégradent naturellement de manière rapide. Le laps de temps nécessaire pour atteindre l'objectif d'assainissement fixé doit être inférieur au délai prescrit. Par ailleurs, cette solution requiert une surveillance continue des polluants à l'origine de la nécessité d'assainir.

Figure 3-1 Conditions d'applicabilité d'une mesure

Mesure

- **Décontamination**
 - Élimination des substances nocives pour l'environnement, en les extrayant ou en les détruisant à la source
- **Confinement**
 - Prévention de la propagation des substances nocives pour l'environnement
- **Atténuation naturelle contrôlée (MNA)**
 - Surveillance des processus naturels de rétention et de dégradation

Conditions requises

- $T_{(\text{délai})} < 50 \text{ Jahre} < T_{(\text{dégradation})}$
- $T_{(\text{délai})} < T_{(\text{dégradation})} < 50 \text{ ans}$
- $T_{(\text{dégradation})} < T_{(\text{délai})}$

Figure 3-2 Conditions auxquelles une mesure est applicable

Comme mentionné aux chapitres 2.3 et 2.4, les PCB et dans une moindre mesure l'ammonium sont les polluants déterminants pour l'assainissement du site contaminé de la Pila.

Les conditions d'applicabilité de ces mesures pour le site de la Pila peuvent être évaluées comme suit :

- **Atténuation naturelle contrôlée (MNA) :** En principe, ce type de mesure est applicable pour des polluants qui se dégradent de manière naturelle dans le sol et / ou qui sont retenus naturellement dans le sol. Dans le cas présent, la nature persistante du polluant principal, les PCB, exclut d'atteindre par atténuation naturelle les objectifs d'assainissement dans un intervalle de 50 ans. Pour les mêmes raisons, le MNA ne peut pas être retenu en tant que mesure pouvant être combinée avec d'autres mesures d'assainissement ou comme mesure après assainissement pour la pollution résiduelle.
- **Confinement :** Le confinement sans autres mesures d'assainissement n'est envisageable que pour les cas où le site peut être laissé à lui-même sans mesures supplémentaires d'assainissement (p.ex. une décharge d'ordures ménagères ou un déversement d'hydrocarbures). Dans le cas présent et pour les mêmes raisons que celles évoquées pour le MNA, une dégradation naturelle et durable des PCB peut être exclue pour les prochaines générations. Les procédés de confinement pour le corps de la décharge demandent des mesures d'entretien et de surveillance (par exemple pompage dans la zone confinée et traitement de l'eau) pour une durée qui s'étend bien au-delà de 50 ans. Ceci est également le cas pour des mesures de confinement de secteurs de la décharge qui seraient laissés en place. Le principe du confinement de surface peut cependant être considéré pour traiter une éventuelle pollution résiduelle sur le site après l'assainissement par d'autres procédés. Ceci est à évaluer en détail pour les alluvions.
- **Décontamination partielle ou totale :** Plusieurs raisons plaident pour une décontamination partielle ou totale du site :
 1. Apport direct dans le cours d'eau par voie de glissement de matériaux fortement contaminés avec des condensateurs (entiers, partiels, déchets) et avec des déchets contaminés par les PCB. La situation exposée de la zone haute par rapport au lit mouillé de la Sarine (juxtaposition, pentes raides, érosions aiguës de la berge en période de crue), ainsi que la proximité immédiate du cours d'eau des secteurs les plus contaminés par les PCB sont des éléments qui orientent le choix de la mesure d'assainissement vers une décontamination visant à supprimer l'apport direct de déchets dans le cours d'eau.
 2. En ce qui concerne la zone haute, la réalisation de la mesure d'excavation sur les berges et les talus met à ciel ouvert les zones les plus polluées en PCB situées dans la partie inférieure de la décharge. Ainsi en cas de crue, cette mesure augmente le risque d'exfiltrations de lixiviats fortement contaminés et / ou d'eaux souterraines fortement contaminées (présence d'huile en phase).
 3. Les teneurs élevées en ammonium à l'aval et au centre de la zone haute mettent également en évidence la nécessité de décontaminer tout ou partie de ce secteur pour atteindre les objectifs d'assainissement liés à ce polluant.

4. Procédés d'assainissement techniquement réalisables (étape 2)

4.1 Conditions et contraintes liées au site

4.1.1 Facteurs déterminants pour le site de la Pila

Les procédés d'assainissement retenus au terme de cette évaluation doivent permettre d'éliminer de manière efficace et durable les apports de polluants dans la Sarine afin que les objectifs d'assainissement puissent être atteints.

Les résultats des études complémentaires ont clairement souligné l'effet prépondérant et de longue durée d'un flux de PCB sous forme solide atteignant tous les compartiments de la rivière.

Dans cette étude, trois scénarios ont été retenus (cf. chapitre 5.2) pour évaluer les effets d'une suppression des émissions de la décharge dans la rivière. Ils ont permis d'évaluer non seulement les améliorations attendues au niveau de la Sarine (sédiments, eaux, faune benthique, poisson) mais également les risques liés à la pollution résiduelle laissée sur place après la suppression des flux de PCB déterminants. Ces trois scénarios envisagent la décontamination par élimination des matériaux susceptibles de produire les flux / concentrations en PCB dépassant les objectifs d'assainissement définis au chapitre 2.

Les contraintes principales d'une suppression partielle des flux PCB sous forme solide et dissoute sont liées à la nature et la position dans la décharge des matériaux les plus susceptibles à produire les flux de PCB et d'autres polluants ; il convient de relever en particulier :

- La très grande hétérogénéité de la distribution spatiale des différents types de déchets et de leur degré de contamination par les PCB.
- La présence de co-contaminants comme les métaux lourds.
- L'hétérogénéité de la distribution spatiale liée aux différentes formes sous lesquelles les PCB sont présents : condensateurs entiers ou partiels, déchets contaminés par les PCB, fraction minérale contaminée par du PCB adsorbé (alluvions, fraction minérale des déchets), en phase huileuse dans le corps de la décharge et dans la nappe, PCB sous forme dissoute (lixiviats, eaux souterraines).
- Les teneurs les plus élevées en PCB dans la partie inférieure de la décharge juste au-dessus des alluvions et en phase dans la nappe dans la partie centrale de la zone haute de la décharge.
- Les teneurs élevées en ammonium dépassant la valeur de concentration de l'Annexe 1 OSites dans la zone haute de la décharge.

4.1.2 Contraintes spécifiques liées au site

D'autres contraintes se présentent au niveau de l'exposition du site (assaini) aux crues.. Les exigences par rapport aux mesures de confinement / sécurisation des berges et des talus doivent pouvoir résister à long terme à de tels événements.

Pour les variantes de décontamination partielle du site, les exigences / contraintes liées à la situation spéciale de la Pila dans la zone alluviale de la Sarine, inscrite dans l'Inventaire fédérale des zones alluviales d'importance nationale (n° objet 62), peuvent rendre l'acceptabilité d'une pollution résiduelle plus difficile.

4.1.3 Conséquences sur le choix de procédés techniquement réalisables

Les procédés techniquement réalisables ont été évalués en considérant en particulier les critères / contraintes suivants, liés au site de la Pila :

1. Polluants très persistants.
2. Répartition spatiale hétérogène dans l'ensemble du corps de la décharge.
3. Présence de déchets pollués par les PCB avec teneurs extrêmes (condensateurs entiers et partiels).
4. Situation sensible de la décharge au bord d'une rivière (érosions, crues extrêmes).

4.2 Procédés techniquement réalisables

4.2.1 Procédés hors / sur site

La liste fournie en Annexe B présente les procédés d'assainissement possibles en considérant la décontamination et le traitement des déchets hors site ou sur site, pour le corps de la décharge et les alluvions.

En principe, les procédés sur site ne se distinguent pas des procédés hors site : la seule différence réside dans le fait que les procédés sur site impliquent un traitement des matériaux excavés sur place, ce qui requiert d'avantage d'espace pour réaliser les travaux.

Chaque procédé d'assainissement / de traitement a été évalué en considérant les critères suivants :

1. Applicabilité, efficacité, expériences d'autres cas :
 - a. Évaluation de l'applicabilité du procédé sur le corps de la décharge, sur les alluvions.
 - b. Efficacité en termes de réduction de la pollution (sur le site)
 - c. Référence(s) de sites où le procédé a été appliqué.
2. Prétraitement / produits secondaires : nécessité de prétraitement, produits secondaires et traitements nécessaires.
3. Possibilité d'atteindre l'objectif d'assainissement
4. Efficacité dans la destruction des PCB / optimisation de la fraction valorisable.

Le tableau présenté en Annexe B procède pour chaque procédé à une évaluation globale basée sur les appréciations ci-dessous :

- + Faisable et efficace
- (+) Moyennement faisable et efficace
- non applicable

4.2.2 Procédés in situ

L'aide à l'exécution de l'OFEV, 2016 [2] indique que « le choix du type de procédé pour opérer un assainissement in situ, sur site ou hors site, dépend non seulement de la nature des polluants, mais aussi et surtout de la structure du sous-sol et de l'emplacement de la contamination dans le terrain.

Ce sont toutefois souvent les considérations économiques qui priment. Bien que chaque cas doive être apprécié individuellement, le choix de l'assainissement in situ, sur site ou hors site, dépendra des critères essentiels suivants: »

	Facteurs plutôt en faveur d'un assainissement	
	In situ	Sur site ou hors site
Structure du sous-sol	Terrain non cohésif	Terrain cohésif
Position de la contamination	En profondeur	Proche de la surface
	Dans la zone saturée	Dans la zone non saturée
Nature de la contamination	Polluants volatils, bien solubles dans l'eau, facilement mobilisables, bien biodégradables, décomposables chimiquement	Polluants non volatils, peu solubles, difficilement mobilisables, peu ou pas biodégradables, persistants
	HCCV, BTEX, HCP, phénols, ammonium, métaux lourds solubles dans l'eau, cyanures	HAP, cyanures, pesticides, PCB, PCDD/PCDF, métaux lourds
Affectation actuelle	Terrain exploité ou bâti	Terrain inutilisé
Horizon temporel	Durée de l'assainissement non essentielle	Assainissement rapide requis
Affectation ultérieure	Peu sensible	Sensible

Figure 4-1 Tableau figurant dans l'OFEV, 2016 [2]

Plusieurs facteurs, présentés sur le tableau ci-dessus défavorisent le choix de procédés in-situ pour le site de la Pila :

- Polluant principal : PCB
- Affectation sensible (zone alluviale, alluvions en contact immédiat avec le cours d'eau)
- Position de la contamination dans la zone saturée et non saturée
- Assainissement rapide requis

Bien que ces critères plaident plutôt pour le choix de procédés sur site ou hors site, le développement de certaines techniques sur le marché est prometteur pour certains procédés qui méritent de ne pas être totalement écartés à ce stade.

4.2.3 Évaluation détaillée des procédés

La liste des procédés d'assainissement jointe en Annexe B permet de mettre en évidence les procédés d'assainissement techniquement réalisables et efficaces. Les procédés non applicables dans le contexte de la décharge de la Pila sont également indiqués comme tels. Les principales réflexions qui ont guidé l'identification des procédés techniquement réalisables sont présentées ci-dessous :

1. Les mesures de confinement, du site contaminé dans son ensemble ou pour de secteurs limités, sont exclues pour des raisons de durabilité, d'applicabilité et d'efficacité, comme cela est mentionné au chapitre 3.2. Le confinement est cependant acceptable pour sécuriser des surfaces de déchets dans le but de réduire les infiltrations et d'éviter la mise à ciel ouvert des zones fortement contaminées.

2. Seuls les procédés de décontamination du corps de la décharge par excavation et traitement permettent d'atteindre les objectifs d'assainissement. Tous les procédés de traitement in-situ sont inappropriés pour réduire de manière suffisante le potentiel important du polluant principal PCB. La distribution hétérogène des PCB, la concentration des PCB sur la partie inférieure de la décharge et le fait que ce polluant est principalement lié à la présence de condensateurs, rend impossible l'applicabilité et l'efficacité de procédés de décontamination in-situ.
3. Les objectifs d'assainissement relatifs à la valorisation optimale des déchets excavés et à la destruction des PCB ne peuvent être atteints que par un prétraitement et conditionnement des déchets. Des essais-pilotes déjà effectués sur des déchets provenant de la Pila et d'autres sites contaminés d'importance et complexité comparable démontrent l'applicabilité et l'efficacité du prétraitement en termes destruction des PCB.
4. Le procédé de décontamination des alluvions par excavation et traitement est le plus sûr et le plus efficace pour réduire au maximum le potentiel de dispersion de polluants, le risque d'émissions par les eaux souterraines ainsi que pour atteindre de manière définitive les objectifs d'assainissement.
5. Sur la base du tableau en Annexe B, les procédés de décontamination in-situ des déchets ne sont pas possibles.
6. Les procédés de décontamination in-situ des alluvions nécessitent des essais-pilotes permettant d'évaluer l'applicabilité des procédés et leur capacité à atteindre les objectifs d'assainissement. La littérature montre que les procédés peuvent être très efficaces dans les cas de décontamination de sites pollués par les PCB. Le taux d'efficacité est cependant très variable en fonction de l'importance de la contamination, de la nature du sous-sol et des co-contaminants présents sur le site. Les risques liés à ces procédés (émissions, sécurité du personnel), le contrôle des processus (produits de dégradation comme dioxines / furanes) de même que la durée et l'efficacité des opérations doivent être clarifiés. Les essais-pilotes ne peuvent être effectués que sur des surfaces déjà assainies par excavation des déchets surmontant les alluvions : Une évaluation détaillée de l'efficacité des procédés de décontamination in-situ des alluvions n'est pas possible au stade actuel.
7. Les procédés in-situ ne permettent pas d'atteindre une décontamination complète des alluvions. Une pollution résiduelle en PCB persistera. Même avec des contrôles serrés, on ne peut pas exclure des zones présentant localement des contaminations supérieures à l'objectif d'assainissement.
8. L'application des procédés identifiés pour l'assainissement d'une éventuelle pollution résiduelle des alluvions (inférieure à l'objectif d'assainissement pour les alluvions, cf. chap. 2.4.3) dépend du projet de remise en état du site. Par exemple, s'il est prévu de créer une zone inondable, les alluvions deviennent l'habitat de la faune piscicole ce qui implique un objectif d'assainissement correspondant au seuil admissible dans les sédiments pour la truite (cf. CSD, rapport final des études complémentaires, 2017 [6]). Dans ce cas, seul le procédé de décontamination par excavation / traitement permet d'atteindre l'objectif d'assainissement correspondant au seul d'intervention dans les sédiments du cours d'eau par rapport aux poissons (correspond à env. 0 ppm PCB). Tous les procédés de décontamination in-situ ou de confinement ne sont pas éprouvés pour atteindre une décontamination proche de 0 ppm PCB.
9. Les procédés de traitement techniquement et économiquement réalisables sur site ne conviennent pas aux matériaux exigeant des étapes de traitement plus complexes en raison de leur hétérogénéité ou de l'importance de la contamination présente.

Les procédés retenus dans le tableau ci-dessous ont été évalués en fonction de leur applicabilité / efficacité sur le site. Les critères d'évaluation sont les suivants :

1. Applicabilité du procédé en comparaison avec d'autres procédés. Possibilité de combiner des procédés.
2. Applicabilité du (des) procédé(s) en fonction des secteurs de la décharge à assainir et du stade de l'assainissement auquel le processus peut intervenir.
3. Durabilité et nécessité de surveillance du processus.

N°	Procédé	Description, applicabilité	Objectif d'assain. Alluvions (ppm PCB)		Périmètre d'ass.		Traitement sur site	Matériel		Applicabilité
			Poll. Résiduelle (à définir)	0 ppm	Site entier	Zone haute		Déchets Alluvions		
A10 + A30	Excavation, prétraitement et mise en décharge	<ul style="list-style-type: none"> L'essai-pilote effectué par Eberhard sur les déchets provenant des mesures préliminaires montre l'efficacité du prétraitement / conditionnement des déchets pour optimiser les volumes valorisables et les coûts d'élimination. Ce procédé a fait ses preuves sur d'autres sites en Suisse (exemples : Kölliken, Bonfol, Stadtmist (SO)). Les étapes du prétraitement possibles sur site sont : le tri à la main, tri, concassage, broyage, conditionnement 	X	X	X	X	X	X	X	Procédé d'assainissement approprié et efficace pour <ul style="list-style-type: none"> Atteindre les objectifs d'assain. Pour tous les périmètres d'assain. Pour tous les types de matériaux
B10-13	Traitement	<ul style="list-style-type: none"> L'essai-pilote effectué par Eberhard sur les déchets provenant des mesures préliminaires montre l'efficacité du prétraitement / conditionnement des déchets pour optimiser les volumes valorisables et les coûts d'élimination. Ce procédé a fait preuve sur d'autres sites en Suisse (exemples : Kölliken, Bonfol, Stadtmist (SO)). Les procédés d'excavation et de traitement sont coûteux mais ils garantissent de répondre entièrement aux objectifs d'assainissement en matière de site contaminé et de déchets. Le procédé permet de réduire le potentiel de polluants pour tous les polluants se trouvant sur le site. Ainsi ce procédé offre une solution optimale relative à l'hétérogénéité de la pollution tant au niveau de la nature et de la distribution spatiale dans le corps de la décharge. Après assainissement et remise en état, le risque pour le bien à protéger eaux de surface est éliminé. 	X	X	X	X	-	X	X	Procédé d'assainissement approprié et efficace pour <ul style="list-style-type: none"> Atteindre les objectifs d'assain. Pour tous les périmètres d'assain. Pour tous les types de matériaux
B21	Lavage (eaux, tensides, acides, bases), lavage à haute pression / extraction chimique	<ul style="list-style-type: none"> L'essai-pilote effectué par Eberhard sur les déchets provenant des mesures préliminaires montre l'efficacité du lavage des fractions minérales issues du prétraitement, Le lavage des matériaux est limité par la présence de déchets inertes poreux. Le lavage est un procédé de traitement efficace et constitue une alternative à la valorisation en cimenterie. 	X	X	X	X	(X)	X	X	Procédé d'assainissement approprié et efficace pour <ul style="list-style-type: none"> Atteindre les objectifs d'assain. Pour tous les périmètres d'assain. Pour la fraction minérale
C82	Déchloration reductive (méthode biorem : Fe ⁰)	<ul style="list-style-type: none"> Ce procédé est spécialement conçu pour le traitement des sédiments. L'injection de Fe⁰ permet la déchloration des PCB. La quantité de Fe⁰ nécessaire à la déchloration n'est pas connue. Le contrôle de produits de dégradation n'est pas clair. Le procédé ne s'applique pas à une éventuelle contamination par les métaux lourds ou hydrocarbures aliphatiques / polycycliques. Des essais-pilotes sont nécessaires pour garantir l'efficacité de la méthode en termes d'objectif d'assainissement 	(X)	-	(X)	(X)	X	-	(X)	Procédé d'assainissement à évaluer par essais-pilote. Applicable pour le site entier ou pour une partie du site, mais uniquement pour les alluvions. Essais-pilotes + assainissement réalisable après avoir enlevé les déchets surmontant les alluvions (procédés B10-13 / B21)
C90	TCH (thermal conductive heating) (ISTD=in situ thermal desorption) ET-DPS (EUREMTECH)	<ul style="list-style-type: none"> Ce procédé s'applique à la zone saturée et non saturée. Il consiste à chauffer électriquement le volume du terrain à traiter puis à volatiliser et pomper par le vide les polluants pour traitement. Le procédé nécessite un confinement étanche de la zone traitée (pas d'échange d'eaux) et un confinement de la surface (volatilisation des polluants) ainsi qu'un traitement des eaux et des gaz. Le traitement exige un confinement total au niveau des eaux, ce qui est difficilement réalisable (contact direct avec les eaux de la Sarine, apport par des flux amont). Des essais-pilotes sont nécessaires pour garantir l'efficacité de la méthode en termes d'objectif d'assainissement. Ces essais-pilotes ne peuvent être réalisées que sur des surfaces libérées par les déchets. 	(X)	-	(X)	(X)	X	-	(X)	Procédé d'assainissement à évaluer par essais-pilote. Applicable pour le site entier ou pour une partie du site, mais uniquement pour les alluvions. Essais-pilotes + assainissement réalisables après avoir enlevé les déchets surmontant les alluvions (procédés B10-13 / B21)
D10	Confinement de surface	<ul style="list-style-type: none"> Ces procédés sont applicables en combinaison avec d'autres pour la sécurisation de surfaces, avec pour objectifs : de réduire les apports d'eaux percolant à travers les déchets laissés sur place, d'empêcher le contact direct et la diffusion des polluants pour limiter leur impact sur les milieux à protéger. 	-	-	Sous condition	-	X	-		Procédés ne permettant pas de réduire le potentiel de polluants comme les PCB à long terme.
D41	Évacuation des eaux (superficielles)	<ul style="list-style-type: none"> Le choix des dispositifs de confinement de la surface est à adapter en fonction de l'exposition de la surface et de la nature des déchets à couvrir. Le dispositif et le choix des matériaux pour le confinement de surface sont tels qu'un entretien et une surveillance à long terme n'est pas nécessaire. 					X			

Tableau 4-1 Identification de procédés d'assainissement. X : faisable et efficace / (x) : moyennement faisable et efficace / - : non applicable

4.3 Prétraitement nécessaire des matériaux

La nécessité de réaliser un traitement préalable des matériaux du site de la Pila et les optimisations qui en découlent (séparation et destruction des polluants, valorisation de certaines fractions) ont été démontrées dans le cadre de l'évacuation et du traitement des matériaux excavés lors des travaux liés à la réalisation des mesures urgentes et à ceux liés aux mesures préliminaires à l'assainissement.

Les procédés de prétraitement ont été testés sur des matériaux fortement pollués (beaucoup de condensateurs) issus des mesures préliminaires à l'assainissement et des mesures urgentes ou sur des matériaux plus faiblement pollués et comportant peu de déchets issus des berges. Ces matériaux ne sont que partiellement représentatifs de l'ensemble du volume de déchets présents dans la décharge.

Toutefois, même en l'absence d'essais-pilotes sur des déchets provenant du corps de la décharge, le traitement préalable des matériaux est indispensable et le concept de tri établi dans le cadre des travaux précédents reste valable.

Une grande partie de la charge en PCB présente dans la décharge de la Pila se trouve dans des condensateurs fermés, de dimensions variables. Ces derniers sont à leur tour englobés dans une matrice de sol très hétérogène : les PCB ne peuvent ainsi pas être éliminés efficacement et détruits par un traitement thermique direct traditionnel.

En effet, si l'on livrait directement ces matériaux à une installation d'incinération à l'étranger, sans traitement préalable, la chaleur ne pourrait pas pénétrer assez rapidement et suffisamment dans les condensateurs et les PCB se trouvant à l'intérieur ne seraient pas détruits. Lors de l'évacuation des résidus d'incinération de ces installations, d'importantes quantités de PCB non détruits seraient déposés en décharge générant une pollution de l'environnement malgré le traitement thermique.

Un prétraitement est donc nécessaire pour assurer l'exposition suffisante des PCB au processus de traitement thermique, condition indispensable pour pouvoir assurer leur destruction. Avant un traitement thermique, le matériau doit être trié de façon à obtenir des fractions les plus homogènes possibles. En particulier, les condensateurs et les batteries, dans lesquels les polluants sont fortement concentrés, doivent être séparés de leur gangue minérale et faire l'objet d'un traitement spécifique dans une installation adaptée permettant de détruire totalement la masse de PCB.

Les enseignements des travaux réalisés depuis 2011 (cf. CSD, 2014) ont permis de tirer les principales conclusions suivantes en relation avec les matériaux présents sur le site de la Pila :

- Bien que théoriquement une teneur en PCB > 10 mg/kg oriente les matériaux vers un traitement thermique, l'hétérogénéité et la composition « inédite » des matériaux en provenance de la Pila ne permet pas leur acheminement en vrac vers une seule installation de traitement thermique : un certain tri préalable est donc indispensable à une acceptation de ces matériaux dans une ou plusieurs installations thermiques.
- Les résultats d'analyses sur le matériel brut ne sont pas fiables car très dépendants de la fraction analysée et de la prise en compte ou non de condensateurs présents dans la masse. Cela génère une insécurité et également un risque de refus de ces matériaux dans l'une ou l'autre installation si la représentativité des analyses pour justifier le choix d'une filière n'est pas garantie.
- Le prétraitement mis en place a permis de séparer les fractions selon leur granulométrie, leur composition et leur contenu en PCB : les matériaux peuvent ainsi être triés de façon à obtenir des fractions minérales homogènes, débarrassées des condensateurs, batteries, métaux et papiers, et donc susceptibles d'exposer le plus efficacement possible les PCB au traitement thermique. Le taux de destruction des PCB de 99.94% obtenu dans le cadre des travaux préalables réalisés n'aurait pas pu être atteint sans ces opérations préalables.

- Le prétraitement permet une réduction de l'ordre de 23% des matériaux transportés à l'étranger, en effet, environ 13% des matériaux traités ont pu être acheminés en cimenterie et 10% en DCB après le prétraitement sur le site de BAZO.
- Le prétraitement permet également de réduire le coût du traitement des matériaux : pour les 1171 tonnes de matériaux amenées dans le cadre de cette opération, le coût aurait été plus élevé de l'ordre de 30% sans prétraitement.
- Pour les fractions graveleuses et peu contaminées par les PCB, un lavage en vue d'une valorisation ultérieure des matériaux est écologiquement et économiquement favorable.

Le schéma ci-dessous, repris d'une présentation de la société ECOSOR, présente le procédé général testé sur les matériaux du site de la Pila :

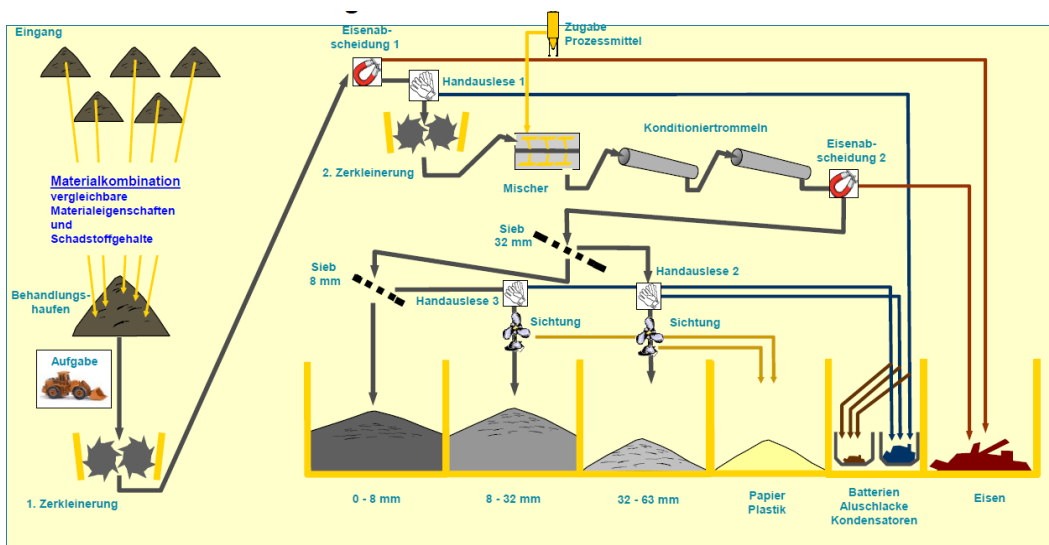


Figure 4-2 Procédé général de traitement sur le site BAZO à Oberglatt

Le prétraitement des matériaux issus des travaux menés sur le site de la Pila et proposé pour la suite poursuit les objectifs suivants :

1. Séparation des condensateurs et des batteries.
2. Séparation des fragments de condensateurs contenant des PCB (bobines de papier imprégnées de PCB et détachées des condensateurs).
3. Tri et classification des matériaux en fractions adaptées au traitement des PCB de manière ciblée (selon la composition et la concentration en PCB).
4. Garantie, par une homogénéité suffisante des fractions triées, des analyses représentatives permettant une déclaration conforme des déchets.
5. Garantie de la sécurité de l'élimination.

4.3.1 Possibilités et contraintes d'un prétraitement sur site

Afin d'évaluer la faisabilité, l'efficacité et la rentabilité d'un prétraitement des matériaux sur le site de la Pila, des discussions préalables ont eu lieu avec différentes entreprises spécialisées dans le domaine du traitement des matériaux pollués. Les questions abordées ont porté sur les aspects pratiques et organisationnels d'un prétraitement sur le site et ont permis d'ajuster les observations réalisées sur le site de la Pila avec des expériences faites sur d'autres sites assainis ou en cours d'assainissement (par exemple décharge Stadtmist, SO).

Faisabilité

Les étapes de prétraitement effectuées sur les matériaux fortement contaminés issus des mesures urgentes et des mesures préliminaires à l'assainissement sont partiellement réalisables sur le site : en particulier, le tri à la main, le concassage, le déferrement, le tamisage, le conditionnement, le séchage et le fractionnement.

Les installations pour le traitement des fractions obtenues après prétraitement pour en réduire la contamination, par exemple des installations thermiques ou de lavage physico-chimique sont disponibles sur le marché (en CH et à l'étranger) ; leur mise en place sur le site est cependant fortement limitée par leur rendement, les contraintes liées aux types de fraction traitables et surtout leur coût.

L'hétérogénéité importante des déchets déposés dans la décharge de la Pila exige un nombre important d'étapes de prétraitement pour obtenir des fractions suffisamment homogènes dans leur nature et leur degré de contamination. La nature des déchets déposés ainsi que la présence de polluants toxiques et persistants sont des facteurs très contraignants au niveau du dispositif de sécurité pour toutes les étapes de travail, de l'excavation au prétraitement / traitement jusqu'au transport.

L'évaluation de la faisabilité d'un traitement sur place doit intégrer les aspects liés à la sécurité comme par exemple la nécessité de construire une halle sécurisée et des installations de traitement pour l'air et les eaux.

À titre de comparaison :

Décharges Stadtmist (SO) : Les exigences liées au prétraitement des matériaux sont pour la Pila plus élevées que pour les matériaux des décharges Stadtmist. Ceux-ci correspondent en grande majorité à des matériaux de catégorie de décharge type B et E selon OLED. Le nombre et le type de prétraitement / traitement sur site sont nettement plus limités.

Bonfol (JU) : Le contenu de la décharge est composé principalement de déchets spéciaux nécessitant un traitement thermique ; la décharge n'enfermait pas d'ordures ménagères. Le prétraitement des matériaux excavés est effectué sous halle sécurisée et comprend le tri, le broyage et la stabilisation des déchets avant envoi en UIDS à l'étranger.

Efficacité :

Le traitement sur place est faisable aussi longtemps que la contrainte principale, le rendement, est garanti. Le rendement des installations est entièrement dicté par le rendement journalier des opérations d'excavation, par la nature des matériaux et par le nombre d'étapes de prétraitement. L'objectif de qualité visé pour les matériaux après traitement et le niveau technique des installations jouent également un rôle important.

Place nécessaire

Les surfaces nécessaires pour un traitement sur le site englobent les installations / infrastructures suivantes :

- Chemins d'accès et de transport
- Places de stockage intermédiaires
- Installation de prétraitement (matériaux pollués, eaux, air)
- Infrastructures (sanitaire, bureau etc)

À titre de comparaison

Décharges Stadtmist : le procédé d'assainissement prévoit des installations de prétraitement à sec (tri, tamis) et humide (lavage). Ces installations ainsi que les places de stockage intermédiaires nécessitent une surface de 50'000 m².

La Pila : la surface disponible sur le site de la décharge est de l'ordre de 18'000 m².

Rentabilité d'une infrastructure de prétraitement sur place

Le caractère économiquement supportable d'un prétraitement sur site des matériaux dépend de la quantité de matériaux à traiter.

En Suisse, plusieurs installations fixes de prétraitement sont capables de traiter des matériaux fortement pollués comme ceux de la Pila, et disposent de toutes les infrastructures permettent de garantir la sécurité nécessaire. La mise en place d'une telle installation sur le site de la Pila devrait, pour être économiquement favorable, pouvoir être réutilisée pour le traitement d'autres matériaux.

Sur le site de la Pila, 70-80 % des déchets comportent des teneurs en PCB < 10 ppm, comme le montrent les chiffres du tableau ci-dessous. Le prétraitement de ce type de déchets nécessite des procédés de tri et de sécurité de moindre envergure que ceux qu'exigent les matériaux fortement pollués et dangereux. De plus, le prétraitement sur place de ce type de matériaux pourrait favoriser la valorisation et l'élimination locale des matériaux traités ce qui réduirait les coûts de transport.

Volumes de matériaux [m ³]	Ensemble de la décharge	Zone haute	Zone basse
PCB < 10 ppm	204'700	115'000	89'000
PCB > 10 ppm	73'500	49'500	23'500
TOTAL	278'200	164'500	112'500

Tableau 4-2 Volumes des matériaux en fonction des classes de contamination < 10 ppm PCB et > 10 ppm PCB.

En fonction des réflexions liées aux coûts et à la place disponible sur le site de la Pila, il semble judicieux de retenir des procédés de prétraitement sur place uniquement pour la catégorie < 10 ppm PCB et d'acheminer les matériaux > 10 ppm PCB vers une installation fixe de traitement.

Selon la variante d'assainissement choisie et le volume à traiter (totalité ou non de la décharge), les installations de prétraitement sur place sont plus coûteuses que l'envoi direct dans une installation de traitement fixe.

4.3.2 Type de matériaux, catégories selon OLED

Les volumes estimés dans le projet d'assainissement 2010 [12] restent actuels car aucune investigation complémentaire n'a été effectuée en relation avec l'élimination des déchets (cf. chap. 2.3.2.3).

	PCB [mg/kg]	Catégories de matériaux	
		Type de traitement possible	
Déchets	0 - 10	Prétraitement nécessaire	<ul style="list-style-type: none"> Valorisation sur le site (< 1 ppm) Élimination en décharge type B Décharges type B, E, Traitement thermique, (UIOM, cimenterie, désorption thermique, UIDS) Valorisation
	10 - 50	Prétraitement nécessaire	<ul style="list-style-type: none"> Lavage physico-chimique Traitement thermique (UIOM, cimenterie*, désorption thermique, UIDS)
	50 – 1'000		<ul style="list-style-type: none"> Traitement thermique (UIOM, cimenterie*, désorption thermique, UIDS)
	>1'000		<ul style="list-style-type: none"> Traitement thermique (UIOM, désorption thermique, UIDS)
Alluvions paléosol	< 1		<ul style="list-style-type: none"> Valorisation sur le site, Prétraitement – traitement, élimination en décharge type B
	> 1		<ul style="list-style-type: none"> Lavage Traitement thermique (désorption thermique, UIDS) Traitement in-situ (nécessite essais-pilote)

Tableau 4-3 Catégories des matériaux sur le site / zone haute classés selon leur teneurs en PCB. * pour des installations disposant d'une autorisation selon Annexe 4 point 1.2 OLED

Dans le cadre d'une analyse plus détaillée, les volumes par catégorie (teneur PCB) sont à subdiviser en fonction des teneurs en ammonium, TOC et métaux lourds. Les teneurs de ces paramètres peuvent orienter des matériaux vers des filières d'acheminement plus spécifiques et, par conséquent, plus coûteuses.

Une classification plus détaillée en tenant compte de ces paramètres est à effectuer sur la base d'essais sur les matériaux représentatifs de la décharge. Cette étape est à intégrer dans le cadre du développement du projet d'assainissement.

4.3.3 Filières d'acheminement envisageables

4.3.3.1 Stockage définitif en décharge contrôlée

1. Décharges contrôlées de type B

Les critères d'acceptation en décharge de type B sont définis par l'Annexe 5, point 2 OLED qui fixe des valeurs limites, résultant d'un test de lixiviation d'une durée de 24 heures réalisé sur un échantillon représentatif des matériaux à mettre en décharge (teneurs totales admissibles), pour 10 métaux lourds, pour 9 paramètres organiques et pour 5 autres paramètres. De plus, la matière sèche qui compose les déchets doit être constituée pour au moins de 95% du poids par des composés minéraux. La fraction de sels solubles ne doit pas dépasser 0.5% en poids.

Valeur limite pour les PCB Σ_6 congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: 1 mg/kg

Compte tenu de la présence d'ordures ménagères et de dépassements fréquents des limites inertes par d'autres paramètres, en particulier l'ammonium et le carbone organique total, seul un volume restreint de la décharge est concerné par cette filière. Sur la base des analyses OTD complètes, seules 6% des analyses de déchets respectent les valeurs limites pour le stockage en décharge de type B.

Exemples d'installations:

- Décharge contrôlée la Tuffière (FR). Distance : 11 km
- Wallenried (FR)

2. Décharge contrôlée de type E

Critères : Les critères d'acceptation en décharge de type E sont définis par l'Annexe 5, point 5 OLED qui fixe des valeurs limites (teneurs totales pour 9 métaux lourds et pour 8 paramètres organiques) et pour certains paramètres résultant d'un test de lixiviation d'une durée de 24 heures. Pour les PCB la valeur limite est la suivante :

Valeur limite pour les PCB Σ_6 congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: 10 mg/kg

Catégories de matériaux concernés : Un volume significatif des matériaux respectant la valeur limite pour les PCB présentent des teneurs en carbone organique et en métaux lourds dépassant les valeurs limites pour la décharge de type E. La fraction organique est essentiellement liée aux ordures ménagères et aux matériaux terreux. Le prétraitement des matériaux permet le fractionnement des matériaux en fonction de leur teneur organique et, pour la fraction minérale, en fonction de la granulométrie (la fraction fine est en général plus contaminée par les métaux lourds), ce qui permet de répondre aux exigences d'une valorisation optimale des déchets en réduisant le volume à éliminer en site de stockage, et de respecter les valeurs limites y relatives.

Exemples d'installations :

- Décharge bioactive de Châtillon (FR) : à proximité immédiate
- Teuftal (BE). Distance : 46 km

4.3.3.2 Traitement thermique

3. Incinération en usine d'incinération d'ordures ménagères

Critères : Les critères d'admissibilité pour des déchets sont définis dans les art. 31 et 32 OLED.

Valeur limite pour les PCB Σ_6 congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: 10 mg/kg

Selon l'information orale d'une UIOM en CH, une telle installation dispose d'une autorisation cantonale pour accepter des déchets jusqu'à 50 ppm PCB. Celle-ci est conditionnée à la mise en place de dispositifs de sécurité qui se traduisent en termes d'équipement par une installation d'épuration des gaz de fumée (adsorption 100% dioxines / furanes et autres polluants organiques) et d'un traitement des scories. L'acceptation de matériaux provenant du site la Pila dans ce type d'installation devrait être évaluée dans le cadre d'un essai-pilote.

Exemples d'installations :

- SAIDEF, Posieux (Châtillon) : immédiatement avoisinant
- KEZO Hinwil (ZH): 190 km.

4. Désorption thermique : cimenterie

Critères : L'Annexe 4 OLED formule les exigences relatives aux déchets utilisés pour la fabrication de ciment et de béton :

- Annexe 4 point 1 : Utilisation de déchets comme matières premières ou agents de correction du cru
- Annexe 4 point 2 : Utilisation des déchets comme combustibles
- Annexe 4 point 3 : Utilisation de déchets comme ajouts et adjuvants

Des valeurs indicatives sont définies pour 12 métaux lourds et les substances organiques.

Valeur limite pour les PCB Σ_6 congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: 10 mg/kg

Selon l'Annexe 4 point 1.2 « L'autorité peut, au cas par cas, autoriser des teneurs supérieures en composés organiques, s'il est prouvé que des mesures appropriées sont prises pour respecter les exigences de l'ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air (OPair) en matière de limitation des émissions des substances concernées. »

Certaines cimenteries disposent d'une autorisation cantonale en termes d'acceptation de PCB jusqu'à 50 ppm. Elles sont alors équipées de filtres à charbon actif pour les dioxines / furanes.

Catégories de matériaux concernés : Le traitement en cimenterie, en tant que substitut au cru, est envisageable pour les matériaux jusqu'à 50 ppm PCB au maximum (selon demande). Les types de matériaux autorisés sont les matériaux d'excavation, béton, déchets minéraux.

Une partie des alluvions, non mélangées à des déchets et dont la teneur en PCB ne dépasse pas 50 ppm, pourrait être évacuée directement en cimenterie, sans traitement préalable. Ceci n'est pas le cas pour les déchets.

Exemples d'installations:

- Holcim Suisse SA, Eclepens (VD)
- Holcim Suisse SA, Siggenthal (AG)

5. Désorption thermique à haute température (500 – 600 ° C)

Critères : La désorption thermique consiste à faire passer à l'état gazeux les polluants organiques présents dans les matériaux (chauffage à 250-600 °C). Les gaz chargés en polluants sont ensuite traités par combustion, condensation ou adsorption de manière à oxyder ou capter les polluants. La désorption thermique est privilégiée dans le cas où les matériaux traités, ne contenant à l'origine pas de contaminants inorganiques ou anthropogènes, peuvent être valorisés. En présence de déchets et de métaux lourds, les matériaux traités ne peuvent pas forcément être valorisés et doivent être évacués dans une filière de stockage définitif.

Matériaux avec des teneurs en PCB $\Sigma 6$ congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: > 100 mg/kg

Catégories de matériaux concernés : Les tests de prétraitement effectués par Ebiox sur les matériaux issus des mesures préliminaires à l'assainissement ont montré l'effet important du tri et du conditionnement des déchets en termes de réduction des volumes des matériaux nécessitant un traitement thermique (désorption). Le prétraitement sépare la fraction minérale hautement contaminée des fractions organiques et des déchets particuliers pollués par les PCB ce qui permet non seulement une valorisation des matériaux minéraux après la désorption thermique mais aussi une réduction optimale d'un traitement ultérieur de ces matériaux.

Exemples :

- ATM, Rotterdam, NL
- SITA Remediation GmbH, Herne, D
- ARE, Deutzen, D
- Theo Pouw Secundaire Bouwstoffen BV, Eemshaven, NL

6. Incinération à haute température (UIDS, 1'000°C)

Critères : Ces installations sont en général prévues pour incinérer les déchets sous forme liquide ou conditionnés en fûts et ne sont pas adaptées au traitement de matériaux terreux.

Exemples :

- Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet (AGR), D-Herten
- HIM GmbH, Biebesheim (D)
- Bayer, Dormagen (D)
- GSB, Ebenhausen (D)
- BASELL / RWE Wesseling (D)
- Tredi, Salaise (F)
- Indaver, Antwerpen (B)
- AVR, Rotterdam (H)
- Fernwärme Wien, Simmeringer Haide (A)

À noter: Les UIDS en Suisse (p.ex. Valorec, Clarint, EMS, Lonza, CIMO, DIER) ne sont équipées que pour des déchets sous forme liquide ou en fûts. Les déchets liquides sont en général pompés directement dans les fours depuis des citernes de stockage, alors que les déchets solides doivent être brûlés en fûts. Les

capacités d'incinération sont réservées dans la plupart des cas aux déchets produits sur le site industriel où des usines sont implantées. Les installations suisses ne sont donc pas adaptées à la prise en charge de quantités supplémentaires importantes de déchets solides.

7. Incinération en four autoclave

Critères : Sans la séparation des condensateurs, une part importante de la charge en PCB ne serait pas détruite lors de l'incinération des déchets dans un four rotatif. Les déchets particuliers comme les piles ou les condensateurs ne sont généralement pas détruits dans un processus d'incinération standard. Le temps de résidence dans le four et l'apport en oxygène sont insuffisants, ce qui ne permet pas de chauffer suffisamment les déchets. Les substances polluantes restent ainsi inaccessibles à la combustion. C'est plus particulièrement le cas pour les déchets contenant des plastiques ou de la cellulose, qui sont carbonisés uniquement à l'extérieur et, ainsi, également isolés thermiquement. Le même phénomène se produit par exemple pour les annuaires téléphoniques, qui ressortent imbrûlés des usines d'incinération des ordures ménagères. Les polluants non détruits se retrouvent ensuite mélangés aux résidus de l'incinération et sont stockés en décharge.

Matériaux avec des teneurs en PCB $\Sigma 6$ congénères x 4.3 (UICPA no): 28, 52, 101, 138, 153, 180: >> 100 mg/kg

Catégories de matériaux concernés : Il s'agit principalement de la fraction condensateurs et déchets de condensateurs provenant du prétraitement des matériaux hautement contaminés provenant de la partie inférieure de la décharge (surtout en zone haute) et dans la zone du hot spot. Les condensateurs peuvent également être présents de manière isolée dans les déchets peu pollués par les PCB.

Exemples :

- Tredi, Salaise (F)
- Tredi, St-Vulbas (F)

4.3.3.3 Lavage physico-chimique

Critères : Le lavage physico-chimique est adapté aux matériaux présentant une fraction minérale valorisable significative (fraction fine < 35%). Les matériaux obtenus en fin de traitement sont constitués d'une part de graviers et sables non pollués qui pourront être valorisés comme matériaux de construction. Les polluants seront retenus dans les fractions fines récupérées dans l'unité de traitement des eaux de l'installation. Après déshydratation, la fraction fine polluée est évacuée vers une filière de stockage ou de traitement.

Expériences d'Ebiox, 2014, sur les matériaux provenant des mesures préliminaires à l'assainissement : le lavage physico-chimique présente une alternative efficace au traitement thermique. Les résultats du lavage dépendent cependant de la porosité (présence de déchets inertes anthropogènes) et les teneurs en PCB avant traitement. Des matériaux graveleux naturels se prêtent donc mieux à un lavage, même en cas de contamination élevée en PCB (> 50 ppm).

5. Identification des variantes d'assainissement

5.1 Secteurs du site contaminé nécessitant un assainissement selon le potentiel de pollution

5.1.1 Flux de PCB depuis la décharge sans assainissement

Les flux de PCB potentiellement émis par la décharge dans la Sarine sans assainissement du site contaminé ont été mis en évidence dans la cadre de l'étude des mesures complémentaires.

Ils sont illustrés ci-dessous :

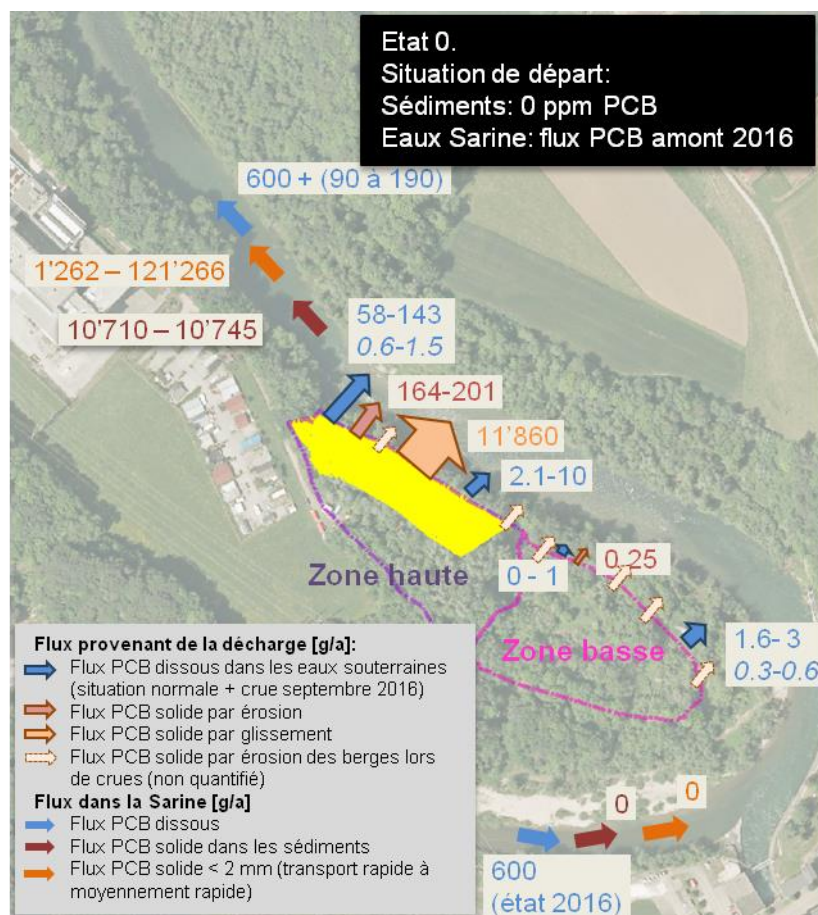


Figure 5-1 Contribution des zones haute et basse de la décharge aux flux de PCB sous forme dissoute et solide. La taille des flèches / texte reflète l'importance du flux

La distribution spatiale des flux PCB sous forme dissoute et solide met en évidence les secteurs de la décharge qui contribuent majoritairement ou exclusivement aux flux susceptibles d'atteindre la Sarine :

1. La zone haute contribue à 100% au flux de PCB sous forme solide par l'effet de glissement. Ce flux a été reconnu comme étant le flux déterminant pour la contamination des sédiments dans la Sarine. Ce flux de PCB sous forme solide est, pour la fraction > 2 mm (valeur encadrée), clairement supérieur au flux admissible pour le seuil « sédiments » défini en relation avec la cible poisson de 6.5 pg/g TEQ05.

2. La zone haute contribue à quasiment 100% du flux de PCB sous forme solide par l'effet d'érosion.
3. La zone haute contribue à 90-95% au flux de PCB sous forme dissoute provenant de l'exfiltration des eaux souterraines. Les flux se concentrent principalement sur la zone hot spot située à l'extrémité nord-ouest de la zone haute.
4. Le flux par érosion des berges des zones haute et basse en cas de crue centennale ou plus n'est pas quantifié. En raison de la topographie, il est cependant plus important sur la zone haute qu'en zone basse.

Comme mis en évidence dans l'étude relative aux mesures complémentaires [6], le flux de PCB sous forme solide provenant de glissements (événements ponctuels) et de l'érosion (processus continu) induit des effets à court, moyen et à très long terme pour la contamination des sédiments et par conséquent pour le poisson.

Pour permettre d'atteindre les objectifs d'assainissement en relation avec le bien à protéger « eaux de surface », les secteurs suivants de la décharge de la Pila doivent être assainis :

1. Zones d'apport de déchets dans le cours d'eau : glissement, érosion des berges ($Q_{max} = Q_{100}$ par ex.), sur l'ensemble du site.
2. Les eaux souterraines s'exfiltrant dans la Sarine avec un dépassement de 10 x les valeurs de concentrations selon l'Annexe 1 OSites à l'aval immédiat du site.

5.1.2 Zones d'apport de déchets dans le cours d'eau

Les zones susceptibles d'un apport direct de déchets dans le cours d'eau correspondent aux secteurs de la décharge exposés au risque de glissement et d'érosion par le cours d'eau en cas de crue ; il s'agit en particulier :

1. Les talus raides (jusqu'à 40°) de la zone haute. Selon le rapport CSD 2017, [6], en cas de crue centennale, une masse de 22'000 m³, comprenant env. 5900 kg PCB, peut être déstabilisée produisant un ou plusieurs glissements.
2. Berges de la zone haute et basse. Une crue extrême pourrait inonder les berges et conduire à une érosion importante des pieds de berges fortement contaminés dans le cas de la zone haute.

5.1.3 Dépassements de 10 x les valeurs de concentrations admises dans les eaux souterraines selon Annexe 1 OSites

Les eaux souterraines sont surveillées depuis 2010 à l'aval du site la Pila au travers de 2 campagnes annuelles en conditions hydrologiques contrastées. Pour compléter ces informations, 2 campagnes englobant la quasi-totalité des sondages du site, réalisées en 2008 (investigations de détail) et en 2016 (investigations complémentaires) ont permis d'évaluer l'évolution des teneurs sur et à l'aval du site de la décharge.

Des dépassements de 10x la valeur de concentration selon Annexe 1 OSites pour les PCB et l'ammonium ont également été constatés au centre de la décharge :

- a. Zone haute : on observe dans plusieurs sondages la présence d'huile hautement contaminée par les PCB flottant à la surface de la nappe.
- b. Zone basse : des dépassements de 10 x la valeur de concentration ont été constatés dans la zone autour du forage F18-08. Dans plusieurs sondages les teneurs se situent entre 0.1 – 1 µg/l.

c. Parties du corps de la décharge et des alluvions susceptibles de générer un dépassement de 10x la valeur de concentration pour les PCB et l'ammonium dans les eaux souterraines à l'aval du site : par exemple:

- Couches profondes et fortement polluées du corps de la décharge de la zone haute, à la hauteur du hot spot
- Dépassements de l'objectif d'assainissement, en période normale, au puits PP1 pour les PCB et l'ammonium et au puits PP2 pour l'ammonium (cf. rapports de surveillance 2014, 2015 et 2016).

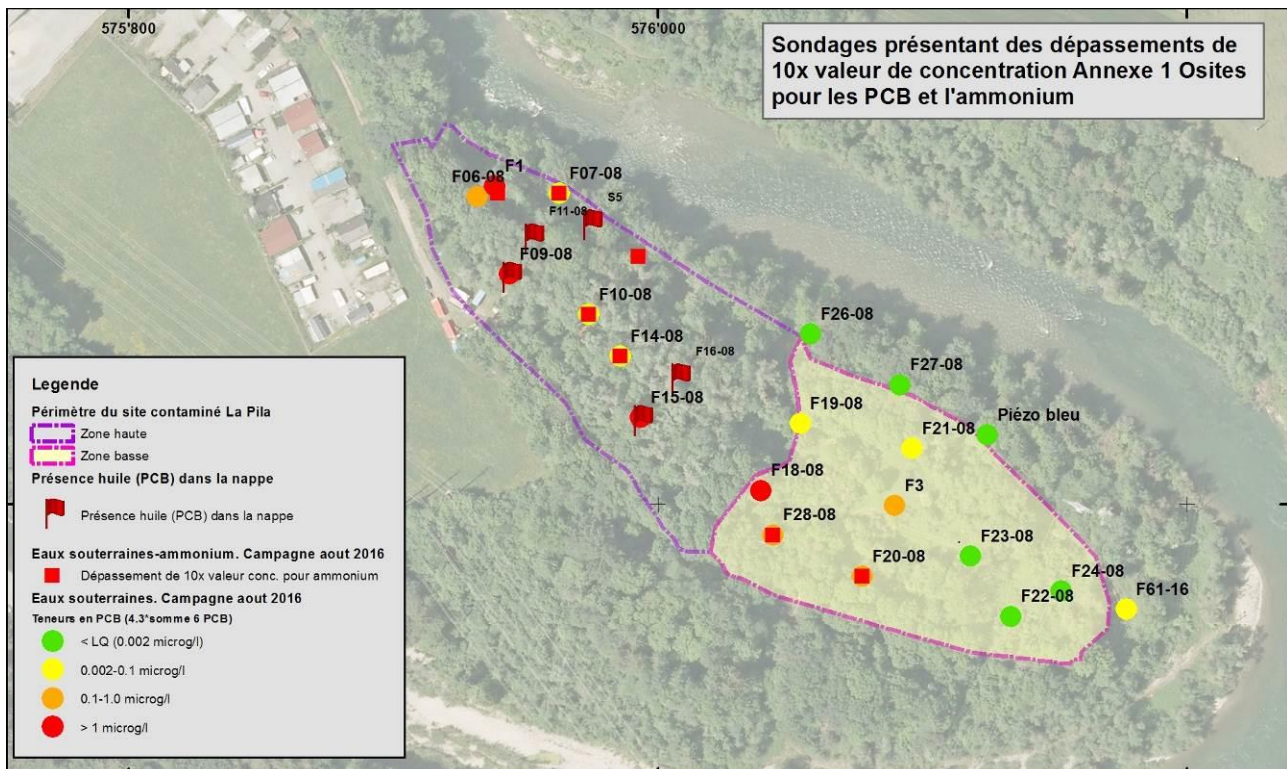


Figure 5-2 Sondages présentant des dépassements de 10 x la valeur de concentration pour le PCB et l'ammonium selon Annexe 1 OSites.

L'objectif d'assainissement relatif aux eaux souterraines doit être respecté à l'aval immédiat du site. Les investigations effectuées jusqu'à présent permettent mettre en évidence la situation suivante pour les zones haute et basse :

Zone haute :

- Depuis le début de la surveillance, le puits PP1, situé dans dans le secteur « hot spot » au nord de la zone haute de la décharge, est contaminé par les PCB à des concentrations moyennes supérieures à 10 fois la valeur de concentration de l'Annexe 1 OSites (10 fois 0.1 µg/L = 1 µg/L). Ceci est le cas en temps normal et en temps de crue.
- Dans les autres puits à l'aval du site PP2, PP3 et PP3, les PCB sont ponctuellement détectés à des concentrations moyennes largement inférieures à 10 fois la valeur de concentration OSites. Ceci est le cas en temps normal et en temps de crue.
- Lors de la campagne du mois d'août 2016, il a été constaté des dépassements des teneurs en ammonium dans 11 piézomètres, avec globalement des teneurs plus élevées dans la zone haute. La

surveillance de la qualité des eaux souterraines (2014-2018) montre également que les concentrations en ammonium au PP1 et PP2 (puits aval de la zone haute) dépassent régulièrement 10 fois la valeur de concentration de l'Annexe 1 OSites (10 fois 0.5 mg/L NH4 = 5 mg/L NH4).

Zone basse :

- a) Dans les piézomètres à l'aval de la zone basse, aucun dépassement de la valeur de concentration pour les PCB n'a pu être constaté, ni en 2008 (investigation de détail) ni en 2016 (investigation complémentaire) ni dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux souterraines (2014-2018). Les piézomètres faisant objet de la surveillance sont quasiment systématiquement inférieurs à la limite de quantification du laboratoire (LQ standard à 0.002 µg/L par congénère).
- b) On a constaté cependant lors de la crue artificielle de 14-15.09.16 une augmentation de la teneur en PCB dissous dans le forage F61-16 à l'aval de la zone basse. Les teneurs analysées peuvent dépasser 5x la valeur de concentration mais restent inférieures à l'objectif d'assainissement c'est-à-dire à 10 fois la valeur de concentration. Lors de crues plus importante ou de crue extrême, un dépassement de 10x la valeur de concentration pour les PCB ne peut pas être exclus.

5.2 Conclusions des études complémentaires

Les résultats des études complémentaires constituent la base à partir de laquelle une intervention sur les compartiments de la décharge à l'origine des flux de PCB déterminants peut être planifiée.

L'influence de mesures d'assainissement sur les émissions de la décharge, et par conséquent l'amélioration attendue sur les compartiments du système Sarine (sédiments, eaux, faune benthique, poissons) en termes de flux et de concentrations, ont ainsi pu être comparées avec un scénario sans assainissement.

Trois scénarios de suppression des flux de PCB depuis la décharge de la Pila ont été élaborés (voir Annexe C) :

Scénario A :

Suppression du flux le plus important : Flux de PCB sous forme solide provenant du glissement et de l'érosion.

Scénario B :

- Suppression des flux provenant de tous les matériaux de la zone de la décharge la plus susceptible de produire des flux PCB sous forme solide et dissous : élimination de la zone haute de la décharge.
- Suppression du flux le plus important de la zone basse : flux de PCB sous forme solide provenant de l'érosion.

Scénario C :

Suppression de tous les flux et de tous les matériaux susceptibles de produire des flux de PCB sous forme solide et dissoute : élimination de la totalité de la décharge.

A priori, en termes de flux déterminant, seule l'élimination du flux PCB sous forme solide des glissements et de l'érosion conduit à une amélioration durable et définitive de tous les compartiments de la Sarine. Le scénario A permet d'atteindre l'objectif d'assainissement pour le système Sarine en termes de flux. Ce scénario ne permet pas de répondre à l'ensemble des objectifs d'assainissement, en particulier ceux liés au respect des valeurs limites de l'OSites dans les eaux souterraines qui s'écoulent dans la Sarine.

Les scénarios B et C éliminent le risque de glissement en supprimant les sources PCB susceptibles de produire des flux de PCB sous forme solide, mais également les flux à l'origine des dépassements des valeurs de concentrations en PCB dissous dans les eaux souterraines.

Les scénarios B et C sont (quasiment) identiques en ce qui concerne la diminution attendue des flux et des concentrations de PCB dans les sédiments superficiels, dans les eaux de la Sarine, dans les eaux souterraines, dans les poissons et la faune benthique. Ces deux scénarios se distinguent par rapport au potentiel de pollution laissé sur place et par rapport au risque résiduel que présente ce potentiel de pollution à long et à très long terme, notamment en relation avec une crue extrême $> T=100$.

La contribution du flux résiduel provenant de la décharge pour le scénario B est insignifiante en comparaison avec le stock de PCB déjà présent dans les sédiments et les flux de PCB provenant de ce stock. Ce flux est également insignifiant si on le compare avec le flux de PCB sous forme solide et dissoute présent dans les eaux de la Sarine à l'amont du site La Pila.

Ces 3 scénarios constituent la base à partir de laquelle les variantes d'assainissement seront élaborées et analysées.

5.3 Identification des variantes techniquement réalisables

Les procédés d'assainissement et combinaisons de procédés identifiés permettent de distinguer au total 2 familles de variantes d'assainissement techniquement réalisables :

Assainissement total du site de la Pila

Assainissement partiel du site de la Pila

Les 2 familles de variantes se distinguent par le périmètre à assainir ; pour ces deux possibilités, les opérations techniquement réalisables et les plus adaptées au site de la Pila sont les suivantes :

1. Excavation
2. Traitement (avec options de prétraitement on site ou off site)
3. Sécurisation du solde de la décharge.

La famille des variantes d'assainissement partiel permet de distinguer 3 sous-variantes principales en fonction de la limite du périmètre d'assainissement et en fonction du flux résiduel acceptable après assainissement. Ce sont donc 4 variantes principales (dont 3 variantes d'assainissement partielles) qui sont présentées ci-après :

Variante 1 : Assainissement du site entier de la Pila. Élimination totale de la contamination.

Cette variante agit sur tous les flux susceptibles d'impacter le système Sarine. Elle correspond au scénario C de suppression des flux PCB (cf. Annexe C). Avec ce scénario, tous les risques résiduels liés au maintien de déchets et matériaux pollués sur le site sont éliminés de manière durable et définitive.

Variante 2 : Assainissement partiel avec élimination totale de la zone haute.

Cette variante correspond au scénario B de suppression des flux PCB (cf. Annexe C). Elle supprime tous les flux de PCB dissous et solides provenant de la zone haute. Les mesures de sécurisation des secteurs laissés sur place et exposés à l'érosion et aux crues de la Sarine réduisent davantage les flux sous forme dissoute et solide.

Variante 3 : Assainissement partiel en éliminant tous les matériaux susceptibles d'atteindre le cours d'eau par glissement, érosion et inondation en cas de crue. Élimination des matériaux sur la zone haute étant à

l'origine de dépassements de 10 x la valeur de concentration pour les PCB (en situation hydraulique normale de la Sarine) jusqu'au toit de la molasse (= excavation complète des déchets + alluvions + graviers interglaciaires). Sécurisation des secteurs laissés sur place et exposés à l'érosion et aux crues de la Sarine.

Cette variante est une combinaison entre les scénarios A et C de suppression des flux PCB (cf. Annexe C). Elle supprime tous les flux PCB sous forme solide (correspond au scénario A) et elle réduit de plus de 90 % le flux sous forme dissoute.

Variante 4 : Assainissement partiel en éliminant uniquement les matériaux susceptibles d'atteindre le cours d'eau par glissement sur la zone haute. Sécurisation des secteurs laissés sur place et exposés à l'érosion et aux crues de la Sarine.

Cette variante correspond au scénario A de suppression des flux PCB (cf. Annexe C). Elle supprime tous les flux à l'origine de la dégradation de la qualité des eaux de la Sarine. Elle ne permet toutefois pas d'atteindre l'objectif de supprimer les dépassements de 10 x la valeur de concentration pour les PCB.

Le tableau suivant résume les 4 variantes possibles :

Variante	1	2	3	4
	Assainissement total du site entier	Assainissement total de la zone haute	Assainissement partiel de la zone haute	Élimination des matériaux de la zone haute susceptibles d'atteindre la Sarine
Déchets	Excavation, prétraitement : A20 / A30 Traitement (après prétraitement) : B10 / B11 / B12 / B21 / Option de prétraitement on-site. Option de valorisation sur site			
Alluvions	Excavation, prétraitement : A20 / A30 Traitement (après prétraitement): B11 / B12 / B13 / B21 Option de prétraitement on-site. Option de valorisation sur site			
Sécurisation solde de la décharge	- Cf. berge / pied de la décharge	D10. Composants du dispositif de confinement de surface définis dans le cadre du projet d'assainissement		
Berge / pied de la décharge	- En fonction de la contamination résiduelle :	Zone haute : D10 + Reconstitution de la nouvelle berge de la Sarine en zone basse. Zone basse : aménagement de la berge.	Zone haute : D10 + Reconstitution de la berge de la Sarine. Zone basse : aménagement de la berge.	D10, D21 Reconstitution et renforcement des berges
A Décontamination totale (décontamination jusqu'à la molasse)	Critères d'aménagement en fonction des contraintes liées à la zone alluviale et au réaménagement des rives	Aménagement des surfaces décontaminées en fonction des contraintes liées à la zone alluviale et au réaménagement des rives.	Aménagement des surfaces décontaminées en fonction des contraintes liées à la zone alluviale et au réaménagement des rives.	-

Variante	1	2	3	4
	Assainissement total du site entier	Assainissement total de la zone haute	Assainissement partiel de la zone haute	Élimination des matériaux de la zone haute susceptibles d'atteindre la Sarine
B Contamination résiduelle dans les alluvions	Recouvrement avec matériaux propres pour empêcher le contact des matériaux pollués avec la faune aquatique. Critères d'aménagement en fonction des contraintes liées à la zone alluviale et au réaménagement des rives.			-

Tableau 5-1 Variantes d'assainissement techniquement réalisables

5.4 Description des variantes techniquement réalisables

5.4.1 Situation actuelle du site

L'état actuel de la décharge est représenté sur les profils figurant en Annexe D (y compris un plan de situation des profils), repris et adaptés dans le descriptif des variantes.

5.4.2 Variante 1 : assainissement total du site

5.4.2.1 Description des mesures d'assainissement

La variante 1 propose la décontamination totale du site de la décharge de la Pila. Il s'agit de la variante développée dans le projet d'assainissement de 2010 (cf. CSD, projet d'assainissement, 2010).

La variante 1 permet d'agir:

1. Sur la totalité du périmètre de la décharge (corps de la décharge + alluvions + graviers interglaciaires), ce qui exclut définitivement le risque d'apport de déchets / polluants dans la Sarine en supprimant les vecteurs de dissémination comme les glissements, l'érosion des talus et des berges en période de crues.
2. Sur tous les flux en provenance de la décharge et des matériaux sous la décharge permettant ainsi d'atteindre de manière durable et définitive des teneurs en PCB et en ammonium inférieures à 10x la valeur de concentration selon Annexe 1 OSites dans les eaux souterraines à l'aval immédiat du site.

Cette variante garantit, de manière durable et définitive, l'élimination du risque d'émission de l'ensemble des polluants présents dans le corps de la décharge et dans les alluvions. Elle correspond au scénario C du rapport des mesures complémentaires (cf. Annexe C).



Figure 5-3 Plan de situation des secteurs à assainir selon scénario C (cf. Rapport mesures complémentaires)

La variante de décontamination totale peut être subdivisée en sous-scénarios en fonction de la contamination résiduelle acceptable en PCB dans les alluvions, liée au projet de remise en état du site après assainissement:

1. L'élimination du corps de la décharge sans mesures de recouvrement permet des mesures de revitalisation du cours d'eau en créant des espaces d'inondation des zones d'alluvions actuellement sous la décharge. La création de zones inondables sans recouvrement implique que la contamination résiduelle des alluvions dans la zone inondable ne doit pas dépasser le seuil « sédiment » 0.04 mg/kg pour la cible poisson de 3.3 pg/g TEQ05.

2. $L_{c_w} = \frac{c_t}{(K_d + \frac{\phi_w}{\rho})}$ l'objectif est d'atteindre une contamination résiduelle en PCB ne produisant pas

un dépassement de 10x la valeur de concentration en PCB dans les eaux souterraines. La teneur totale en PCB (= 4.3 x somme 6 i-PCB) admissible dans les alluvions peut être évalué à l'aide du test de lixiviation virtuel selon l'OSites pour les polluants organiques :

$$c_w = \frac{c_t}{(K_d + \frac{\phi_w}{\rho})}$$

$$K_d \sim f_{oc} \cdot K_{oc}$$

- Cw : concentration du composé dans l'eau interstitiel (lixivié)
 Ct : teneur totale du composé dans l'échantillon solide [mg/kg]
 Kd : coefficient de répartition entre la phase aqueuse et la phase solide [k/kg]. Utilisation des valeurs de la base de données du programme de simulation 1d TransSim 2.0 (OFEV, 2012: *Modèle mathématique de simulation pour l'évaluation du transport des polluants dans les zones insaturées jusqu'à leur arrivée dans les eaux souterraines*)
 Foc : fraction du carbone organique dans l'échantillon solide [-]. La teneur moyenne de tous les analyses effectuées sur les alluvions a été utilisée.

ϕw : Fraction de la phase aqueuse dans le volume totale de l'échantillon solide (=porosité efficace) [-]
 ρ : Densité globale de l'échantillon solide sec [kg/l]

Selon le calcul ci-dessus, une teneur moyenne dans les alluvions de 0.8 mg/kg est susceptible de produire un lixiviat virtuel de 1 $\mu\text{g/l}$.

PCB	koc Transsim	Ct [mg/kg]	Cw [$\mu\text{g/l}$]	foc moyen alluvions	0.32%
28	96'930	0.03	0.095	ϕw	0.1
52	175'200	0.05	0.095	ρ	2
101	528'000	0.05	0.030	ρw	1
138	1'794'000	0.04	0.007		
153	1'580'000	0.02	0.004		
180	5'122'000	-	0.000		
Teneur totale		0.83	1.0		

Figure 5-4 Lixiviat virtuel : détermination du Lixiviat virtuel de 1 $\mu\text{g/l}$

Le nombre d'échantillons, analysés dans le cadre de l'investigation de détail, reflète le degré de contamination des alluvions : sur 60 échantillons, 11 dépassent 1 mg/kg et 23 dépassent 0.1 mg/kg. Plus des 2/3 des échantillons présentent des teneurs inférieures à 0.8 mg/kg. Environ 1/3 des échantillons montrent des concentrations en PCB inférieures à la limite de quantification (0.002 mg/kg). Deux secteurs pour lesquels les teneurs sont supérieures à 1 ppm PCB dans les alluvions ont été mis en évidence (cf. figure ci-dessus). En excavant la totalité des alluvions dans ces endroits ainsi que localement dans les zones présentant des teneurs > 0.8 mg/kg, le risque d'un dépassement de 1 $\mu\text{g/l}$ PCB dissous est supprimé.

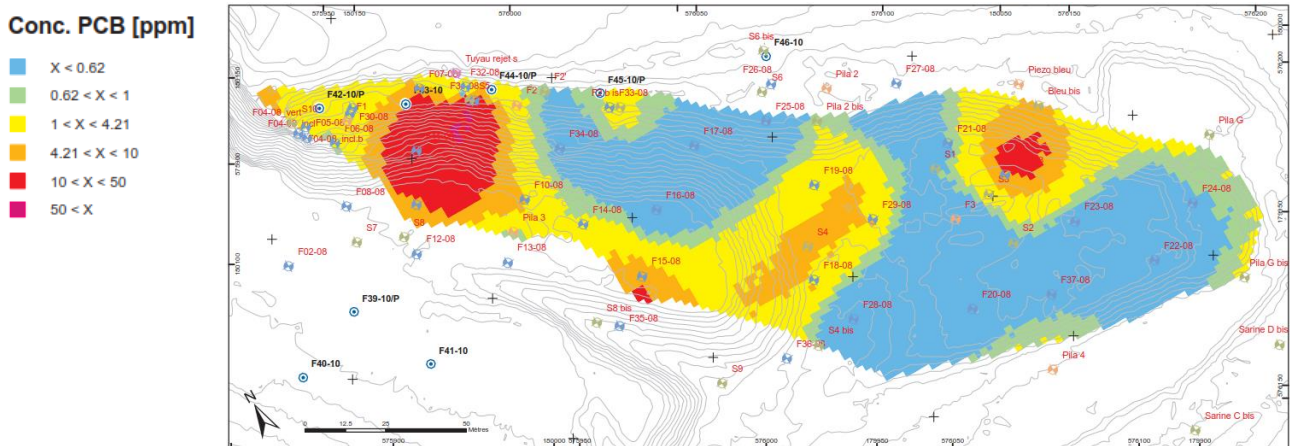


Figure 5.5 Extrait de l'investigation de détail [15] . Couche des alluvions de 565 – 567 m.s.m.

La teneur maximale admissible de 0.8 mg/kg dans les alluvions est cependant nettement supérieure au seuil « sédiment » pour la cible poisson de 3.3 pg/g TEQ05. En fonction de la teneur résiduelle en PCB dans les alluvions laissés sur place dans les zones inondables et de la configuration future du site, des mesures de sécurisation s'imposent pour les zones potentiellement inondables en cas de crue comme le remblayage avec des matériaux propres et l'enrochement des berges.

5.4.2.2 Mesures de remise en état / remise en culture / végétalisation

Le remise en état / végétalisation de l'ensemble du site devra être planifiée en relation avec la situation du site en zone alluviale, en fonction des contraintes liées à la pollution résiduelle dans les alluvions et, par conséquent, au réaménagement des rives (couverture des alluvions, préservation des zones inondables et contact possible de la faune piscicole avec le futur fond de terrassement).

Un apport de matériaux propres pour la reconstitution des berges est indispensable. Les surfaces et volumes à considérer ainsi que les caractéristiques de la couche de remise en culture dépendront du type de végétalisation définie dans le cadre de la revitalisation du site.

5.4.2.3 Suivi et surveillance post-assainissement

La variante 1 ne prévoit aucune mise en place d'installation de traitement post-assainissement.

En raison de la suppression totale du volume de déchets, le programme de surveillance de la qualité des eaux souterraines et de la Sarine est limité à 20 ans après l'assainissement. Il englobe les travaux suivants :

1. Surveillance de la qualité des eaux souterraines.
 - 1.1. 5 sondages à l'aval (actuel) du site.
 - 1.2. Programme de surveillance plus serré les 10 premières années, puis adaptation du rythme de prélèvement. Paramètres principaux à surveiller : PCB, ammonium
2. Surveillance de la qualité des eaux de la Sarine à l'aide de capteurs passifs.
 - 2.1. Programme de surveillance plus serré les 10 premières années, puis adaptation du rythme de prélèvement.
3. Travaux d'entretien du site.
 - 3.1. Contrôles visuels réguliers du site.
 - 3.2. Contrôles des berges en périodes de crue.
 - 3.3. Travaux de réfection de berges, talus.
 - 3.4. Travaux d'entretien de la végétation.

5.4.2.4 Volumes de déchets et masses de PCB éliminés

Le tableau suivant présente les volumes et les masses de PCB excavés puis éliminés par cette variante, regroupés en fonction des différentes classes de concentrations PCB.

Catégorie	PCB [mg/kg ms]	Volume avec erreur max. sur classes PCB > 10 ppm			Masse PCB: multiplication du volume avec teneur moyenne de la catégorie. Densité: 1.8		
		Volume Geostat. 2009	Erreur sur la moyenne		Concentration moyenne des catégories	Masse PCB	
		[m3]			[m3]	[mg/kg]	[kg]
1	x < 0.1	50'300	17%	-6'413	43887	0.05	5
2	0.1 < x < 1	60'900	9%	-3'395	57'505	0.55	60
3	1 < x < 10	93'500	7%	-2'641	90859	5.50	930
4	10 < x < 50	48'500	11%	5'335	53835	30.00	2'620
5	50 < x < 1000	20'600	23%	4'738	25'338	525.00	19'470
6	1000 < x	4'400	54%	2'376	6'776	1000.00	7'920
total		278'200			278'200		31'005

Tableau 5-2 Variante 1 : Volumes / masses excavés en fonction des classes de concentration PCB (géostatistique 2009 et 2010).

Au total, un volume de 280'000 m³ de déchets et d'alluvions contaminés par les PCB et contenant une masse moyenne de 31 t de PCB, soit la totalité des déchets et polluants présents sur le site, est éliminée..

Dans le tableau suivant, les volumes sont indiqués par type de matériaux (déchets + alluvions / graviers interglaciaires). Les volumes des 2 types ont été estimés par modélisation 3D. La densité moyenne de chaque type de matériaux a été estimée à 1.8 t/m³. Pour chaque classe et type de matériaux, les volumes des classes > 10 ppm PCB ont été maximisés pour tenir compte de l'incertitude liée à l'estimation du volume des classes de matériaux les plus contaminées (cf. description au chap. 2.3.2.1). Les chiffres présentés dans ce tableau constituent la base à partir de laquelle le calcul des coûts de transport et d'élimination ont été estimés.

Volume / masse total: déchets + alluvions + graviers interglacières					Déchets: erreur max sur la masse des classes PCB > 10 ppm			Alluvions: erreur max. sur la masse des catégories > 10 ppm		
Cat.	Conc. PCB [mg/kg]	Volume total [m3]	Masse total (ρ=1.8t/m3) [t]	Masse déchets [t]	Masse alluvions + graviers [t]	Erreur sur la moyenne	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse
1	x < 0.1	50'300	90'540	64'236	26'304	17%	-8'190	56'046	-3'354	22'950
2	0.1 < x < 1	60'900	109'620	77'773	31'847	9%	-4'336	73'437	-1'775	30'071
3	1 < x < 10	93'500	168'300	119'405	48'895	7%	-3'372	116'033	-1'381	47'514
4	10 < x < 50	48'500	87'300	61'937	25'363	11%	6'813.12	68'751	2'789.88	28'152
5	50 < x < 1000	20'600	37'080	26'307	10'773	23%	6'050.72	32'358	2'477.68	13'250
6	1000 < x	4'400	7'920	5'619	2'301	54%	3'034.30	8'653	1'242.50	3'543
TOTAL		278'200	500'760	355'279	145'481			355'279		145'481
<i>Répartition en fonction des matériaux</i>										
				Volume déchets		197'377				
				Volume alluvions + graviers		80'823				

Tableau 5.3 Variante 1 : Volumes de déchets et masses de PCB présents dans la décharge. En jaune : masses des catégories PCB retenues pour l'estimation des coûts de transport et d'élimination (cf. chap. 5.4.2.7)

5.4.2.5 Flux résiduel

En supprimant la totalité des déchets, les alluvions et les graviers interglaciaires, tous les flux de polluants sous forme solide sont supprimés.

5.4.2.6 Effet sur la qualité des eaux de la Sarine

Le flux résiduel de PCB sous forme dissoute dépend la contamination résiduelle acceptable en PCB dans les alluvions (cf. chap. 5.4.2.1).

L'effet de la suppression de tous les flux PCB est décrit dans [6], chap. 8 (scénario C de suppression des flux) et peut également être consulté en Annexe C. La suppression de tous les flux pouvant impacter les sédiments à long terme a un effet immédiat sur le système Sarine: le stock de PCB présent dans les sédiments n'est plus alimenté et se réduit pour disparaître progressivement, selon les estimations, entre quelques dizaines à une centaine d'années. Les effets sur la qualité des eaux de la Sarine, sur la faune benthique et le poisson suivent cette diminution (cf. graphiques de l'influence des scénarios sur les flux PCB en Annexe C).

5.4.2.7 Estimations des coûts

L'estimation détaillée des coûts de la variante 1 figure en Annexe H .

Les coûts de transport et d'élimination ont été calculés sur la base des volumes « maximisés » pour les classes supérieures à 10 ppm PCB. La prise en compte des incertitudes dans l'estimation des coûts permet de tenir compte des grandes incertitudes exprimées par l'étude géostatistique, de la forte hétérogénéité de la nature des déchets et de la répartition spatiale des PCB, ainsi que de la répartition des volumes ne tenant pas compte des autres polluants comme les métaux lourds, mais qui peuvent cependant influencer le choix de la filière d'élimination. La différenciation plus détaillée des volumes en fonction d'autres paramètres (métaux lourds ou l'ammonium), comme cela avait été présenté dans le projet d'assainissement de 2010 [12], n'a pas été retenue au stade de l'étude de variantes.

Les prix unitaires d'élimination utilisés se basent d'une part sur les prix du marché (réalisation des mesures préliminaires à l'assainissement en 2013, appels d'offre), et, d'autre part, sur les expériences faites sur le prétraitement des déchets effectué dans le cadre des mesures préliminaires à l'assainissement [10].

Le prix d'une éventuelle halle sécurisée, pour les travaux d'excavation ou de prétraitement sur le site, n'est pas considéré.

Les prix unitaires correspondent aux prix usuels du marché.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse du détail du tableau figurant en Annexe H.

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	19'100'000
Travaux de terrassement	39'100'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	130'300'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	5'100'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	1'900'000
Total variante 1 CHF HT (selon Annexe H, arrondi)	195'500'000

Tableau 5.4 Estimation des coûts pour la variante 1

5.4.3 Variante 2: assainissement partiel du site contaminé

5.4.3.1 Description des mesures d'assainissement

La variante 2 est représentée sur les plans et profils figurant en Annexe E :

- Plans d'assainissement par couche géostatistique
- Profils 10, 11, 12 :
- Profil 6 état futur (zone basse)

La variante 2 consiste en un **assainissement partiel de la décharge** avec une élimination totale de tous les matériaux pollués composant la zone haute de la décharge.

Pour simplifier la présentation de la variante, seule l'option d'une décontamination totale de la zone haute (sans contamination résiduelle) est considérée ci-après, ce qui signifie que la totalité des alluvions et graviers interglaciaires est excavée.

Les étapes de l'assainissement sont les suivantes :

1. Excavation totale de la zone haute jusqu'au toit de la molasse, avec une pente d'environ 30° du talus vers la zone basse.
2. Reconstitution de la berge : remplacement avec des matériaux propres, végétalisation et renforcement avec enrochement jusqu'au niveau des basses eaux, création d'une piste d'accès à la hauteur de Q1'000 (correspondant à env. 570 msm).
3. Remodelage du solde de la décharge en enlevant sur la totalité une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m.
4. Aménagement de la berge de la zone basse en direction Sarine : excavation de déchets le long de la limite, remplacement avec matériaux propres, création d'une piste d'accès, végétalisation et renforcement avec un enrochement.
5. Confinement/sécurisation peu à moyennement perméable du solde de la décharge, mise en œuvre d'horizons de sol et végétalisation de l'ensemble du solde de la décharge.

Pour le point 1 :

La limite du périmètre d'assainissement de la zone haute se situe approximativement au droit du profil 5 qui représente la séparation entre la zone haute et basse (cf. chap. 2.3.2.3).

Les volumes excavés et, par conséquent, la topographie finale du talus dépendent de différents critères à affiner dans la suite du développement du projet, notamment:

- minimiser le potentiel de libération de polluants (sous forme solide et liquide) le long de la nouvelle limite aval du corps de la décharge restant en place ;
- respecter les objectifs d'assainissement le long de la nouvelle limite aval. La contamination restant sur place ne doit pas entraîner une nécessité d'assainissement ;
- supprimer des zones hautement contaminées par les PCB dans la zone basse, situées à la surface ou proche de la surface du nouveau talus ;
- réserver une distance de sécurité suffisamment importante par rapport aux zones les plus contaminées de la zone basse (corps de la décharge restant sur place) ;

- créer une pente < 30° ou des bermes intermédiaires pour faciliter la sécurisation et l'entretien du nouveau talus

Les plans et profils joints en Annexe E et utilisés pour visualiser l'application de ces critères se basent sur les données géostatistiques de 2009 / 2010. La délimitation précise devra, le cas échéant, faire l'objet d'investigations complémentaires dans le cadre du développement du projet d'assainissement.

5.4.3.2 Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation

Les mesures de confinement et de sécurisation font partie intégrante des mesures d'assainissement de la partie de la décharge restant en place :

1. Excavation pour réglage et remodelage de la surface du solde de la décharge. Estimation : 1 m.
2. Talus vers la Sarine (zone haute) : confinement de surface moyennement imperméable.
3. Berge zone haute : pied de la décharge (futur accès à la zone haute) : Situation altimétrique env. 570 msm ce qui correspond au niveau d'eau de la Sarine moyen en cas de Q1'000 (cf. Annexe J). Sécurisation de la berge avec tapis de blocs.
4. Solde de la décharge (zone haute et zone basse) : confinement peu / moyennement perméable de la surface (type de confinement à définir dans le cadre de la détermination définitive des objectifs d'assainissement lors du projet d'assainissement). Stabilisation de la berge probablement pas nécessaire (cf. Annexe J).

Les mesures de confinement des surfaces des parties de la décharge laissées sur place ont pour **objectifs** (par ordre d'importance) de :

- Supprimer de manière durable tout flux sous forme solide (glissement, érosion).
- Empêcher le contact direct avec des déchets fortement contaminés et permettre la végétalisation du solde de la décharge
- Minimiser la pénétration des eaux météoriques afin de réduire l'apport de lixiviat dans les eaux souterraines (vecteur principal de la contamination des eaux souterraines).

La réduction de l'apport de lixiviats n'est pas un critère indispensable pour atteindre l'objectif d'assainissement de 10x la valeur de concentration pour les **PCB** selon annexe 1 OSites. L'excavation des matériaux hautement pollués dans la zone du hot-spot est la mesure décisive pour atteindre cet objectif en temps normal et en temps de crue.

La réduction de l'apport de lixiviats permet, à tout moment, que le degré de contamination de la nappe par les PCB soit nettement inférieur que celui observé à l'état actuel (cf. chap. flux résiduel). En cas de crue extrême, l'augmentation des concentrations reste un phénomène local aux endroits où le niveau de la nappe peut atteindre la base des déchets et / ou la couche d'alluvions fortement polluée sous les déchets. Cette augmentation est limitée dans l'espace et dans le temps (cf. chap. crue extrême).

L'excavation de l'entier de la zone haute ainsi que le confinement, même moyennement perméable, du solde des matériaux réduisent également considérablement les concentrations en **ammonium** dans les eaux souterraines.

La sécurisation des berges du côté du nouveau versant de la zone basse prévoit :

- La mise en place de matériaux propres jusqu'au niveau des hautes eaux de la Sarine.

- Le renforcement du talus est prévu jusqu'à l'altitude des niveaux d'eau atteints en cas de crue de temps de retour de 10-30 ans. Option : remonter jusqu'au niveau d'eau de Q1'000 (570 msm). Stabilisation du pied de berge sur 2.5 m sous le fond du lit au minimum et mise en place un tapis de blocs qui pourra se réarranger afin de remblayer la zone affouillée (cf. Annexe J).

Ces mesures permettent de répondre à plusieurs objectifs :

- Sécurisation du solde de la décharge contre l'érosion pour tous les cas de figure
- Réduction maximale de l'infiltration des eaux de la Sarine en cas de crue
- Éloignement du pied de la décharge de la Sarine
- Couches de remise en culture / végétalisation

La remise en état / végétalisation de la zone haute, entièrement excavée, devra être étudiée en marge du projet d'assainissement, en relation avec la situation du site en zone alluviale et en fonction des contraintes liées au réaménagement des rives (couverture des alluvions, préservation des zones inondables et contact possible de la faune piscicole avec le futur fond de terrassement).

Concernant le solde de la décharge laissé en place (zone basse), la durabilité et le bon fonctionnement des mesures de confinement sont étroitement liés aux types de végétalisation. La végétalisation joue également un rôle important dans la gestion hydrique au sein de la couche d'étanchéité qui est soumise au risque d'assèchement. Par conséquent, la végétation a également un effet de protection contre l'érosion.

Afin de réduire au maximum un endommagement de la couche protectrice de surface, seule une culture de plantes herbacées est prévue (et retenue dans l'estimation des coûts).

Les caractéristiques du site, son affectation future et le type de végétation choisi détermineront les épaisseurs et les caractéristiques des couches de remise en culture. Dans le cadre du présent concept, une couche de sol constituée d'un horizon A de 30 cm et d'un horizon B de 20 cm a été retenue.

5.4.3.3 Suivi et surveillance post-assainissement

La variante 2 ne prévoit aucune mise en place d'installation de traitement post-assainissement.

Le suivi et la surveillance post-assainissement a été estimée pour une durée de 100 ans après l'assainissement et englobe les travaux suivants :

1. Surveillance de la qualité des eaux souterraines.
 - 1.1. 5 sondages à l'aval (actuel) du site, à renouveler tous les 20 ans.
 - 1.2. Programme de surveillance plus serré les 10 premières années, puis adaptation du rythme de prélèvement. Paramètres principaux à surveiller : PCB, ammonium
2. Surveillance de la qualité des eaux de la Sarine à l'aide de capteurs passifs
 - 2.1. Programme de surveillance plus serré les 10 premières années, puis adaptation du rythme de prélèvement.
3. Travaux d'entretien du site :
 - 3.1. Contrôles visuels réguliers du site.
 - 3.2. Contrôles des berges en périodes de crues.
 - 3.3. Travaux de réfection de berges, talus.
 - 3.4. Travaux d'entretien de la végétation.

5.4.3.4 Volumes de déchets et masses de PCB éliminés

Le tableau suivant résume les volumes totaux à éliminer pour :

1. L'assainissement de la zone haute : Excavation des déchets, alluvions et graviers interglaciaires jusqu'au toit de la molasse.
2. Le réglage des surfaces du solde de la décharge: on admet qu'une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m doit être éliminée pour égalisation / remodelage de la surface.

Le tableau compare les volumes et les masses PCB éliminés de la variante 2 et de l'assainissement total du site (= variante 1). En termes de volume et de masse PCB estimée le solde restant sur place est de :

Solde du volume de déchets laissé sur place 32 %

→ 68% du total est éliminé

Solde de la masse de PCB laissée sur place : 18%

→ 82 % du total est éliminé

Variante 2	Déchets	Alluvions	Graviers intergl.	Déchets+alluvions+ graviers intergl.	Déchets + alluvions + graviers intergl.
	Volume	Volume	Volume	Volume	Masse PCB
	[m3]	[m3]	[m3]	[m3]	[kg]
Zone haute	138374	26000	8026	172400	24802
Talus berl.	200			200	350
Zone basse: réglage talus	5280			5280	145
Zone basse: réglage surface plate	7320			7320	
Volume / Masse PCB éliminé	151174	26000	8026	185200	25297
Volume/ Masse PCB totale (=var. 1)	197380	66150	8026	271556	31005
Solde laissé sur place	46206	40150	-	86356	5708
Solde laissé sur place en %	23%	61%	0%	32%	18%

Tableau 5.5 Variante 2 : Synthèse des volumes et masses PCB éliminés et laissés en place.

Les volumes / masses des matériaux excavés sont présentés dans les tableaux ci-dessous en fonction des classes de PCB (études géostatistiques 2009 et 2010) et en fonction des types de matériaux (2^{ème} tableau). Comme pour la variante 1, les erreurs relatives sur la moyenne des catégories sont reprises des études géostatistiques. Comme les volumes éliminés de la zone haute priment sur les volumes du réglage des surfaces du solde de la décharge, les erreurs sur la moyenne des catégories de la zone haute (étude géostatistique 2010 [13]) ont été retenues dans le tableau suivant.

Catégorie	PCB [mg/kg ms]	Volume [m3]		Volume avec erreur (+) sur classes > 10 ppm		Masse PCB: multiplication du volume avec teneur moyenne de la catégorie. Densité: 1.8	
		Moyenne	Erreur sur la moyenne	Concentration moyenne des catégories	Masse PCB. Moyenne		
		[m3]		[m3]		[mg/kg]	[kg]
1	$x < 0.1$	26800	24%	-6'116	20'684	0.05	2
2	$0.1 < x < 1$	34'400	13%	-3'432	30'968	0.55	30
3	$1 < x < 10$	57'900	9%	-2'279	55'621	5.50	573
4	$10 < x < 50$	33'500	13%	4'486	37'986	30.00	1'809
5	$50 < x < 1000$	15'500	29%	4'459	19'959	525.00	14'648
6	$1000 < x$	4'300	67%	2'882	7'182	1000.00	7'740
		172'400		172'400			24'802

Tableau 5.6 Variante 2 : Volume de déchets et d'alluvions présents dans la zone haute en fonction des classes de concentration en PCB (géostatistique 2009 et 2010).

Volume / masse total: déchets + alluvions + graviers interglacières						Déchets: erreur max sur la masse des classes PCB > 10 ppm			Alluvions: erreur max. sur la masse des catégories > 10 ppm	
Catégorie	Concentration PCB	Volume total	Masse total ($\rho=1.8t/m^3$)	Masse déchets	Masse alluvions + graviers	Erreur sur la moyenne	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse
	[mg/kg]	[m3]	[t]	[t]	[t]		[t]	[t]	[t]	[t]
1	$x < 0.1$	27'442	49'400	40'300	9'100	24%	-9'033	31'267	-2'037	7'063
2	$0.1 < x < 1$	34'815	62'700	51'200	11'500	13%	-5'069	46'131	-1'143	10'357
3	$1 < x < 10$	69'211	124'600	101'700	22'900	9%	-3'367	98'333	-759	22'141
4	$10 < x < 50$	33'710	60'700	49'500	11'200	13%	6'435	55'935	1'456	12'656
5	$50 < x < 1000$	15'522	27'900	22'800	5'100	29%	6'612	29'412	1'479	6'579
6	$1000 < x$	4'500	8'100	6'600	1'500	67%	4'422	11'022	1'005	2'505
TOTAL		185'200	333'360	272'100	61'300			272'100		61'300

Répartition en fonction des matériaux
 Volume déchets
 Volume alluvions + graviers

Tableau 5.7 Variante 2 : Volume total de déchets et d'alluvions excavés pour la variante 2 et masses correspondantes par catégories

5.4.3.5 Flux résiduel

A Situation normale

Comparée à l'état sans assainissement (état 0) cette variante permet de :

1. Supprimer le 100% du flux de PCB sous forme solide.
2. Réduire de 99% le flux de PCB sous forme dissoute.
3. Supprimer les flux d'eaux souterraines présentant des teneurs supérieures à 10x la valeur de concentration de l'OSites pour les PCB à l'aval immédiat du site.

Le flux résiduel est calculé sur la base des résultats pour l'état 0 de l'étude complémentaire [6] annexe 5.3 (Modèle hydrogéologique).

	Flux hydraulique (m3/semaine)		Concentration en PCB dissous 4.3.6 PCB (ng/l)		Flux de PCB (g/semaine)			
					Etat 0			
	Semaine	Turb.	moy.	max.	Semaine normale	Turbinage	moy.	max.
segF61	2'256	1'084	14	26	0.03	0.06	0.02	0.03
segPB	1'014	586	3	17	0.00	0.02	0.00	0.01
segF27	1'112	593	0.3	3	0.00	0.00	0.00	0.00
PalPP4	282	161	75	300	0.02	0.08	0.01	0.05
PalPP3	254	116	50	271	0.01	0.07	0.01	0.03
PalPP2	136	68	42	280	0.01	0.04	0.00	0.02
PalF07-PP1	457	215	1'572	3'883	0.72	1.77	0.34	0.83
PalF05-PP1	253	144	1'572	3'883	0.40	0.98	0.23	0.56
Somme [semaine]	5'764	2'967			1.2	3.0	0.6	1.5
Somme[année]	299'728	154'299			62	157	31	80
somme zone haute (+ zone hot spot) année	71'864	36'586			60	153		78
somme zone basse. Par année	227'864	117'713			2	4		2

Tableau 5.8 Flux PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine pour l'état 0 (rapport [6], figure 6-3). Les concentrations sont les moyennes / maximales analysées dans la période 2012-2016 .

À l'état 0, la zone haute contribue à 97 % du flux total de PCB dissous. En supprimant la zone haute (excavation), le flux résiduel de PCB dissous est réduit à 3 % du flux initial.

Avec le confinement, le flux PCB dissous résiduel est encore réduit. En fonction du type de confinement de la zone basse on peut s'attendre à une réduction de l'infiltration des eaux météoriques d'environ 80-90 % (de la pluie totale).

La réduction du flux PCB dissous par le confinement est évaluée sur la base suivante : le PCB dissous dans la nappe provient en grande partie de l'infiltration de lixiviats de la décharge. Le confinement de surface provoque une réduction du flux hydraulique et, par conséquent, une réduction du flux de PCB atteignant la nappe. Malgré le fait que le confinement de la décharge produise une augmentation des concentrations de polluants dans le lixiviat, il peut être admis grossièrement que la réduction du flux d'eau résiduel conduit à une réduction similaire du flux PCB résiduel après confinement. En admettant que seule une part de 20% de la pluie totale s'infiltré après confinement (comparé à 60% sans confinement, selon le modèle hydrogéologique), le flux PCB dissous se réduit à 1/3 du flux sans confinement.

Ainsi, le flux résiduel de PCB dissous après assainissement et confinement est réduit de 99 % ce qui correspond à un flux total de PCB dissous de 1 g/ an.

	Flux	Flux zone haute	Flux zone basse	Flux total
		[g/an]	[g/an]	[g/an]
Avant assainissement	Situation normale	153	4	157
	Turbinage	78	2	80
Après assainissement	Situation normale	0	4	4
	Turbinage	0	2	2
Réduction du flux	Situation normale	100%	0%	97%
	Turbinage	100%	0%	97%
Après confinement	Situation normale	0	1.4	1
	Turbinage	0	0.7	1
Réduction du flux	Situation normale	100%	67%	99%
	Turbinage	100%	67%	99%

Tableau 5.9 Flux de PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine (calcul avec concentrations maximales indiquées dans le Tableau 5.8), avant et après assainissement (excavation).

B Situation de crue, crue extrême Q1'000

En cas de crue 2 scénarios ont été étudiés :

1. Crue septembre 2016. Cf. rapport modèle hydrogéologique (Rapport des études complémentaires, annexe 5.3).

Le flux résiduel de PCB dissous a été estimé pour l'état 0 (avant les mesures préliminaires à l'assainissement) avec les concentrations maximales analysées dans les sondages en aval du site lors de cette crue.

2. Crue Q1'000.

Le flux résiduel de PCB dissous se base sur les flux hydrauliques calculés pour une crue Q1'000. Les détails sont discutés en Annexe J. À noter que le modèle hydrogéologique n'est pas validé ni pour la situation avant les mesures d'assainissement, ni pour les situations en cas de crues importantes.

Le tableau suivant présente les flux hydrauliques et de PCB dissous pour la durée de 3 jours de la crue extrême Q1'000.

Crue septembre 2016	Flux hydraulique (m3/3j)	Concentration en PCB dissous 4.3 Σ 6PCB (ng/l)	Flux de PCB (g/3j)
	crue sept. 2016	Teneurs max. crue	crue sept. 16
segF61	1'246	507	0.6
segPB	495	10	0.0
segF27	603	4	0.0
PalPP4	161	300	0.0
PalPP3	162	271	0.0
PalPP2	84	280	0.0
PalF07-PP1	269	3'883	1.0
PalF05-PP1	118	3'883	0.5
Σ Zone basse	2'344		0.6
Σ Zone haute	795		2.3
Σ totale	3'139		2.9

Crue Q1'000	Flux hydraulique (m3/3j)	Concentration en PCB dissous 4.3 Σ 6PCB (ng/l)	Flux de PCB (g/3j)
	crue Q1000	moyenne 2016/08	crue Q1000
segF61	1'595	1'010	1.6
segPB	842	1'010	0.8
segF27	933	1'010	0.9
PalPP4	256	16'945	4.3
PalPP3	248	16'945	4.2
PalPP2	129	16'945	2.2
PalF07-PP1	451	16'945	7.6
PalF05-PP1	204	16'945	3.5
Σ Zone basse	3'369		3.4
Σ Zone haute	1'289		21.8
Σ totale	4'658		25.2

Tableau 5.10 Flux hydraulique et PCB dissous en cas de crue extrême Q1'000. Crue septembre 2016 : les concentrations retenues sont les concentrations maximales analysées lors de la crue de septembre 2016

Lors d'une crue comparable à celle de septembre 2016, la zone haute contribue aux flux PCB dissous pour 77%. En situation extrême, les flux hydrauliques ne sont pas beaucoup plus élevés. En admettant des concentrations à l'aval du site représentant un scénario worst-case (ce qui est comparable à une vidange complète des eaux souterraines se situant sous le corps de la décharge, cf. explications en Annexe J), les flux de PCB dissous sont 10 fois plus élevés pour un événement extrême. La zone haute contribue pour 86 % au flux total, comme pour la crue septembre 2016 malgré des teneurs en PCB dissous nettement plus élevées pour la situation HQ1'000. Ceci s'explique par un flux hydraulique 3 fois plus élevé sur la zone basse que sur la zone haute.

L'assainissement (excavation) de la zone haute réduit ainsi fortement le flux de PCB dissous lors d'une crue (cf. tableau suivant). En comparant le flux lors d'une crue (sur une durée de 3 jours) avec une situation en période de turbinage (1 journée de turbinage, 2 jours de basses eaux), la réduction du flux de PCB dissous total lors d'une crue comparable à celle de septembre 2016 est autour de 70%. En période de crue extrême, la réduction est autour de 85%.

		Flux zone haute	Flux zone basse	Flux total
		<i>(g/3jours)</i>	<i>(g/3jours)</i>	<i>(g/3jours)</i>
Avant assainissement	Situation normale, Etat 0	1.2	0.03	1.3
	Crue, sept. 2016	1.6	0.6	2.3
	Crue Q1'000	21.8	3.4	25.2
Après assainissement	Situation normale	0.0	0.03	0.03
	Crue, sept. 2016	0.0	0.6	0.6
	Crue Q1'000	0.0	3.4	3.4
Réduction du flux	Situation normale, Etat 0	100%	0%	98%
	Crue, sept. 2016	100%	0%	72%
	Crue Q1'000	100%	0%	87%

Tableau 5.11 Flux résiduel avant et après assainissement, pour la situation normale (état 0), la crue septembre 2016 et pour une crue extrême Q1'000

5.4.3.6 Effet sur la qualité des eaux de la Sarine

L'effet sur la Sarine de la suppression des flux PCB suite à la réalisation de cette variante est décrit dans [6], chap. 8 (scénario B de suppression des flux) et peut être consulté également en Annexe C.

La suppression de tous les flux pouvant impacter les sédiments à long terme a un effet immédiat sur le système Sarine: le stock de PCB présent dans les sédiments n'est plus alimenté et se réduit pour disparaître progressivement, selon les estimations, entre quelques dizaines à une centaine d'années. Les effets sur la qualité des eaux de la Sarine, sur la faune benthique et le poisson suivent cette diminution (cf. graphiques de l'influence des scénarios sur les flux PCB en Annexe C).

En supprimant 100% du flux de PCB sous forme solide et plus de 90% du flux de PCB sous forme dissoute, les compartiments sédiments, eaux et poisson du système Sarine ne sont plus impactés par les flux de PCB provenant de la décharge. La suppression des flux les plus importants pouvant impacter les sédiments à long terme a un effet immédiat sur le système Sarine (cf. graphiques en Annexe C): le stock PCB dans les sédiments n'est plus alimenté et se réduit, selon les estimations, sur une période de quelques dizaines à une centaine d'années.

L'effet de réduction du stock PCB dans les sédiments sur les concentrations en PCB dans les truites a été démontré dans le rapport des études complémentaires [6] : les concentrations en PCB analysées dans la chair des truites (analyses de 2016) montrent une contamination par tronçon de la Sarine, similaire à celle observée pour les sédiments.

5.4.3.7 Objectifs d'assainissement atteints / non atteints

En situation normale l'objectif d'assainissement relatif aux concentrations inférieures à 10 fois la valeur de concentration selon l'annexe 1 OSites pour le PCB et l'ammonium est respecté à tout moment et sur la totalité de l'aval **actuel** du site.

Le long du nouveau versant du solde de la décharge, le risque de dépassements potentiels des teneurs en PCB / ammonium est limité par le fait que la configuration de la nouvelle berge, constituée de matériaux propres, joue un rôle important de rétention de polluants par effet de filtration ; la nouvelle berge crée par ailleurs un milieu favorable à l'oxygénation des eaux qui s'exfiltrent (réduction de l'ammonium).

Cette variante supprime également tous les flux **PCB sous forme solide** (glissement + érosion des berges) de la zone basse. Cet objectif est atteint par le confinement de la surface.

Les concentrations en PCB ont augmenté au sondage F61 lors de la crue de septembre 2016, mais n'ont pas dépassé 10 x la valeur de concentration selon annexe 1 OSites. Cette augmentation montre qu'on ne peut pas exclure des dépassements de 10 x la valeur de concentration pour les PCB à l'aval du site en cas de crue exceptionnelle. La situation en cas de crue extrême (Q1'000) peut accentuer l'augmentation des concentrations, mais reste un phénomène local et ponctuel, d'une durée limitée dans le temps (de l'ordre de 3 jours).

Comme cela a été mis en évidence dans la cadre des études complémentaires, ces dépassements ponctuels sont sans effet sur le cours d'eau et les poissons.

5.4.3.8 Estimation des coûts

L'estimation détaillée des coûts de la variante 2 figure en Annexe H.

Les éléments de base pris en considération pour l'estimation des coûts sont identiques à ceux de la variante 1 (chap. 5.4.2.7).

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	13'800'000
Travaux de terrassement	26'900'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	95'700'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	9'100'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	6'400'000
Total variante 2 CHF HT (selon Annexe H, arrondi)	151'900'000

Tableau 5.12 Estimation des coûts de la variante 2

5.4.4 Variante 3 : assainissement partiel de la zone haute

5.4.4.1 Description des mesures d'assainissement

Cette variante vise à exclure complètement le risque d'apport de déchets dans le cours d'eau par excavation et élimination des déchets susceptibles d'atteindre le cours d'eau. De plus, elle prévoit une excavation localisée des matériaux fortement pollués qui contribuent aux flux principaux de PCB dissous par les eaux souterraines.

La variante 3 est représentée sur les plans et profils de l'Annexe F :

- Plan d'assainissement 1 :1'500
- Profils état futur: Profil 1, profil 3 et profil 6 (cf. dernière figure en Annexe E)
- Situation 2D des épaisseurs de matériaux excavés
- Vue 3D des matériaux après excavation

La variante n° 3 consiste en un assainissement partiel de la décharge :

1. Excavation des zones « hot-spot » et « talus berlinoise » jusqu'à la molasse (décontamination totale).
2. Stabilisation de la zone de glissement (versant de la zone haute en direction de la Sarine) par excavation de déchets et remodelage de la pente à 30°.
3. Excavation des déchets en pied de talus de la zone haute et des alluvions fortement pollués par les PCB sur les premiers 2-3 m.
4. Reconstitution de la berge de la zone haute de la décharge : remplacement avec des matériaux propres, végétalisation et renforcement avec enrochement du pied de berge, création d'une piste d'accès à la hauteur de Q1'000 (correspondant à env. 570 msm).
5. Remodelage du solde de la décharge en enlevant sur la totalité une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m.
6. Aménagement de la berge de la zone basse en direction Sarine : excavation des déchets le long de la limite, remplacement avec des matériaux propres, création d'une piste d'accès, végétalisation et renforcement avec un enrochement.
7. Confinement/sécurisation peu à moyennement perméable du solde de la décharge, mise en œuvre d'horizons de sol et végétalisation de l'ensemble du solde de la décharge.

La zone du « hot-spot » et du « talus berlinoise » dans la zone haute de la décharge contient des déchets et des alluvions fortement contaminés par les PCB, avec une quantité importante de condensateurs / déchets de condensateurs. La contamination la plus importante se situe à cet endroit au fond de la décharge. De plus, il s'agit du secteur le plus pentu de la décharge et le plus proche de la Sarine.

Dans les eaux souterraines, des teneurs en PCB supérieures à 1 µg/l PCB (correspond à 10 x la valeur de concentration OSites pour le PCB) ont été observées au puits PP1 et dans les sondages à proximité de ce puits (p.ex. F1).

Dans le but de respecter l'objectif d'assainissement relatif aux souterraines, tous les matériaux pollués sont excavés dans la zone d'appel du puits PP1. La zone d'appel suit à peu près la ligne des sondages F07-08, F09-08 et F11-08.

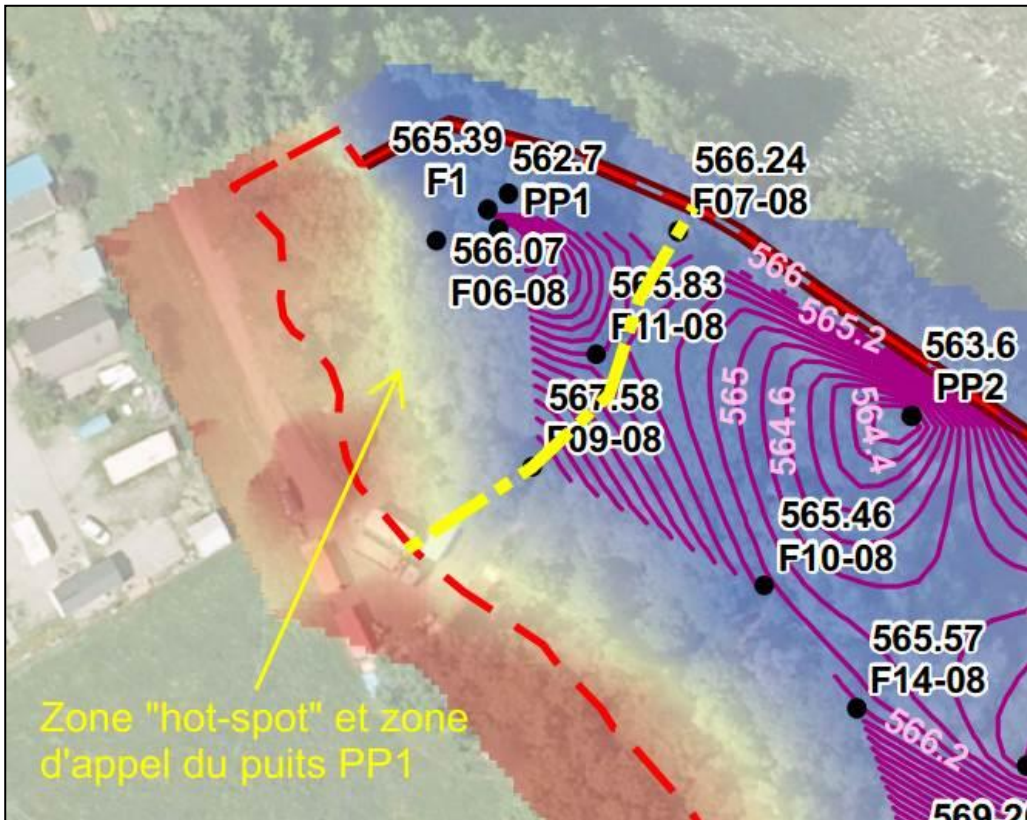


Figure 5.6 Zone du « hot-spot » et zone d'appel du puits PP1 (situation piézométrique du 22.-24.08.16).

5.4.4.2 Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation

idem Variante 2 (cf. chap. 5.4.3.2)

5.4.4.3 Suivi et surveillance post-assainissement

Les mesures de suivi et de surveillance sont les mêmes que pour la variante 1, avec une durée totale de 100 ans. Le programme de surveillance de la qualité des eaux souterraines et de la Sarine est cependant plus étendu en termes de points de surveillance et de rythme de prélèvement.

5.4.4.4 Volumes de déchets et masses de PCB éliminés

Le tableau suivant résume les volumes totaux de déchets et matériaux à éliminer pour :

- a) L'assainissement de la zone « hot spot » et « talus berlinoise » : excavation déchets, alluvions et graviers interglaciaires jusqu'au toit de la molasse.
- b) Le talus de la zone haute jusqu'à une pente de 30°
- c) Le pied de la décharge sur la zone haute : déchets + alluvions fortement pollués (épaisseur 2-3 m).
- d) Le réglage des surfaces du solde de la décharge: on admet qu'une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m doit être éliminée pour égalisation / remodelage de la surface.

Le tableau suivant permet la comparaison du résultat obtenu par la variante 3 par rapport à l'assainissement total du site (= variante 1). En termes de volumes et de masses de PCB estimées, le solde restant sur place est de :

Solde du volume de déchets laissé sur place 75 %

→ 25% du total est éliminé

Solde de la masse PCB laissée sur place : 70%

→ 30 % du total est éliminé

Variante 3	Déchets	Alluvions	Graviers intergl.	Déchets+alluvions+ graviers intergl.	Déchets + alluvions + graviers intergl.
				Volume	Masse PCB
	[m3]	[m3]		[m3]	[kg]
Stabilisation talus à 30°	9369	-		9369	2674
Pied talus	1512	1'450		2962	55
Zone "hot spot"	28960	8'407		37367	6698
Zone "talus berlinois"	200			200	350
Zone haute surface restante	3614			3614	24
Zone basse: réglage talus	5282	-		5282	145
Zone basseréglage surface plate	7318	-		1668	
Volume / Masse PCB éliminé	56255	9857		66112	9945
Volume/ Masse PCB totale (=var. 1)	197377	66154		263531	31005
Solde laissé sur place	141122	56297		197419	21060
Solde laissé sur place en %	71%	85%		75%	68%

Tableau 5.13 Variante 3 : Synthèse des volumes et masses de PCB éliminés et laissés en place.

Les volumes / masses des matériaux excavés sont présentés dans les tableaux ci-dessous en fonction des classes de PCB (études géostatistiques 2009 et 2010) et en fonction des types de matériaux (2^{ème} tableau). Comme pour la variante 1, les erreurs relatives sur la moyenne des catégories sont reprises des études géostatistiques. Comme les volumes éliminés de la zone haute piment sur les volumes du réglage des surfaces du solde de la décharge, les erreurs sur la moyenne des catégories de la zone haute (étude géostatistique 2010 [13]) ont été retenues dans le tableau suivant.

Volume / masse total: déchets + alluvions + graviers interglacières						Déchets: erreur max sur la masse des classes PCB > 10 ppm			Alluvions: erreur max. sur la masse des catégories > 10 ppm	
Catégorie	Concentration PCB	Vol. total	Masse total (ρ=1.8t/m3)	Masse déchets	Masse alluvions + graviers	Erreur sur la moyenne	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm	Masse
		[m3]	[t]	[t]	[t]		[t]	[t]	[t]	[t]
1	x < 0.1	7'908	14'200	12'100	2'100	24%	-2'132	9'968	-359	1741
2	0.1 < x < 1	11'296	20'300	17'300	3'000	13%	-1'196	16'104	-201	2799
3	1 < x < 10	34'252	61'700	52'500	9'200	9%	-795	51'705	-134	9066
4	10 < x < 50	8'431	15'200	12'900	2'300	13%	1'677	14'577	299	2'599
5	50 < x < 1000	3'361	6'100	5'200	900	29%	1'508	6'708	261	1'161
6	1000 < x	910	1'600	1'400	200	67%	938	2'338	134	334
TOTAL		66'158	119'084	101'400	17'700			101'400		17'700
<i>Répartition en fonction des matériaux</i>										
Volume déchets					56'255					
Volume alluvions + graviers					9'857					

Tableau 5.14 Variante 3 : Volume et masse de déchets et d'alluvions présents dans la zone à excaver en fonction des classes de concentration en PCB (géostatistique 2009 et 2010).

5.4.4.5 Flux résiduel

A Situation normale

Comparé à l'état sans assainissement (état 0) cette variante permet de :

1. Supprimer le 100% le flux de PCB sous forme solide.
2. Réduire de 97% le flux de PCB sous forme dissoute.
3. Supprimer les flux d'eaux souterraines présentant des teneurs supérieures à 10x la valeur de concentration de l'OSites pour les PCB à l'aval du site.

Le flux résiduel est calculé sur la base des résultats pour l'état 0 de l'étude complémentaire [6] annexe 5.3 (Modèle hydrogéologique), cf. Tableau 5.8.

À l'état 0, les zones « hot-spot » et « talus berlinoise » contribuent pour 91 % au flux total de PCB dissous et pour 94% au flux de la zone haute. En supprimant la zone du hot spot, le flux résiduel de PCB dissous est réduit de 91 %.

Le confinement du solde de la décharge laissé en place réduit l'infiltration des eaux météoriques d'environ 2/3 à 3/4. L'effet de cette réduction sur les concentrations dans la nappe et le flux résiduel de polluants dans la nappe n'est pas précisément quantifiable. Il est toutefois raisonnable de considérer que le flux est réduit d'un ordre de grandeur comparable. Dans le tableau suivant, une réduction du flux de $\frac{2}{3}$ a été admise. Ainsi, le flux résiduel de PCB dissous après assainissement et confinement est réduit de 97 % ce qui correspond à un flux total de PCB dissous de 2 - 4 g/ an. :

	Flux	Flux zone haute	Flux zone basse	Flux total
		[g/an]	[g/an]	[g/an]
Avant assainissement	Situation normale	153	4	157
	Turbinage	78	2	80
Après assainissement	Situation normale	10	4	14
	Turbinage	5	2	7
Réduction du flux	Situation normale	94%	0%	91%
	Turbinage	93%	0%	91%
Après confinement	Situation normale	3	1.2	4.2
	Turbinage	1.5	0.6	2.1
Réduction du flux	Situation normale	98%	71%	97%
	Turbinage	98%	71%	97%

Tableau 5.15 Flux PCB sous forme dissoute dans les eaux souterraines qui s'exfiltrent dans la Sarine (calculé pour une situation avec concentrations maximales dans les eaux souterraines selon tableau précédent), avant et après assainissement (excavation).

B Situation de crue, crue extrême Q1'000

La description des situations de crue est reprise du chapitre concernant la variante 2 (cf. chap. 1.1.1.1).

L'assainissement (excavation) de la zone hot spot réduit fortement le flux de PCB dissous lors d'une crue (cf. tableau suivant). En comparant le flux lors d'une crue (sur une durée de 3 jours) avec une situation en période de turbinage (1 journée de turbinage, 2 jours de basses eaux), la réduction du flux PCB dissous total lors d'une crue comparable à celle de septembre 2016 s'établit autour de 70%. En période de crue extrême, la réduction est plus faible et se situe autour de 45%.

	Flux [g/3j]	Flux zone haute	Flux zone basse	Flux total
		<i>[g/3jours]</i>	<i>[g/3jours]</i>	<i>[g/3jours]</i>
Avant assainissement	Situation normale, Etat 0	1.2	0.03	1.3
	Crue	1.6	0.6	2.3
	Crue Q1'000	21.8	3.4	25.2
Après assainissement	Situation normale	0.1	0.03	0.1
	Crue	0.1	0.6	0.8
	Crue Q1'000	10.7	3.4	14.1
Réduction du flux	Situation normale, Etat 0	93%	0%	91%
	Crue 2016	93%	0%	67%
	Crue Q1'000	51%	0%	44%

Tableau 5.16 Flux résiduel avant et après assainissement (calculé pour une situation avec concentrations maximales dans les eaux souterraines selon tableau précédent), pour la situation normale (état 0), la crue de septembre 2016 et pour une crue extrême Q1'000

5.4.4.6 Effet sur la qualité des eaux de la Sarine

L'effet sur la Sarine de la suppression des flux PCB suite à la réalisation de cette variante est décrit dans [6] chap. 8 (combinaison des scénarios A et C de suppression des flux) et peut être consulté également en Annexe C.

La suppression de tous les flux solides pouvant impacter les sédiments à long terme a un effet immédiat sur le système Sarine: le stock de PCB présent dans les sédiments n'est plus alimenté et se réduit pour disparaître progressivement, selon les estimations, entre quelques dizaines à une centaine d'années. Les effets sur la qualité des eaux de la Sarine, sur la faune benthique et le poisson suivent en analogie (cf. graphiques de l'influence des scénarios sur les flux PCB en Annexe C).

La suppression de 97 % du flux de PCB sous forme dissoute présente une amélioration nette de la qualité des eaux. Les résultats des investigations complémentaires ont démontré que le flux PCB sous forme dissoute et solide (matière en suspension) est cependant insignifiant pour les compartiments sédiments, eaux, faune benthique et poisson) à long terme. La suppression de ce flux est considéré comme non déterminante pour les compartiments de la rivière (eaux, poissons, faune benthique, sédiments). Elle permet par contre d'atteindre l'objectif d'assainissement 10 fois la valeur de concentration OSites pour les PCB à l'aval immédiat du site.

5.4.4.7 Objectifs d'assainissement atteints / non atteints

À l'état 0, les dépassements de 10 fois la valeur de concentration OSites sont observés sur la zone haute, dans les piézomètres proches du puits PP1 et dans le puits PP1 (cf. plan d'assainissement en annexe). En tenant compte de la forte hétérogénéité de la distribution spatiale des contaminants et des déchets dans le corps de la décharge, on ne peut pas exclure avec certitude des zones d'exfiltrations locales d'eaux souterraines fortement polluées. Les campagnes de surveillance montrent cependant que les concentrations en PCB dans les eaux analysées des puits PP2, PP3 et PP4 sont largement inférieures à 10x la valeur de concentration pour les PCB et ne varient que très peu. L'effet d'éventuelles zones d'exfiltrations localisées n'a pas pu être mis en évidence, mais leur présence ne peut pas être exclue définitivement.

Avec l'excavation de la totalité de la zone « hot-spot » et les matériaux de la zone « talus berlinoise » l'objectif relatif aux dépassements de 10x la valeur de concentration OSites est **atteint pour les PCB dissous**.

Concernant l'**ammonium**, le solde des déchets laissés sur place dans la zone haute ne permet pas d'en réduire de manière importante les concentrations. Toutefois, le confinement ainsi que les mesures de stabilisation des berges par la mise en place de matériaux propres (les matériaux agissent comme filtre et favorisent la mise en place d'un milieu d'aérobie) sont des facteurs importants agissant sur la réduction des concentrations en ammonium. Cette mesure réduit fortement le risque de dépassements de 10x la valeur de concentration OSites, mais ne la supprime pas entièrement.

Cette variante supprime tous les flux **PCB sous forme solide** (glissement + érosion des berges) de la zone haute. L'élimination des déchets et alluvions fortement pollués en pied de décharge, les mesures de confinement du pied de la décharge et les mesures de confortation de la berge permettent de supprimer le risque d'arrachement et d'érosion des déchets en cas de crue. Ces mesures réduisent également le flux de PCB sous forme dissoute en cas de crue.

Les concentrations en PCB ont augmenté au sondage F61 lors de la crue de septembre 2016, mais n'ont pas dépassé 10 x la valeur de concentration selon l'annexe 1 OSites. Cette augmentation montre qu'on ne peut pas exclure des dépassements de 10 x la valeur de concentration pour les PCB à l'aval du site en cas de crue exceptionnelle. La situation en cas de crue extrême (Q1'000) peut accentuer l'augmentation des concentrations, mais reste un phénomène local et ponctuel, d'une durée limitée dans le temps (de l'ordre de 3 jours).

Comme mis en évidence dans la cadre des études complémentaires, ces dépassements ponctuels sont sans effet sur le cours d'eau et les poissons.

5.4.4.8 Estimation des coûts

L'estimation détaillée des coûts de la variante 3 figure en Annexe H.

Les éléments de base pris en considération pour l'estimation des coûts sont identiques à ceux de la variante 1 (chap. 5.4.2.7).

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	10'900'000
Travaux de terrassement	10'500'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	31'000'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	10'700'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	8'700'000
Total variante 3 CHF HT (selon Annexe H, arrondi)	71'800'000

Tableau 5.17 Estimation des coûts de la variante 3.

5.4.5 Variante 4 : assainissement partiel de la zone haute

5.4.5.1 Description des mesures d'assainissement

La variante n°4 a pour objectif d'empêcher durablement toute exportation de déchets dans la Sarine.

Il s'agit d'une sécurisation / confortation de la décharge existante, minimisant le volume de matériaux à évacuer et traiter.

La variante 4 est représentée sur les plans et profils de l'Annexe G:

- Plan d'assainissement 1 :1'500
- Situation 2D des épaisseurs de matériaux excavés
- Vue 3D des matériaux après excavation
- Profils état futur : Profil 1 ; Profil 3 ; Profil 6 (cf. dernière figure de l'Annexe E)
- Schéma de la paroi

La variante n° 4 consiste en un assainissement partiel de la décharge :

1. Stabilisation de la zone de glissement (versant de la zone haute en direction de la Sarine) par excavation de déchets et remodelage de la pente à 30°.
2. Dispositif de stabilisation en pied de talus avec sécurisation des berges contre les crues :
Paroi de pieux non jointifs permettant l'écoulement de l'eau sans pompage. Pieux ancrés dans la molasse. Altitude des pieux correspondant au niveau maximal de la Sarine en cas de crue extrême Q1'000 (570 msm).
Paroi rigide dans la zone non saturée, permettant de créer une séparation décharge/Sarine verticale (niveau à définir). Cette paroi permet de stopper les flux solides (comme les palplanches) sans nécessité de filtre (à cette interface).
3. Enrochement côté Sarine avec pour objectif de stabiliser le pied de la décharge/berge et de protéger la paroi.
4. Remodelage du solde de la décharge en enlevant sur la totalité une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m.
5. Aménagement de la berge de la zone basse en direction Sarine : excavation de déchets le long de la limite, remplacement avec des matériaux propres, création d'une piste d'accès, végétalisation et renforcement avec un enrochement.
6. Confinement/sécurisation peu à moyennement perméable du solde de la décharge, mise en œuvre d'horizons de sol et végétalisation de l'ensemble du solde de la décharge.
7. Réalisation de nouveaux forages destinés au captage du flux amont.

5.4.5.2 Mesures de confinement / sécurisation / remise en culture / végétalisation

A Paroi de pieux non jointifs/ paroi rigide sur la zone haute:

Au niveau du pied de la décharge, des mesures de confortation du talus et de la future piste sont nécessaires. Les contraintes conditionnant ces mesures de confortation sont :

1. Écran perméable assurant la perméabilité à l'échange eaux souterraines – Sarine. Cet écran peut être une série de pieux discontinus dans la zone saturée et ancrés dans la molasse. Des options de positionnement (1 ou 2 séries) sont possibles en fonction des exigences de stabilité.
2. Paroi continue et imperméable dans la zone non saturée, fixée aux pieux discontinus, faisant office d'écran de sécurité relativement à l'érosion par la Sarine en cas de crue et de confortation de la piste.

La hauteur de l'écran est définie par le niveau maximal de la Sarine en cas de crue HQ_{1'000} (570 msm).

B Enrochement des berges de la Sarine

La modélisation par HEC-RAS (voir Annexe J *Cas de crue exceptionnelle*) de la crue exceptionnelle HQ_{1'000} a permis de localiser les secteurs soumis à des affouillements de la berge :

1. **Zone basse** : (extrait de l'Annexe J) « Les forces d'arrachement sont faibles et aucune stabilisation du pied de berge ne semble nécessaire. Cela est notamment confirmé par la présence de bancs de sédiments, typiques des zones en intrados ».
2. **Zone haute** : les forces d'arrachement en pieds de berge sont telles que des affouillements jusqu'à 2.5 m sont possibles. Il convient de mettre en place une protection profonde du talus sous forme d'un tapis de blocs qui pourra se réarranger. Lorsque le substratum molassique est peu profond, les blocs devront être ancrés dans la molasse.

C Confinement du solde de la décharge

Idem variantes 2 et 3

L'enrochement côté Sarine de la zone haute de la décharge a plusieurs fonctions :

1. Protection contre l'affouillement. La profondeur d'affouillement attendu (cf. chapitre crue exceptionnelle) est de l'ordre de 2.5 m pour une crue HQ_{1'000}. Des blocs jusqu'à 1 m (à définir plus précisément) de diamètre doivent être mis en place en pied de berge, sous le fond du lit.
2. Stabilisation du pied de la décharge/berge et protection de la paroi

D Végétalisation du solde de la décharge

Idem variantes 2 et 3

5.4.5.3 Suivi et surveillance post-assainissement

Les mesures de suivi et de surveillance post-assainissement sont plus conséquentes pour la variante 4 que pour les autres variantes d'assainissement partiel. Comme cette variante présente un risque de dépassement des objectifs d'assainissement en termes de concentrations dans les eaux souterraines, un programme de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des eaux de la Sarine plus serré dans l'espace et dans le temps est indispensable.

Les infrastructures mises en place comme la paroi de pieux génèrent des coûts de surveillance, d'entretien et de renouvellement, dont la durée peut aller au-delà de 100 ans.

Le suivi et la surveillance post-assainissement est estimé pour 100 ans après assainissement. L'estimation des coûts prend en compte les travaux suivants :

1. Surveillance de la qualité des eaux souterraines.
 - a. 8 sondages à l'aval (actuel) du site. À renouveler tous les 20 ans.
 - b. Programme de surveillance plus serré les premiers 50 ans, puis adaptation du rythme de prélèvement. Paramètres principaux à surveiller : PCB, ammonium
2. Surveillance de la qualité des eaux de la Sarine à l'aide de capteurs passifs
 - a. Programme de surveillance plus serré les premiers 50 ans, puis adaptation du rythme de prélèvement.
3. Travaux d'entretien du site :
 - a. Contrôles visuels réguliers du site, mesures régulières de la paroi
 - b. Contrôles des berges en périodes de crues
 - c. Travaux d'entretien de la végétation.
4. Travaux de réfection, maintenance
 - a. Travaux de réfection des talus et des berges (blocs, affouillements locaux).
 - b. Travaux de réfection de la paroi (maintien de la valeur à neuf).

5.4.5.4 Volume à assainir et masse PCB

Le tableau suivant présente les volumes totaux à éliminer pour :

- a) L'excavation du talus de la zone haute jusqu'à une pente de 30°
- b) Le réglage des surfaces du solde de la décharge: on admet qu'une couche d'une épaisseur moyenne de 1 m doit être éliminée pour égalisation / remodelage de la surface.

Les résultats d'analyse des matériaux provenant de la zone de glissement sur la zone haute ont en plus servi de base pour adapter les volumes par classe de PCB pour la zone haute. Dans le but d'obtenir une base commune afin de comparer les variantes d'assainissement (cf. chap. 5.4), les volumes des matériaux jusqu'à une pente de 30° ont été calculés à l'aide de la modélisation 3D du terrassement potentiel. Le volume à excaver pour obtenir une pente de 30° est d'environ 9'370 m³.

En s'appuyant sur le calcul du glissement hypothétique discuté dans le rapport [6], ce volume a été réparti sur les 6 classes de PCB. Afin de garantir la conservation du volume total, les catégories < 1 ppm ont été réduites en faveur des classes supérieures :

Le tableau suivant permet la comparaison du résultat obtenu par la variante 4 par rapport à l'assainissement total du site (= variante 1). En termes de volumes de déchets et de masses de PCB estimés le solde restant sur place est de :

Solde du volume de matériaux et déchets laissé sur place 90 %	→ 10 % du total est éliminé
Solde de la masse de PCB laissée sur place : 90%	→ 10 % du total est éliminé

Variante 4	Déchets	Alluvions	Graviers intergl.	Déchets+alluvions+ graviers intergl.	Déchets + alluvions + graviers intergl.
				Volume	Masse PCB
	[m3]	[m3]		[m3]	[kg]
Stabilisation talus à 30°	9'369	-		9'369	2'674
Zone "hot spot"	-	-		-	-
Zone "talus berlinois"	200	-		200	350
Zone haute surface restante	3'614			3'614	24
Zone basse: réglage talus	5'282	-		5'282	145
Zone basseréglage surface plate	7'318	-		7'318	
Volume / Masse PCB éliminé	25'783	-		25'783	3'193
Volume/ Masse PCB totale (=var. 1)	197'377	66'154		263'531	31'005
Solde laissé sur place	171'594	66'154		237'748	27'812
Solde laissé sur place en %	87%	100%		90%	90%

Tableau 5.18 Variante 4 : Synthèse des volumes et des masses de PCB éliminés et laissés sur place.

Les volumes / masses des matériaux excavés sont présentés ci-dessous en fonction des classes de PCB (classes analogues aux études géostatistiques 2009 et 2010).

Les volumes / masses des matériaux excavés sont présentés dans les tableaux ci-dessous en fonction des classes de PCB (études géostatistiques 2009 et 2010) et en fonction des types de matériaux (2^{ème} tableau). Comme pour la variante 1, les erreurs relatives sur la moyenne des catégories sont reprises des études géostatistiques. Dans le sens strict, elles ne sont valables que pour les volumes de matériaux calculés dans le cadre de l'étude statistique. Comme les volumes éliminés de la zone haute priment sur les volumes du réglage des surfaces du solde de la décharge, les erreurs sur la moyenne des catégories de la zone haute (étude géostatistique 2010 [13]) ont été retenues dans le tableau suivant.

Volume / masse total: déchets + alluvions + graviers interglacières						Déchets: erreur max sur la masse des classes PCB > 10 ppm		
	Conc. PCB [mg/kg]	Vol. total [m3]	Masse total ($\rho=1.8t/m^3$) [t]	Masse déchets [t]	Masse alluvions + graviers	Erreur sur la moyenne	Erreur (+) pour cat. > 10 ppm [t]	Masse [t]
1	$x < 0.1$	1'627	2'928	2'928	-	24%	-254	2'674
2	$0.1 < x < 1$	3'443	6'198	6'198	-	13%	-138	6'060
3	$1 < x < 10$	19'656	35'381	35'381	-	9%	-95	35'286
4	$10 < x < 50$	711	1'280	1'280	-	13%	166.41	1'446
5	$50 < x < 1000$	141	253	253	-	29%	73.35	326
6	$1000 < x$	205	369	369	-	67%	247.46	617
TOTAL		25'783	46'409	46'409	-			46'409

Répartition en fonction des matériaux
Volume déchets
Volume alluvions + graviers

Tableau 5.19 Variante 4 : Volumes et masses de déchets et d'alluvions excavés en fonction des classes de concentration PCB (géostatistique 2009 et 2010).

5.4.5.5 Flux résiduel

A Situation normale

Comparé à l'état sans assainissement (état 0) cette variante permet de :

1. Supprimer le 100% le flux de PCB sous forme solide.
2. Réduire de 70% le flux de PCB sous forme dissoute.

L'effet de l'excavation sur le flux résiduel PCB sous forme dissoute est estimé sur la base des masses de PCB éliminées (cf. chap. 1.1.1.1). La masse de PCB éliminée correspond à 10% de la masse totale de PCB présente sur le site. Par simplification, il est admis qu'avec l'élimination de 10% de la masse, le flux de PCB dissous est également réduit de 10%.

Par analogie avec les variantes 2 et 3, on admet que le confinement réduit l'infiltration des eaux météoriques d'environ $\frac{2}{3}$. L'effet de cette réduction sur les concentrations dans la nappe et le flux résiduel de polluants dans la nappe n'est pas précisément quantifiable. Il est toutefois raisonnable de considérer que le flux est réduit dans le même ordre de grandeur. Dans le tableau suivant, une réduction du flux de $\frac{2}{3}$ a été admise. Ainsi, le flux résiduel de PCB dissous après assainissement et confinement est réduit de 70 % ce qui correspond à un flux total de PCB dissous de 24 – 47 g/ an.

La réalisation de nouveaux forages destinés au captage du flux amont, avec un diamètre plus important, a pour but d'éviter une augmentation des quantités d'eau entrant dans le site en cas de colmatage du dispositif existant (pour les autres variantes, lorsque les drains actuels seront colmatés, l'eau provenant de l'amont s'écoulera librement au travers de la zone hot-spot assainie).

	Flux	Flux zone haute	Flux zone basse	Flux total
		[g/an]	[g/an]	[g/an]
Avant assainissement	Situation normale	153	4	157
	Turbinage	78	2	80
Après assainissement	Situation normale	138	4	141.7
	Turbinage	70	2	71.6
Réduction du flux	Situation normale	10%	10%	10%
	Turbinage	10%	10%	10%
Après confinement	Situation normale	46	1	47
	Turbinage	23	1	24
Réduction du flux	Situation normale	70%	70%	70%
	Turbinage	70%	70%	70%

Tableau 5.20 Flux hydraulique et PCB dissous pour l'état 2016 et état 0 (avant réalisation des mesures urgentes d'assainissement)

B Situation de crue, crue extrême Q1'000

La description des situations de crue sont reprises du chapitre relatif à la variante 2.

L'assainissement (excavation) des matériaux du talus de la zone haute réduit les flux provenant de la surface de la décharge. L'augmentation des flux PCB dissous en cas de crue est cependant principalement associée au lessivage des alluvions fortement contaminés et des déchets (surtout le cas dans la zone hot spot) suite à l'augmentation rapide du niveau de la nappe. Comme cette variante ne prévoit aucune excavation des matériaux fortement pollués dans la zone de battement de la nappe en cas de crue, une réduction du flux en cas de crue n'est guère probable. À long terme, on peut s'attendre à une réduction de la contamination des alluvions suite à la réduction du flux par lessivage de la décharge, ce qui pourrait conduire à un flux moins important en cas de crue.

5.4.5.6 Objectifs d'assainissement atteints / non atteints

Cette variante supprime tous les flux **PCB sous forme solide** (glissement + érosion des berges) de la zone haute. Les mesures de confortation et de confinement du solde de la décharge permettent de supprimer le risque d'arrachement et d'érosion des déchets en cas de crue.

Concernant l'objectif lié à la qualité des eaux souterraines, les mesures ne permettent pas de supprimer le risque de dépassements des valeurs de concentrations pour les PCB et l'ammonium. Les mesures d'excavation se limitent aux matériaux proches de la surface de la zone haute et ne représente que 10% de la masse totale de PCB présente sur le site. Malgré les mesures de confinement réduisant l'apport de PCB (et d'autres polluants) par lessivage de la décharge, le risque de dépassement de l'objectif de 10 x OSites n'est pas supprimé.

Comme pour les autres variantes d'assainissement partiel, en situation de **crue**, un risque ponctuel de dépassement se présente sur l'ensemble du site.

Les concentrations en PCB ont augmenté au sondage F61 lors de la crue de septembre 2016, mais n'ont pas dépassé 10 x la valeur de concentration selon l'annexe 1 OSites. Cette augmentation montre qu'on ne peut pas exclure des dépassements de 10 x la valeur de concentration pour les PCB en cas de crue exceptionnelle. La situation en cas de crue extrême (Q1'000) peut accentuer l'augmentation des concentrations, mais reste un phénomène local et ponctuel, d'une durée limitée dans le temps (de l'ordre de 3 jours).

5.4.5.7 Effet sur la qualité des eaux de la Sarine

L'effet de la suppression des flux PCB solide suite à la réalisation de cette variante est décrit dans [6] chap. 8 (scénario A de suppression des flux) et peut être consulté également en Annexe C.

La suppression de tous les flux solides pouvant impacter les sédiments à long terme a un effet immédiat sur le système Sarine: le stock de PCB présent dans les sédiments n'est plus alimenté et se réduit pour disparaître progressivement, selon les estimations, entre quelques dizaines à une centaine d'années. Les effets sur la qualité des eaux de la Sarine, sur la faune benthique et le poisson suivent cette diminution (cf. graphiques de l'influence des scénarios sur les flux PCB en Annexe C)-

La suppression de 70 % du flux de PCB sous forme dissoute présente une amélioration nette de la qualité des eaux. Comme pour la variante 3, la suppression de ce flux est considéré comme non déterminante pour les compartiments de la rivière (eaux, poissons, faune benthique, sédiments).

5.4.5.8 Estimation des coûts

L'estimation détaillée des coûts de la variante 4 figure en Annexe H.

Les éléments de base pris en considération pour l'estimation des coûts sont identiques à ceux de la variante 1 (chap. 5.4.2.7).

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	7'600'000
Travaux de terrassement	4'500'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	10'700'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	11'800'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	10'300'000
Total variante 4 CHF HT (selon Annexe H, arrondi)	44'900'000

Tableau 5.21 Estimation des coûts de la variante 3.

5.5 Comparaison des variantes : volumes et masses de PCB extraits

Le tableau ci-dessous présente pour les quatre variantes les volumes moyens de déchets et matériaux extraits et les masses moyennes de PCB correspondantes.

La part des volumes moyens de PCB supprimés par rapport au volume de PCB total présent dans le site est également représentée.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Volume moyen extrait [m3]	271'600	185'200	66'100	25'800
Masse de PCB moyenne extraite du site [kg]	31'000	25'300	9'900	3'200
Masse de PCB moyenne extraite du site/ masse de PCB moyenne totale du site %	100%	80%	30%	10%

Tableau 5.22 Comparaison des volumes moyens de déchets et matériaux et des masses de PCB extraites pour les 4 variantes (chiffres arrondis)

6. Évaluation des variantes techniquement réalisables (étape 4)

6.1 Critères déterminants

Afin de mettre en évidence la variante d'assainissement optimale, les variantes techniquement réalisables ont été comparées qualitativement sur la base de critères précis et déterminants pour le site de la Pila.

Les critères retenus peuvent être groupés dans 4 familles de critères proposées par l'aide à l'exécution de l'OFEV de 2014, « Évaluation des variantes d'assainissement » [3].

- Faisabilité
- Efficacité
- Respect de l'environnement et l'apport écologique
- Coûts

La description des critères retenus et l'échelle d'évaluation correspondante figurent en Annexe I.

6.2 Évaluation de la faisabilité

La comparaison de variantes sous l'angle de la faisabilité permet d'évaluer dans quelle mesure les variantes correspondent à l'état de la technique et dans quelle mesure elles sont fiables dans la mesure où les méthodes qu'elles proposent ont été testées et éprouvées dans d'autres cas.

Cette famille de critères permet également d'évaluer la possibilité d'adaptation des variantes à des conditions nouvelles ou inattendues.

Les critères et leur évaluation pour les différentes variantes sont présentés et commentés ci-dessous :

1. État de la technique / perspectives de réussite

Pour toutes les variantes, les techniques d'excavation/ prétraitement/ traitement sont des techniques fiables et éprouvées. La certitude d'atteindre les objectifs d'assainissement est plus faible pour les variantes partielles et décroît en fonction du volume de déchets excavés. Le risque de non-respect des délais et des coûts est plus important pour les variantes 1 et 2 qui nécessitent l'excavation et le traitement d'un grand volume de matériaux et déchets.

2. Flexibilité

Les variantes 1 et 2, qui ne comportent pas de position de berge fixe, sont les plus flexibles pour ce qui concerne la réalisation de l'assainissement. La variante 4, qui possède la plus grande longueur de berge fixe, est la moins flexible.

3. Infrastructure requise / mesures de sécurité

Pour toutes les variantes, des mesures de confinement périphérique et de traitement des eaux seront nécessaires pendant l'assainissement. Elles seront plus importantes en cas d'assainissement total. Le prétraitement sur place nécessite également de l'espace pour le stockage et le traitement et plus de mesures de sécurité pour les travailleurs.

Notation des variantes

La variante 4 ne permet pas d'atteindre les objectifs d'assainissement fixés par l'autorité pour les PCB: elle est signalée par une colonne spécifique hors des tableaux de comparaison des variantes.

La notation des différentes variantes pour les critères de faisabilité est présentée ci-dessous :

Critères		Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	Etat de la technique / perspectives de réussite	1	4	3	2	1
	Flexibilité	1	5	4	3	1
	Infrastructure requise / Mesures de sécurité	1	1	2	3	3

Tableau 6-1 Notation des variantes pour les critères de faisabilité

6.3 Évaluation de l'efficacité

Les critères d'efficacité ont pour objectifs d'évaluer les variantes sous l'angle du degré d'atteinte des objectifs d'assainissement. Elles permettent également de comparer le niveau de contrôle possible des différentes options pendant l'assainissement et le suivi des résultats ; une appréciation des dangers résiduels associés à des accidents majeurs est également faite.

Les critères et leur évaluation pour les différentes variantes et sous-variantes sont présentés et commentés ci-dessous :

1. Degré d'atteinte des objectifs d'assainissement pour les PCB

Les variantes 1, 2 et 3 permettent d'atteindre les objectifs d'assainissement pour les PCB. La variante 4 ne permet pas de garantir le respect de la valeur de 10 x OSites en aval à proximité du site.

2. Réduction du flux de PCB solide

Les 4 variantes permettent d'éliminer les flux de PCB solides à partir du site de la Pila

3. Réduction du flux de PCB dissous

Seule la variante 1 permet l'élimination totale du flux de PCB dissous à partir du site. Les variantes 2 et 3 permettent de réduire de respectivement 99% et de 97% ce flux. La variante 4 permet d'atteindre une réduction de 70% du flux de PCB dissous.

4. Niveau de contrôle possible

L'assainissement total du site est celui qui permet le meilleur niveau de contrôle dans la mesure où la totalité des polluants est éliminée du site. Les variantes partielles présentent un risque résiduel en cas de crue exceptionnelle. Pour la variante 4, ce risque est plus important.

Notation des variantes

La notation des différentes variantes pour les critères d'efficacité est présentée ci-dessous :

Critères		Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Efficacité	Degré d'atteinte des objectifs d'assainissement pour les PCB	1	5	5	5	1
	Réduction du flux de PCB solide	1	5	5	5	5
	Réduction du flux de PCB dissous	1	5	4	4	2
	Niveau de contrôle possible	1	4	3	3	2

Tableau 6-2 Notation des variantes pour les critères d'efficacité

6.4 Évaluation du respect de l'environnement et de l'apport écologique

Les variantes d'assainissement doivent être conformes aux prescriptions légales en matière de protection de l'environnement.

Les critères présentés et commentés ci-dessous permettent de comparer les variantes en fonction de leur degré de conformité avec les prescriptions environnementales et de leurs avantages du point de vue écologique :

1. Potentiel de pollution/ réduction de la quantité de polluants

La variante 1 d'assainissement total permet l'élimination de la totalité de la masse de PCB présente sur le site. Le potentiel de pollution restant sur le site est compris entre 25 % et 90% de la masse de PCB totale pour les variantes partielles. Il est de 70% et plus en cas d'assainissement partiel de la zone haute.

2. Nécessité d'un suivi et d'une surveillance/ durée des opérations

La nécessité d'une surveillance est plus importante (et plus longue après l'assainissement) pour les variantes partielles. La variante 4 est celle qui demande le suivi post-assainissement et la maintenance des infrastructures la plus importante.

3. Consommation d'énergie

Ce critère évalue l'énergie consommée pour les mesures d'assainissement, le transport et l'élimination des déchets. L'énergie totale consommée est plus importante pour les variantes d'excavation totale du site. Elle décroît en fonction du volume de déchets et matériaux excavés et à traiter.

4. Émissions

Ce critère évalue la pollution atmosphérique, le bruit et les poussières et odeurs produits par l'assainissement du site (intensité et durée). La totalité des émissions produites est plus importante pour la variante de décontamination totale. Les émissions sont réduites par un volume d'extraction et de traitement moins important et par une durée moindre du chantier d'assainissement.

Notation des variantes

La notation des différentes variantes pour les critères de respect de l'environnement et de l'apport écologique est présentée ci-dessous :

Critères		Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Respect de l'environnement/ apport écologique	Potentiel de pollution/ réduction de la quantité de polluants	1	5	4	2	1
	Nécessité d'un suivi et d'une surveillance et durée des opérations/ Nécessité d'une maintenance des infrastructures	1	5	4	3	1
	Consommation d'énergie	1	1	2	3	4
	Emissions	1	1	2	4	4

Tableau 6-3 Notation des variantes pour les du respect de l'environnement et de l'apport écologique

6.5 Évaluation des coûts

Les coûts des différentes variantes ont été quantifiés sur une base uniforme permettant la comparaison des variantes. Les variantes sont décrites aux chapitres 5.4.2 à 5.4.5. Le détail de l'estimation des coûts des variantes figure en Annexe H. Le tableau suivant présente, pour chaque variante, le total de l'estimation des coûts des positions principales.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	19'100'000	13'800'000	10'900'000	7'600'000
Travaux de terrassement	39'100'000	26'900'000	10'500'000	4'500'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	130'300'000	95'700'000	31'000'000	10'700'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	5'100'000	9'100'000	10'700'000	11'800'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	1'900'000	6'400'000	8'700'000	10'300'000
Total par variante CHF HT (selon Annexe H, arrondi)	195'500'000	151'900'000	71'800'000	44'900'000

Tableau 6.4 Synthèse de l'estimation des coûts des 4 variantes

6.5.1 Précision du calcul des coûts en fonction de la phase du projet

L'analyse de variantes fait partie des études préliminaires du projet d'assainissement. Elle a pour objectif principal de comparer des solutions entre elles selon différents critères pertinents pour le projet et de mettre en évidence la variante optimale, c'est-à-dire celle qui permet d'atteindre les objectifs avec le meilleur rapport coût efficacité.

L'estimation des coûts doit permettre la comparaison des variantes sur une base uniforme et transparente et fournir une base pour l'établissement des besoins financiers et du cadre financier général du projet.

Les données de base du projet sont, au stade des études préliminaires, relativement schématiques et sommaires, ce qui conduit à une incertitude sur les quantités et les prix.

Pour tenir compte de cette incertitude, un ratio de +/- 25%, basé sur les indications du CRB reprises ci-dessous, a été retenu sur l'ensemble des positions principales, hors transport et élimination des matériaux.

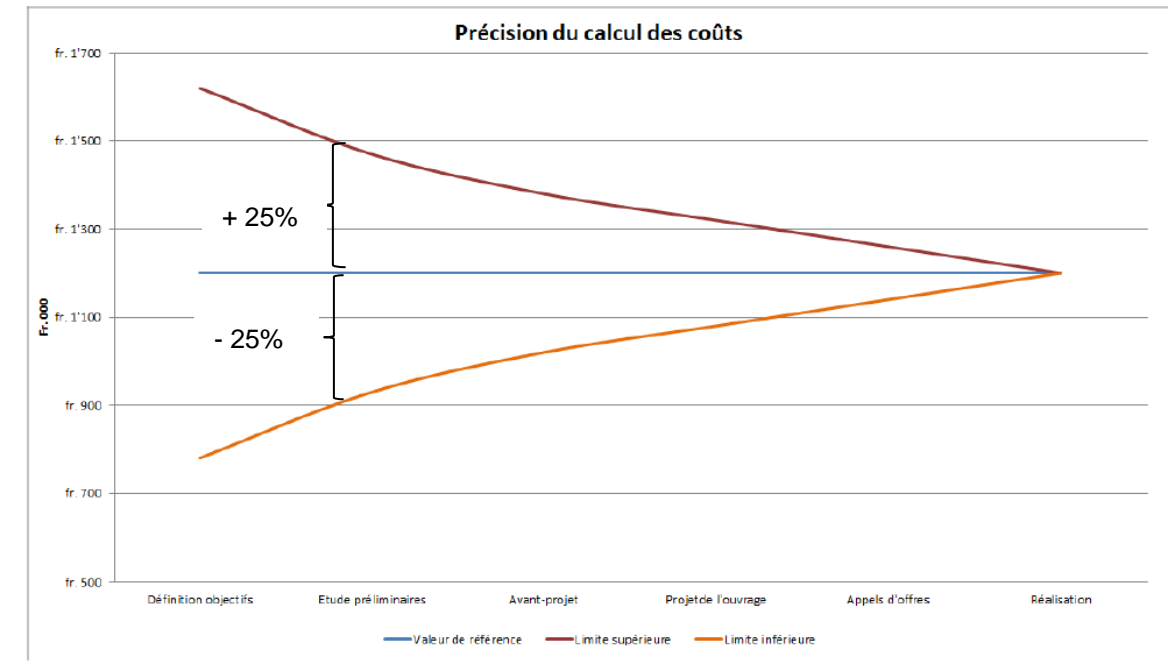


Figure 6.1 : Précision du calcul des coûts selon la phase du projet (CRB, Centre Suisse d'études pour la rationalisation de la construction)

6.5.2 Incertitudes des coûts du poste « transport et élimination des matériaux (traitement, valorisation) »

Cette position de coûts est entachée d'une plus grande incertitude qui provient de deux sources principales :

1. L'incertitude sur les volumes par catégorie, liée à l'hétérogénéité des dépôts et exprimée par l'étude géostatistique réalisée à partir des résultats et analyses des échantillons prélevés dans les forages.
2. L'incertitude sur les prix unitaires considérés pour l'évaluation, prix du marché actuel, susceptibles de fortes variations dans le temps notamment en fonction des disponibilités et capacités des entreprises au moment de l'appel d'offres public.

Ces deux sources d'incertitude sont prises en compte et considérées dans les tableaux ci-dessous pour chacune des 4 variantes. L'incertitude de +/- 30% sur les prix unitaires est appliquée à un coût de référence (coût de base utilisé pour comparer les variantes entre elles) qui tient compte de l'incertitude sur le tonnage des différentes catégories de matériaux.

Type de matériaux	Classes de concentrations en PCB [mg/kg]	*Transport et élimination (tri/conditionnement, CHF HT/t)	Variante 1 - Assainissement total						Coût [CHF] avec incertitude sur tonnage et prix unitaires		
			Volume [m³]		Tonnage [t]		Coût [CHF]		coût min (-30% sur prix unitaires)	coût de référence	coût max (+30% sur prix unitaires)
			moyen	avec incertitude	moyen	avec incertitude	tonnage moyen	avec incertitude sur tonnage			
Déchets	x < 0.1	195	35'687	31'137	64'236	56'046	12'526'061	10'929'020	7'650'314	10'929'020	14'207'726
	0.1 < x < 1	195	43'207	40'798	77'773	73'437	15'165'748	14'320'256	10'024'179	14'320'256	18'616'332
	1 < x < 10	225	66'336	64'463	119'405	116'033	26'866'188	26'107'413	18'275'189	26'107'413	33'939'637
	10 < x < 50	350	34'410	38'195	61'937	68'751	21'678'124	24'062'718	16'843'903	24'062'718	31'281'534
	50 < x < 1000	600	14'615	17'977	26'307	32'358	15'784'484	19'414'916	13'590'441	19'414'916	25'239'390
	1000 < x	650	3'122	4'807	5'619	8'653	3'652'397	5'624'691	3'937'284	5'624'691	7'312'098
TOTAL			197'377	197'377	355'279	355'279	95'673'002	100'459'014	70'321'310	100'459'014	130'596'718
Alluvions, graviers interglaciaires	x < 0.1	75	14'613	12'750	26'304	22'950	1'972'784	1'721'259	1'204'882	1'721'259	2'237'637
	0.1 < x < 1	75	17'693	16'706	31'847	30'071	2'388'520	2'255'360	1'578'752	2'255'360	2'931'968
	1 < x < 10	195	27'164	26'397	48'895	47'514	9'534'470	9'265'191	6'485'633	9'265'191	12'044'748
	10 < x < 50	225	14'090	15'640	25'363	28'152	5'706'563	6'334'285	4'433'999	6'334'285	8'234'570
	50 < x < 1000	600	5'985	7'361	10'773	13'250	6'463'516	7'950'124	5'565'087	7'950'124	10'335'162
	1000 < x	650	1'278	1'969	2'301	3'543	1'495'603	2'303'229	1'612'260	2'303'229	2'994'198
TOTAL			80'823	80'823	145'481	145'481	27'561'456	29'829'448	20'880'614	29'829'448	38'778'282
TOTAL			278'200	278'200	500'760	500'760	123'234'459	130'288'462	91'201'923	130'288'462	169'375'000

Type de matériaux	Classes de concentrations en PCB [mg/kg]	*Transport et élimination (tri/conditionnement, CHF HT/t)	Variante 2 - Assainissement zone haute						Coût [CHF] avec incertitude sur tonnage et prix unitaires		
			Volume [m³]		Tonnage [t]		Coût [CHF]		coût min (-30% sur prix unitaires)	coût de référence	coût max (+30% sur prix unitaires)
			moyen	avec incertitude	moyen	avec incertitude	tonnage moyen	avec incertitude sur tonnage			
Déchets	x < 0.1	195	22'389	17'370	40'300	31'267	7'858'500	6'096'998	4'267'898	6'096'998	7'926'097
	0.1 < x < 1	195	28'444	25'628	51'200	46'131	9'984'000	8'995'560	6'296'892	8'995'560	11'694'228
	1 < x < 10	225	56'500	54'630	101'700	98'333	22'882'500	22'124'985	15'487'490	22'124'985	28'762'481
	10 < x < 50	350	27'500	31'075	49'500	55'935	17'325'000	19'577'250	13'704'075	19'577'250	25'450'425
	50 < x < 1000	600	12'667	16'340	22'800	29'412	13'680'000	17'647'200	12'353'040	17'647'200	22'941'360
	1000 < x	650	3'667	6'123	6'600	11'022	4'290'000	7'164'300	5'015'010	7'164'300	9'313'590
TOTAL			151'167	151'167	272'100	272'100	76'020'000	81'606'293	57'124'405	81'606'293	106'088'181
Alluvions, graviers interglaciaires	x < 0.1	75	5'056	3'924	9'100	7'063	682'500	529'695	370'786	529'695	688'603
	0.1 < x < 1	75	6'389	5'754	11'500	10'357	862'500	776'756	543'729	776'756	1'009'782
	1 < x < 10	195	12'722	12'300	22'900	22'141	4'465'500	4'317'429	3'022'200	4'317'429	5'612'657
	10 < x < 50	225	6'222	7'031	11'200	12'656	2'520'000	2'847'600	1'993'320	2'847'600	3'701'880
	50 < x < 1000	600	2'833	3'655	5'100	6'579	3'060'000	3'947'400	2'763'180	3'947'400	5'131'620
	1000 < x	650	833	1'392	1'500	2'505	975'000	1'628'250	1'139'775	1'628'250	2'116'725
TOTAL			34'056	34'056	61'300	61'300	12'565'500	14'047'129	9'832'990	14'047'129	18'261'268
TOTAL			185'222	185'222	333'400	333'400	88'585'500	95'653'422	66'957'395	95'653'422	124'349'449

Type de matériaux	Classes de concentrations en PCB [mg/kg]	*Transport et élimination (tri/conditionnement, CHF HT/t)	Variante 3 - Assainissement partiel zone haute						Coût [CHF] avec incertitude sur tonnage et prix unitaires		
			Volume [m³]		Tonnage [t]		Coût [CHF]		coût min (-30% sur prix unitaires)	coût de référence	coût max (+30% sur prix unitaires)
			moyen	coût max	moyen	avec incertitude	tonnage moyen	avec incertitude sur tonnage			
Déchets	x < 0.1	195	6'722	5'538	12'100	9'968	2'359'500	1'943'754	1'360'628	1'943'754	2'526'880
	0.1 < x < 1	195	9'611	8'946	17'300	16'104	3'373'500	3'140'210	2'198'147	3'140'210	4'082'273
	1 < x < 10	225	29'167	28'725	52'500	51'705	11'812'500	11'633'713	8'143'599	11'633'713	15'123'827
	10 < x < 50	350	7'167	8'098	12'900	14'577	4'515'000	5'101'950	3'571'365	5'101'950	6'632'535
	50 < x < 1000	600	2'889	3'727	5'200	6'708	3'120'000	4'024'800	2'817'360	4'024'800	5'232'240
	1000 < x	650	778	1'299	1'400	2'338	910'000	1'519'700	1'063'790	1'519'700	1'975'610
TOTAL			56'333	56'333	101'400	101'400	26'090'500	27'364'127	19'154'889	27'364'127	35'573'365
Alluvions, graviers interglaciaires	x < 0.1	75	1'167	967	2'100	1'741	157'500	130'585	91'409	130'585	169'760
	0.1 < x < 1	75	1'667	1'555	3'000	2'799	225'000	209'897	146'928	209'897	272'866
	1 < x < 10	195	5'111	5'037	9'200	9'066	1'794'000	1'767'918	1'237'543	1'767'918	2'298'294
	10 < x < 50	225	1'278	1'444	2'300	2'599	517'500	584'775	409'343	584'775	760'208
	50 < x < 1000	600	500	645	900	1'161	540'000	696'600	487'620	696'600	905'580
	1000 < x	650	111	186	200	334	130'000	217'100	151'970	217'100	282'230
TOTAL			9'833	9'833	17'700	17'700	3'364'000	3'606'875	2'524'812	3'606'875	4'688'937
TOTAL			66'167	66'167	119'100	119'100	29'454'500	30'971'001	21'679'701	30'971'001	40'262'302

Type de matériaux	Classes de concentrations en PCB [mg/kg]	*Transport et élimination (tri/conditionnement, CHF HT/t)	Variante 4 - Confortation et sécurisation zone haute								
			Volume [m ³]		Tonnage [t]		Coût [CHF]		Coût [CHF] avec incertitude sur tonnage et prix unitaires		
			moyen	coût max	moyen	avec incertitude	tonnage moyen	avec incertitude sur tonnage	coût min (-30% sur prix unitaires)	coût de référence	coût max (+30% sur prix unitaires)
<i>Déchets</i>	x < 0.1	195	1'627	1'486	2'928	2'674	571'036	521'467	365'027	521'467	677'907
	0.1 < x < 1	195	3'443	3'367	6'198	6'060	1'208'552	1'181'702	827'191	1'181'702	1'536'212
	1 < x < 10	225	19'656	19'603	35'381	35'286	7'960'716	7'939'267	5'557'487	7'939'267	10'321'047
	10 < x < 50	350	711	804	1'280	1'446	448'030	506'273	354'391	506'273	658'155
	50 < x < 1000	600	141	181	253	326	151'750	195'758	137'031	195'758	254'485
	1000 < x	650	205	343	369	617	240'076	400'927	280'649	400'927	521'206
TOTAL			25'783	25'783	46'409	46'409	10'580'160	10'745'395	7'521'776	10'745'395	13'969'013
<i>Alluvions, graviers interglaciaires</i>	x < 0.1	75									
	0.1 < x < 1	75									
	1 < x < 10	195									
	10 < x < 50	225									
	50 < x < 1000	600									
	1000 < x	650									
TOTAL											
TOTAL			25'783	25'783	46'409	46'409	10'580'160	10'745'395	7'521'776	10'745'395	13'969'013

Tableau 6.5: Incertitudes sur les coûts des 4 variantes pour la position « transport et élimination des matériaux (traitement, valorisation) »

6.5.3 Estimation du coût des différentes variantes en tenant compte des incertitudes

Le tableau ci-dessous présente les coûts maximaux et minimaux de chacune des variantes calculés en tenant compte des incertitudes décrites aux points 6.5.1 et 6.5.2 ci-dessus. La valeur de référence correspond aux estimations des coûts rappelées dans le Tableau 6.4.

Position	Variante 1			Variante 2			Variante 3			Variante 4		
	Limite inférieure	Valeur de référence	Limite supérieure	Limite inférieure	Valeur de référence	Limite supérieure	Limite inférieure	Valeur de référence	Limite supérieure	Limite inférieure	Valeur de référence	Limite supérieure
Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	fr. 14'325'000	fr. 19'100'000	fr. 23'875'000	fr. 10'350'000	fr. 13'800'000	fr. 17'250'000	fr. 8'175'000.00	fr. 10'900'000	fr. 13'625'000	fr. 5'700'000	fr. 7'600'000	fr. 9'500'000
Travaux de terrassement	fr. 29'325'000	fr. 39'100'000	fr. 48'875'000	fr. 20'175'000	fr. 26'900'000	fr. 33'625'000	fr. 7'875'000.00	fr. 10'500'000	fr. 13'125'000	fr. 3'375'000	fr. 4'500'000	fr. 5'625'000
Transport et élimination des matériaux (traitement, valorisation)	fr. 91'200'000	fr. 130'300'000	fr. 169'400'000	fr. 67'000'000	fr. 95'700'000	fr. 124'300'000	fr. 21'700'000	fr. 31'000'000	fr. 40'300'000	fr. 7'500'000	fr. 10'700'000	fr. 14'000'000
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	fr. 3'825'000	fr. 5'100'000	fr. 6'375'000	fr. 8'872'500	fr. 9'100'000	fr. 11'375'000	fr. 8'025'000.00	fr. 10'700'000	fr. 13'375'000	fr. 8'850'000	fr. 11'800'000	fr. 14'750'000
Post-assainissement: entretien et surveillance	fr. 1'425'000	fr. 1'900'000	fr. 2'375'000	fr. 6'240'000	fr. 6'400'000	fr. 8'000'000	fr. 6'525'000.00	fr. 8'700'000	fr. 10'875'000	fr. 7'725'000	fr. 10'300'000	fr. 12'875'000
TOTAL	fr. 140'100'000	fr. 195'500'000	fr. 250'900'000	fr. 112'637'500	fr. 151'900'000	fr. 194'550'000	fr. 52'300'000	fr. 71'800'000	fr. 91'300'000	fr. 33'150'000	fr. 44'900'000	fr. 56'750'000

Tableau 6.6: Évaluation de l'incertitude totale sur les coûts des 4 variantes d'assainissement de la décharge de la Pila

Comme illustré sur le graphe ci-dessous, l'incertitude sur le coût total est de l'ordre de 28% pour les variantes 1 et 2, avec une part du coût total liée au transport et à l'élimination des matériaux comprise entre 63% et 68%. Cette incertitude sur le coût total décroît à 27 % et 26 % pour les variantes 3 et 4 pour lesquelles la part du coût total liée au transport et à l'élimination des matériaux est comprise entre 43% et 24%.

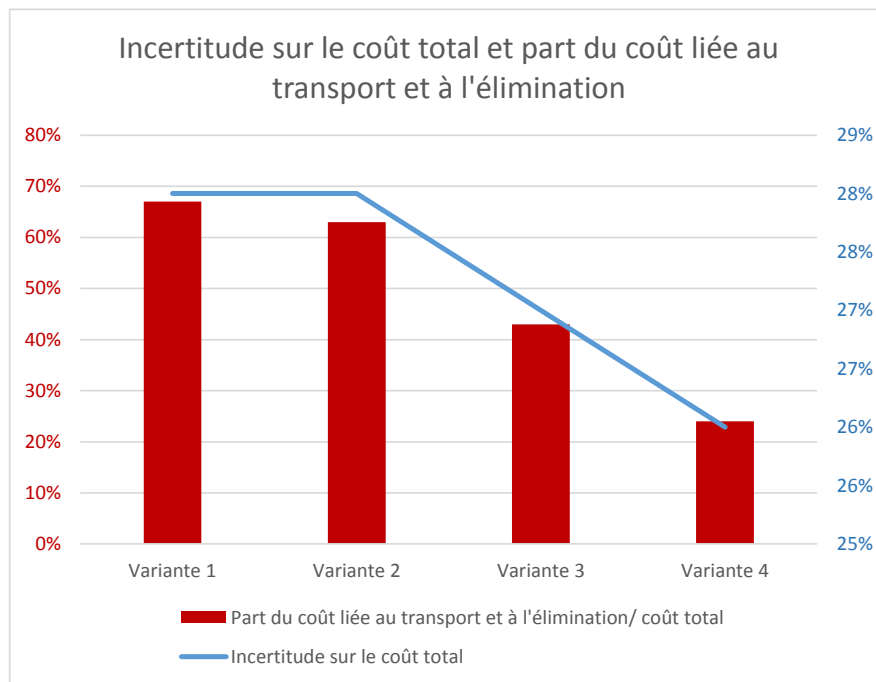


Figure 6.2: Incertitude sur le coût total de chaque variante et part du coût liée au poste transport et élimination

Le coût de référence arrondi au million est la valeur retenue pour la comparaison des variantes présentée ci-après.

Pour les variantes partielles, le volume de matériaux à excaver et traiter est susceptible d'évoluer dans le cadre du développement du projet d'assainissement, en fonction de la géométrie finale des talus de la partie de la décharge qui restera en place. Cette dernière devra être précisée à l'aide de sondages complémentaires permettant d'identifier les secteurs les plus contaminés à excaver de sorte que la surface du talus permette d'éviter la mise à jour de ces poches de contamination et leur mise en contact avec la surface du site nouvellement créée. Le coût de la variante 3 pourrait ainsi par exemple évoluer vers la limite supérieure de la fourchette de prix indiquée ci-dessus pour cette variante, soit environ 90 Mio de CHF, et s'approcher ainsi de la limite basse de la fourchette de coûts indiquée pour la variante 2, soit environ 110 Mio de CHF. La même observation peut être faite pour la variante 2, dont le coût pourrait également évoluer vers la partie haute de la fourchette de coûts présentée ci-dessus pour cette variante et s'approcher ainsi de la valeur de référence de la variante 1, soit environ 195 Mio de CHF.

6.6 Comparaison des variantes en termes de coût/ efficacité

La méthode de comparaison des variantes présentée ci-dessous se base sur la proposition formulée par le module « Évaluation des variantes d’assainissement » de l’aide à l’exécution de l’OFEV « Assainissement des sites contaminés ». La comparaison doit permettre d’identifier la variante optimale, c’est-à-dire celle qui permet d’atteindre les objectifs avec le meilleur rapport coût /efficacité.

Critères		Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	Etat de la technique / perspectives de réussite	1	4	3	2	1
	Flexibilité	1	5	4	3	1
	Infrastructure requise / Mesures de sécurité	1	1	2	3	3
Score faisabilité			10	9	8	5
Efficacité	Degré d'atteinte des objectifs d'assainissement pour les PCB	1	5	5	5	1
	Réduction du flux de PCB solide	1	5	5	5	5
	Réduction du flux de PCB dissous	1	5	4	4	2
	Niveau de contrôle possible	1	4	3	3	2
Score efficacité			19	17	17	10
Respect de l'environnement/ apport écologique	Potentiel de pollution/ réduction de la quantité de polluants	1	5	4	2	1
	Nécessité d'un suivi et d'une surveillance et durée des opérations/ Nécessité d'une maintenance des infrastructures	1	5	4	3	1
	Consommation d'énergie	1	1	2	3	4
	Emissions	1	1	2	4	4
	Score environnement			12	12	12
Score total			41	38	37	25

Tableau 6.7: Notation des variantes d’assainissement sans pondération

Les scores des différentes variantes pour les critères de faisabilité, efficacité et environnement récapitulés ci-dessus montrent que la variante 1 est celle qui présente le meilleur score total aux points. Les variantes 2 et 3 présentent des scores totaux très proches, à 3 et respectivement 4 points d’écart avec la variante 1.

La variante 4, qui ne permet pas d’atteindre l’objectif d’assainissement, est celle qui présente le moins bon score, à 16 points de la variante 1.

Les critères visant à apprécier la faisabilité, l’efficacité et le respect de l’environnement ne revêtent pas tous la même importance dans le cadre du projet de la Pila, c’est pourquoi, comme le propose la méthodologie de l’aide à l’exécution de l’OFEV, ces critères ont été pondérés individuellement entre les valeurs de 0.5 (peu pertinent) et 2 (indispensable). En tenant compte de la pondération, la variante 1 conserve le meilleur score, et l’écart par rapport aux autres variantes se creuse car les critères les plus pertinents, donc ceux avec la pondération la plus élevée, sont également ceux pour lesquels la variante 1 est la mieux notée (critères de respect des objectifs d’assainissement, de réduction du flux de PCB et de potentiel de pollution).

Critères		Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	Etat de la technique / perspectives de réussite	1.5	6	4.5	3	1.5
	Flexibilité	1.0	2.5	2	1.5	1
	Infrastructure requise / Mesures de sécurité	0.5	0.5	1	1.5	1.5
Score faisabilité			9	7.5	6	4
Efficacité	Degré d'atteinte des objectifs d'assainissement	2.0	10	10	10	2
	Réduction du flux de PCB solide	2.0	10	10	10	10
	Réduction du flux de PCB dissous	2.0	10	8	8	4
	Niveau de contrôle possible	0.5	2	1.5	1.5	3
Score efficacité			32	29.5	29.5	19
Respect de l'environnement/ apport écologique	Potentiel de pollution/ réduction de la quantité de polluants	2	10	8	4	2
	Nécessité d'un suivi et d'une surveillance et durée des opérations/ Nécessité d'une maintenance des infrastructures	1	5	4	3	1
	Consommation d'énergie	0.5	0.5	1	1.5	2
	Emissions	0.5	0.5	1	2	2
	Score environnement			16	14	10.5
Score total			57	51	46	30

Tableau 6.8: Notation des variantes d'assainissement avec pondération

Si l'on intègre le facteur coût à l'analyse et que l'on compare les variantes selon le ratio coût efficacité, on obtient un ratio de coût par point de score qui permet de mettre en évidence la variante dont le ratio est le plus bas, donc le plus favorable en termes coût/ efficacité.

	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Score total	57	51	42	30
Coût (MioCHF)	195	152	72	45
Ratio coût / efficacité	3.42	2.98	1.57	1.50

Tableau 6.9: Calcul du ratio coût/ efficacité pour les variantes d'assainissement

Le ratio coût efficacité est le meilleur pour la variante 4, avec un écart faible par rapport à la variante 3 (0.07 point). Les variantes 1 et 2 présentent des ratios nettement moins favorables.

La variante 4 ne respectant pas les objectifs d'assainissement, elle ne peut être considérée comme la variante optimale, soit celle qui permet d'atteindre les objectifs avec le meilleur rapport coût /efficacité.

Au terme de cette évaluation, c'est donc la **variante 3** qui permet d'atteindre les objectifs avec le meilleur ratio coût efficacité qui est identifiées comme étant la variante optimale.

Afin de tester la robustesse de cette évaluation, une autre méthode tenant compte d'une notation du prix selon la méthode au carré utilisée dans les marchés publics a été appliquée. Les tableaux ci-dessous présentent les résultats.

Critères	Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	1	10.00	9.00	8.00	5.00
Efficacité	1	19.00	17.00	17.00	10.00
Respect de l'environnement	1	12.00	12.00	12.00	10.00
Coûts (points selon formule au carré), max. 5 points	1	0.27	0.44	1.95	5.00

Tableau 6.10: Points bruts obtenus par les variantes pour les différents critères et pour le coût calculé selon la méthode au carré

Critères	Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	1	5.00	4.50	4.00	2.50
Efficacité	1	5.00	4.47	4.47	2.63
Respect de l'environnement	1	5.00	5.00	5.00	4.17
Coûts (points selon formule au carré), max. 5 points	1	0.27	0.44	1.95	5.00
Somme des points sans pondération		15.27	14.41	15.42	14.30

Tableau 6.11: Points ramenés à 5 pour tous les critères

Critères	Pondération	Variante1	Variante2	Variante 3	Variante 4
Faisabilité	15%	0.75	0.68	0.60	0.38
Efficacité	30%	1.50	1.34	1.34	0.79
Respect de l'environnement	15%	0.75	0.75	0.75	0.63
Coûts (points selon formule au carré), max. 5 points	40%	0.11	0.18	0.78	2.00
Somme des points avec pondération	100%	3.11	2.94	3.47	3.79

Tableau 6.12: Points pondérés

La variante 3 obtient le maximum des points sans pondération des critères. Avec pondération des différents critères, la variante 4 est la mieux notée.

Les résultats sont comparables à l'évaluation selon le ratio coût/ bénéfice : la variante 4 ne permettant pas d'atteindre les objectifs d'assainissement, c'est la variante 3 que la somme des points désigne comme étant la variante optimale, c'est-à-dire celle qui permet d'atteindre les objectifs avec le meilleur rapport coût efficacité.

7. Synthèse – Choix de la variante optimale

Les variantes d'assainissement du site de la Pila identifiées dans le cadre de la présente étude représentent deux grands options : un assainissement total du site (variante 1), par excavation et traitement de la totalité des déchets et matériaux pollués, ou un assainissement partiel, par excavation de tout (variante 2) ou partie (variantes 3 et 4) du secteur de la décharge le plus contaminé et le plus proche de la Sarine.

L'évaluation des variantes présentée au chapitre précédent a permis de mettre en évidence que la variante 3 d'assainissement partiel par excavation et traitement d'une partie des matériaux de la zone haute de la décharge présente le meilleur ratio coût/ efficacité. De plus, cette variante permet d'atteindre l'objectif d'assainissement à un coût global de plus de 50% inférieur aux variantes 1 et 2 qui sont dans le même cas.

L'évaluation permet d'écarter définitivement la variante 4 dont le coût plus bas ne suffit pas à compenser les désavantages importants qu'elle présente : en particulier le fait qu'elle ne satisfait pas aux objectifs d'assainissement fixés par l'autorité pour les PCB et que, de ce fait, elle ne pourrait vraisemblablement pas obtenir les subventions liées à l'OTAS.

Le tableau ci-dessous résume les effets et caractéristiques des variantes identifiées en fonction des critères déterminants pour le choix de la variante optimale :

Critères déterminants pour le choix	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Respect des objectifs d'assainissement pour les PCB	Oui	Oui ¹⁾	Oui ¹⁾	Non
Volume de matériaux extraits/ Volume total pollué %	270'000 m ³ / 270'000 m ³ 100%	185'000 m ³ / 270'000 m ³ 68%	66'000 m ³ / 270'000m ³ 24 %	26'000 m ³ / 270'000m ³ 10 %
Réduction du flux de PCB dissous	100%	99%	97%	70%
Masse de PCB extraite / Masse de PCB totale présente sur le site %	31 tonnes 100 %	25 tonnes 80 %	10 tonnes 32%	3 tonnes 10%
Masse de PCB restant sur le site après assainissement (T)	0	6 tonnes	21 tonnes	29 tonnes
Coût de référence (Mio CHF)	195	152	72	45
Coût / tonne de PCB éliminée du site (Mio CHF)	6.3	6.1	7.2	15
Coût par % de réduction du flux de PCB dissous (Mio CHF)	1.95	1.53	0.74	0.64

Tableau 7-1 Synthèse des effets et caractéristiques des différentes variantes ¹⁾risque de dépassements ponctuels de 10 x valeurs de concentrations en PCB dans les eaux souterraines en cas de crue exceptionnelle)

La variante 3 d'assainissement partiel de la zone haute ressort clairement comme variante optimale mise en évidence par l'analyse réalisée dans le cadre de cette étude.

Le développement au stade d'un avant-projet (= projet d'assainissement OSites) de cette variante dépendra d'études détaillées à mener notamment sur :

- La délimitation précise de la zone à excaver et la géométrie du talus. L'emprise effective du projet d'assainissement qui sera étudié, et par conséquent le volume excavé, pourrait se situer entre la Variante 2 et la Variante 3. L'acquisition de connaissances complémentaires (géologie, déchets, eaux) sera nécessaire aux frontières et au sein du périmètre étudié.
- La possibilité effective de valoriser des matériaux sur place à l'issue d'un prétraitement sur le site et le coût d'une telle opération par rapport à un traitement hors site et un apport de matériaux propres : un test devra être réalisé sur les matériaux représentatifs du corps de la décharge.
- Les objectifs de remise en état et de restitution du site à la zone alluviale : les choix qui seront faits conditionneront les objectifs d'assainissement à atteindre pour les alluvions, les traitements possibles de ces matériaux et les éventuelles mesures de recouvrement/enrochement nécessaires.
- La validité des enseignements acquis dans les domaines hygiène et sécurité pour un chantier de grande ampleur. Par exemple, la réalisation de certains travaux d'excavation ou de prétraitement sous un couvert sécurisé est-elle nécessaire en tant que mesure de protection collective ? Les mesures de protection individuelles actuelles doivent-elles être adaptées ?
- Les contraintes hydrauliques liées à la Sarine (crue extrêmes, exploitation de l'usine hydroélectrique d'Hauterive) afin de concevoir et dimensionner les dispositifs de protection des futures berges et les mesures de protection durant le chantier. Le projet devra également être adapté selon les possibilités effectives de réaliser certains travaux en période de basses eaux de la Sarine.
- Les synergies potentielles avec les installations de traitement des déchets locales existantes (par exemple : usine d'incinération SAIDEF, décharge contrôlée de Châtillon).
- L'interaction du projet d'assainissement avec la réalisation de la route Marly-Matran dont la construction potentielle de piles de pont sur le site de la Pila et un calendrier qui pourrait influencer la conception du projet d'assainissement.

8. Documentation

Lois, directives

- [1] Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets. (Ordonnance sur les déchets, OLED). du 4 décembre 2015 (Etat le 19 juillet 2016).
- [2] Office fédérale de l'Environnement, OFEV, 2016 : Assainissement in situ. L'environnement pratique.
- [3] OFEV, 2014 Évaluation des variantes d'assainissement. Un module à l'aide à l'exécution « Assainissement des sites contaminés ». L'Environnement pratique.
- [4] OFEV, 2010 : Polychlorobiphényles (PCB) dans les eaux en Suisse. Données concernant la contamination des poissons et des eaux par les PCB et les dioxines: évaluation de la situation.
- [5] OFEV, 2007 : Confinement des sites contaminés par des décharges. Etat de la technique, possibilités et limites. L'Environnement pratique.

Rapports CSD / autres

- [6] CSD Ingénieurs SA, 2017, 25.05.2018 : Décharge de la Pila. Suite des démarches en relation avec le projet d'assainissement. Mesures complémentaires. Version 2. FR 2706.917.600
- [7] CSD Ingénieurs SA, 2017, 30.06.2017 : Décharge de la Pila. Suite des démarches en relation avec le projet d'assainissement. Mesures complémentaires. FR 2706.917.600

- [8] CSD Ingénieurs SA, 2017 : Décharge de la Pila. Surveillance des eaux souterraines selon OSites & Monitoring de la Sarine (Pronat) 2016
- [9] CSD Ingénieurs SA, 08.04.2016 : Décharge de la Pila. Suite des démarches en relation avec le projet d'assainissement. Cahier des charges
- [10] CSD Ingénieurs SA, 28.02.2014 : Décharge de la Pila. Projet d'assainissement selon l'OSites. Prise en considération des nouvelles données et éléments depuis décembre 2010
- [11] Brgm / irstea, nov. 2012 : Décharge de la Pila. Commune de Hauterive. Expertise des investigations et du projet d'assainissement de la décharge de la Pila et de ses environs. Rapport final. BRGM/RP-61497-FR.
- [12] CSD Ingénieurs SA, 28.12.2010 : Décharge de la Pila. Projet d'assainissement selon l'OSites. FR2706.900
- [13] Kidova, 2010 : Modélisation géostatistique de la contamination de la décharge de la Pila. Compléments à l'étude KIDOVA RP CSD 2009001
- [14] Kidova, 2009 : Modélisation géostatistique de la contamination de la décharge la Pila. Rapport de synthèse.
- [15] CSD Ingénieurs SA, 15.12.2008 : Décharge de la Pila. Investigation détaillée de l'ensemble du site. FR2706.300

Courriers

- [16] Lettre du Service de l'Environnement au Consortium la Pila, 29.11.17. Ancienne décharge de la Pila sur la commune d'Hauterive (FR) – investigations complémentaires – rapports CSD Ingénieurs du 30 juin 2017, du 15 juillet 2017 et du 30 octobre 2017 – détermination technique
- [17] Lettre du Service de l'Environnement au Consortium la Pila, 23.04.18. Ancienne décharge de la Pila sur la commune d'Hauterive (FR) – investigations complémentaires – Objectifs d'assainissement

CSD INGENIEURS SA

Olga Darazs

pp. Sébastien Paratte

Fribourg, le 31.05.2018

PRINCIPAUX COLLABORATEURS CHARGÉS DE L'ÉTUDE

Olga Darazs, Géologue dipl. UNIFR, Hydrogéologue dipl. CHYN, MBA dipl. UNIFR

Alexandra Fröhlich, Dipl. sc. nat. EPFZ, Hydrogéologue dipl. CHYN

Sébastien Paratte, Ingénieur en Environnement dipl. EPFL

Tamara Ghilardi, Dr. sc. Environnement EPFL

François Hey, Ingénieur civil dipl. EPFL/SIA

\\csding.corp\csding\Inter-Filiale\FR_Fribourg\Datas\Csdf\MANDATS\2700-749\FR2706.18 Pila\Variantes assainissement\Rapport final variante ass\La Pila Rapport final Variantes assainissement mai 2018.docx

Pour préserver l'environnement, CSD imprime ses documents sur du papier 100 % recyclé (ISO 14001).

**ANNEXE A PROCÈS-VERBAL DE LA SÉANCE DU 30 MARS 2017
ET LETTRE DU SEN DU 23.04.2018**

Note de séance

Décharge de la Pila – Séance technique

Analyse de variantes – Déterminations du SEn et de l'OFEV

Date / Heure:	30 mars 2017 / 8 h – 10 h
Lieu:	Service de l'environnement, Givisiez
Participants:	Christiane Wermeille, OFEV Reto Tietz, OFEV Elise Folly, SEn Loïc Constantin, SEn Sébastien Paratte, CSD Olga Darazs, CSD
Excusé(e)s:	---
Distribution:	Aux participants Au Consortium pour l'assainissement de la Pila

Sujet principal:	Variantes d'assainissement – Objectifs d'assainissement et conditions à satisfaire pour un assainissement durable
-------------------------	---

Sont résumés ci-dessous des points principaux abordés en séance afin d'identifier les variantes d'assainissement durables pour la décharge de la Pila :

1. Objectifs que doit atteindre l'assainissement :

- a. Pas de dépassement de la valeur de 10 x OSites à l'aval à proximité du site (l'aval à proximité du site est considéré comme la bordure aval qui forme le pourtour de la décharge actuelle). La partie de la décharge que l'on laisserait en place dans le cadre d'un assainissement partiel ne doit pas générer d'écoulement vers la zone aval à proximité du site (donc vers la rivière) qui dépasse en « temps normal », hors crue, la valeur correspondant à 10 x OSites.
- b. Pas de déchets dans la Sarine : l'assainissement doit permettre d'exclure tout déversement de déchets dans la Sarine (par exemple entraînés par une crue).
- c. Une dérogation selon l'art. 15 OSites est envisageable pour la zone basse en cas de crue entraînant ponctuellement un dépassement de la valeur de 10 x OSites en aval à proximité du site, sans effet sur les poissons.

2. Contenu de l'analyse de variantes :

- a. Canevas basé sur celui de la méthodologie OFEV mais adapté au projet de la Pila en fonction des connaissances disponibles et de la nécessité de prendre en compte l'aspect des crues (un projet sera soumis pour validation).
- b. Les objectifs précisés par les autorités orientent les variantes vers les possibilités suivantes :
 - i. Variante par décontamination partielle : comprend le périmètre permettant de satisfaire la valeur de 10 x OSites à l'aval à proximité du site. En première approche, basée sur l'analyse des eaux souterraines dans les piézomètres présents sur le site, il s'agit d'un périmètre comprenant la zone haute de la décharge et un secteur adjacent fortement contaminé en profondeur.

- ii. Variante par décontamination tenant compte d'une crue extrême (dont les éléments de base devraient encore nous être fournis par Groupe e) : cette dernière pourrait potentiellement entraîner une partie de la décharge dans le secteur de la zone basse qui resterait en place dans le cas d'un assainissement partiel. Ce scénario reste à vérifier ultérieurement sur la base des données de Groupe e, mais conduirait probablement vers un assainissement proche d'un assainissement total.
- c. Pour chacune des variantes, il s'agira de calculer les volumes par catégories de façon à pouvoir évaluer des coûts sur la base des prix du marché.
- d. Pour le traitement des matériaux, la prise de position des autorités oriente les choix possibles vers ceux qui permettent une destruction maximale des PCB, ce qui signifie :
 - i. Pré-traitement des matériaux excavés
 - ii. Traitements thermiques / mise en décharge selon le contenu en PCB des fractions issues du prétraitement
 - iii. Lavage éventuel pour les alluvions ou fractions grossières

L'analyse de variantes sera remise conformément au calendrier pour la fin juin 2017. Elle sera complétée le cas échéant en fonction des données relatives à la crue extrême en cours d'évaluation par les mandataires de Groupe e.

Fribourg, le 20 avril 2017

Pour la note de séance: Olga Darazs



ETAT DE FRIBOURG
STAAT FREIBURG

Service de l'environnement SEn
Amt für Umwelt AfU

Impasse de la Colline 4, 1762 Givisiez
T +41 26 305 37 60, F +41 26 305 10 02
www.fr.ch/sen

Service de l'environnement
Impasse de la Colline 4, 1762 Givisiez

Consortium La Pila
p.a. M. Fabien Noël, Président
Direction de l'Edilité
Rue Joseph-Piller 7
1700 Fribourg

Réf : Loïc Constantin / Diego Campisi/mns
T direct: + 41 26 305 51 91 et +41 26 305 69 94
Courriel: loic.constantin@fr.ch et diego.campisi@fr.ch

Givisiez, le 23 avril 2018

Ancienne décharge de la Pila sur la commune d'Hauterive (FR) – investigations complémentaires – Objectifs d'assainissement

Monsieur le Président,

Dans le cadre de la séance technique du 20 février 2018, il a été convenu que notre service informe le Consortium sur les dernières discussions qui ont lieu avec l'OFEV à propos des objectifs d'assainissement.

En guise de rappel, la décharge de La Pila nécessite un assainissement par rapport aux eaux de surface (art. 10, al. 2, let.a, OSites). En ce qui concerne les PCB, leur teneur dépasse 10 fois la valeur de concentration de l'OSites dans les eaux qui s'écoulent dans les eaux de surface.

L'objectif initial de l'assainissement de la décharge de la Pila est défini à l'art. 15 OSites qui stipule que « l'assainissement a pour but d'éliminer les atteintes, ou les dangers concrets d'apparition de telles atteintes, qui ont été à l'origine des besoins d'assainissement ». C'est sur cette base que le SEn a indiqué en mars 2010 que la concentration en PCB dans les eaux qui s'écoulent dans les eaux de surface devra par exemple être au moins inférieure à 10 fois la valeur de concentration de l'OSites. Sur la base de cet objectif, le Consortium a remis en décembre 2010 le projet d'assainissement développé par CSD Ingénieurs SA (ci-après « CSD ») prévoyant l'excavation totale de la décharge.

Dès 2011, les questions relatives à la possibilité de s'écarter du but de l'assainissement en application de l'art 15, al. 3 OSites et aux effets des mesures d'assainissement sur les biens à protéger sont étudiées.

En fonction notamment 1) des données alors à disposition, 2) du fait que les flux de polluants exportés depuis la zone haute présentent des teneurs moyennes dépassant 10 fois la valeur OSites avec une fréquence quotidienne et 3) que cette zone contribuait, avant la réalisation des mesures préliminaires, de façon prépondérante à l'exportation de PCB vers la rivière (cf rapport CSD du 15 juillet 2017, p. 17), les objectifs d'assainissement ont été discutés entre le Consortium, CSD, l'OFEV et notre service le 30 mars 2017 et résumés comme suit (cf rapport CSD 15 juillet 2017, p. 26) :

Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions DAEC
Raumplanungs- Umwelt- und Baudirektion RUBD

1. *« Pas de dépassement de la valeur de 10 x OSites à l'aval à proximité du site (l'aval à proximité du site est considéré comme la bordure aval qui forme le pourtour de la décharge actuelle). Par exemple, la partie de la décharge que l'on laisserait en place dans le cadre d'un assainissement partiel ne doit pas générer d'écoulement vers la zone aval à proximité du site (donc vers la rivière) qui dépasse en « temps normal », hors crue, la valeur correspondant à 10 x OSites (par exemple, = 1 µg/l 4.3*Σ6 i-PCB).*
2. *Pas de déchets dans la Sarine : l'assainissement doit permettre d'exclure tout déversement de déchets dans la Sarine (par exemple entraînés par une crue).*
3. *Une dérogation selon l'art. 15 OSites est envisageable pour la zone basse en cas de crue entraînant ponctuellement un dépassement de la valeur de 10x OSites en aval à proximité du site, sans effet sur les poissons »*

Concernant le point 2, il s'agit de rappeler ici que la notion de « déchets » englobe les matériaux souillés présents sur le site.

CSD conclut dans son rapport du 15 juillet 2017 que la variante 1 d'assainissement consistant en un *« assainissement partiel, c'est-à-dire de la zone haute, avec sécurisation des secteurs exposés à l'érosion par la Sarine en cas de crue sur la zone basse »* répondait aux buts d'assainissement et ressortait comme variante optimale.

La question de l'objectif d'assainissement a été développée dans notre détermination du 29 novembre 2017 qui reste d'actualité. Vous trouverez ci-après quelques commentaires sur son contenu au vu des derniers échanges que notre service a eus avec le Consortium et l'OFEV.

Nous confirmons qu'à ce stade, les grands principes repris par CSD dans le chapitre 2.4.1 de son rapport du 15 juillet 2017 ne nécessitent pas d'adaptation et l'évaluation des variantes d'assainissement peut se faire sur cette base.

Concernant les variantes d'assainissement partiel, nous confirmons que les évaluations qui pourraient nécessiter de nouveaux prélèvements et analyses pourront être faites dans une prochaine phase du projet, à savoir dans le cadre de l'élaboration du projet d'assainissement. A ce stade il est souhaité de valoriser les données à disposition afin d'estimer au mieux les émissions résiduelles via les eaux souterraines vers la Sarine et l'effet des mesures d'assainissement sur ces dernières.

Nous acceptons l'idée du Consortium de développer la variante 4 qui consiste en des mesures durables de protection des berges tout au long de la décharge. Cela permettra en effet de disposer d'un panel de solutions le plus complet possible.

La variante optimale qui sera retenue devra assurer une réduction efficace de la pollution à l'environnement tout en optimisant les investissements.

Une des questions qui reste ouverte concerne la possibilité de viser des émissions de la décharge inférieures à 10 fois la valeur de concentration OSites en n'intervenant que de manière partielle dans la partie haute. Les conclusions de CSD dans sa note du 30 janvier 2018 vont dans ce sens : *« Les PCB étant des polluants organiques persistants, il paraît judicieux dans une perspective de long terme et indépendamment de l'effet sur les poissons, d'en limiter au maximum les émissions depuis le site de la Pila en adoptant une approche coût efficacité. Si cet objectif est retenu par les autorités, une évacuation ciblée des matériaux du secteur à proximité du puits PPI, « zone du hot spot » dans laquelle se trouvent de nombreux condensateurs, à proximité immédiate de la Sarine et à l'origine de 90% des émissions résiduelles, pourrait être envisagée dans le cadre d'une variante d'assainissement partiel de la zone haute de la décharge ».*

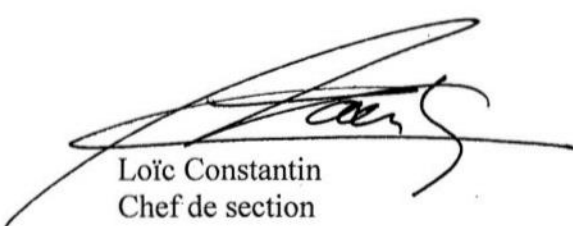
Nous soutenons l'approche qui vise à évaluer une intervention partielle dans la zone haute de la décharge en utilisant des critères tels que les coûts et l'efficacité. L'étendue de l'intervention dans la zone haute de la décharge pourra être affinée dans le cadre de l'établissement du projet d'assainissement. L'intention étant à ce stade d'arrêter le type de variante qui permet d'atteindre de manière optimale les objectifs rappelés dans le présent courrier.

Les objectifs seront définitivement fixés lors de l'évaluation du projet d'assainissement. Des informations complémentaires seront alors disponibles notamment en lien avec l'effet des mesures. Sur cette base, la décision d'assainissement sera rendue conformément à l'art. 18 OSites et les buts définitifs de l'assainissement seront arrêtés en tenant notamment compte des enjeux économiques, techniques et environnementaux.

Concernant le caractère persistant du polluant et la durabilité des mesures, nous rappelons ci-après les éléments présentés lors de la séance du COPAR du 28 mars dernier :

- > **Persistance du polluant:** les PCB sont des polluants persistants. Cela signifie qu'ils se dégradent difficilement, ce qui limite les possibilités de recourir à des mesures de confinement. La Suisse a ratifié la Convention de Stockholm qui va dans le sens de limiter les émissions de polluants persistants dans l'environnement.
- > **Durabilité des mesures:** Extrait de l'aide à exécution de l'OFEV « Evaluation des variantes d'assainissement » 2014 (p.12 et 13) : « Elimination durable du danger: l'assainissement doit être une solution définitive; ses effets doivent donc être durables. Résolution du problème de contamination en une ou deux générations : les mesures d'assainissement doivent avoir déployé leurs effets en l'espace de 25 à 50 ans au maximum, de sorte que les sites concernés puissent alors être laissés tels quels, sans qu'il soit nécessaire de prendre d'autres mesures particulières ».

Nous restons à votre disposition et celle de vos mandataires en cas de questions et vous adressons, Monsieur le Président, nos respectueuses salutations.



Loïc Constantin
Chef de section

Copie

-

Willy Eyer, Service des forêts et de la faune, Céans
Jean-Cyril Favre, Geosud SA, Rue de la Condémine 9, 1630 Bulle
CSD Ingénieurs SA, Route Jo-Siffert 4, 1762 Givisiez
Christiane Wermeille, OFEV, 3003 Bern.
Christophe Joerin, Elise Folly et Rachel Brulhart, SEn, Céans

**ANNEXE B LISTE DES PROCÉDÉS HORS SITE, SUR SITE ET IN
SITU**

Étape 2 – Évaluation générale des procédés de décontamination sur site et hors site Identification de procédés d'assainissement techniquement réalisables

+ faisable et efficace / (+) moyennement faisable et efficace / - non applicable

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Autres applications	Traitement hors site	Traitement sur site	Evaluation	Références
A Excavation, prétraitement et mise en décharge									
	A10	Mise en décharge (« dig and dump »).	-	-	-			La variabilité très importante des déchets en terme de composition et de contamination exclut toute mise en décharge sans pré-traitement / traitement.	.
	A20	Procédés de prétraitement sur le site	+	+			+	Tri, aérobisation, séchage, conditionnement, concassage, broyage	
	A30	Procédés de prétraitement sur le site	+	+		+		Prétraitement dans installation fixe pour matériaux très hétérogènes et surtout pour les catégories PCB > 10 ppm. Exemple BAZO à Oberglatt. Concassage, dé ferrailage, tri, conditionnement, tamisage, broyage etc.	[9]
B Excavation et traitement (dig and treat)									
Procédés thermiques	B10	Incinération dans une installation d'incinération des déchets spéciaux	+	-	(+)	+	-	Applicable après prétraitement et conditionnement (matériaux correspondant aux ordures ménagères, sans condensateurs et déchets contenant des teneurs PCB > 10 ppm). Possibilité de traitement thermique en UIOM en Suisse qui sont équipés de filtres efficace pour les furanes / dioxines. → Valorisation énergétique	
	B11	Incinération en cimenterie;	(+)	+	(+) boues de lavage	+	-	Applicable après prétraitement et conditionnement. Fraction minérale homogène et avec peu ou pas de déchets inertes de porosité élevée. Teneurs en PCB max. 10 ppm selon OLED ;	Directive cimenteries [15] OLED [1]
	B12	Incinération basses températures (400-550°C), hautes températures (450-	+	-	-	+	(+)	Élimination complète des PCB dans les déchets / condensateurs. Le sol est chauffé directement (ou indirectement) par exemple, dans un four rotatif ou installation de systèmes de fluides de lit chauffé jusqu'à ce que les polluants volatils ou leur	

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Autres applications	Traitement hors site	Traitement sur site	Evaluation	Références
		800 °C) : four rotatif ; four à lit fluidisé						produits de dégradation se vaporisent. La combustion des polluants a généralement lieu en aval avec traitement du gaz. Nécessite prétraitement et conditionnement des déchets. Consommation important d'énergie. Facteur limitant : métaux lourds. Traitement principalement dans installation en UE (D, B, H, F). Parmi les procédés de traitement des sols le procédé le plus développé (procédé conventionnel).	
	B13	Désorption thermique (ESTD)	Fraction minérale	-	+ (boues)	-	+	<p>1. Applicable à la fraction minérale (déchets après tri, alluvions). Teneurs PCB > 10ppm. Séparation physique sans destruction des polluants (PCB doit être détruit par un procédé complémentaire). Nécessite prétraitement nécessaire (tri, déshydratation). Produits secondaires toxiques (dioxines, furanes). Traitement de produits secondaire (eaux, particules, gaz. Traitement complexe des gaz (haute température, destruction complète des dioxines/furanes). Destruction des PCB avec procédés complémentaires (incinération, traitement des gaz, eaux).</p> <p>2. Procédé à tester avec essais-pilotes. Les exemples cités par EPA montrent que les teneurs résiduelles après traitement sont supérieures à l'objectif d'assainissement pour La Pila.</p>	EPA 2012 [10]
Procédé chim.-phys.	B20	Désorption par solvants - Standard - Gas liquifié - Critical solution temperature, CST) solvents	(+)	(+)	(+)	+	+	Applicable à la fraction minérale (déchets après tri, alluvions). Teneurs PCB > 10ppm. Procédé appliqué en combinaison avec autres procédés. Procédé non utilisé pour la désorption des métaux lourds.. Nécessite prétraitement : tri (type déchets, fraction, réduction de la taille), extraction des polluants, séparation des solvants, condensation des polluants, recyclage des solvants. Efficacité influencé par le volume des matériaux à traiter, le nombre d'étapes nécessaires pour l'extraction et les paramètres opérationnels.	EPA 2012 [10]
	B21	Lavage (eaux, tensides, acides, bases), lavage à haute pression / extraction chimique	(+)	+	+	+	+	Applicable à la fraction minérale (déchets après tri, alluvions), nécessite prétraitement et conditionnement des déchets. . Pour des fractions suffisamment homogènes (tri fin) cf. essais-pilote effectué par Eberhard. Effectivité dépendant de la teneur en matière inertes anthropogène (porosité). Limité par teneur en fines (efficace sur fraction minérale avec < 35% fines) et contaminations mixtes. PCB avec k_{ow} élevé difficilement séparable (additifs nécessaires). Faisable pour matériaux hautement pollués par les PCB.	EPA 2012 [10] CSD 2012 [7]
	B30	Transformation	-	-	boues			À l'échelle laboratoire, procédés pas encore éprouvés	BRGM 2012

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Autres applications	Traitement hors site	Traitement sur site	Evaluation	Références
		chimique (oxydation / réduction)							[11], Zimmerman 2004 [19]
Procédés chimiques		Déchloration a) Fer zero nanoparticules, fer palladié (Fe/Pd) b) décomposition par catalyse par base (BDC) c) par électrons solvatés, SET™ d) Extraction par solvants (alcanes, alcools, cétones), gaz liquide (propane, butane, dioxyde de carbone), CST (Critical Solution Temperature) e) Réduction par réduction chimique (phase gazeuse) GPCR™	-	(+)	(+) eau+ souterraines, boues	+	+	Applicable pour sédiments et eaux souterraines. Traitement possible même pour PCB en phase (huile de transformateur). Destruction de tous les congénères non garantie. EPA, 2012 cite 4 exemples d'application commerciale, dont un a atteint une contamination résiduelle minimale 0.3-0.5 mg/kg PCB (moyenne : 2 mg/kg ; teneur initiale : 3-25 mg/kg). Fer zéro : coûts élevés, temps de réactivité court et difficilement contrôlable en termes de processus cinétiques. Application limitée à l'échelle industrielle. Prétraitement nécessaire (séchage, tri, désorption thermique (300°C)). Produits de dégradation : biphenyls, dioxines, furanes (traitement des gaz nécessaires). Sensibilité aux métaux lourds. Procédés nécessitant des grandes quantités de solvants (sécurité, transport, entreposage). PCB doivent être détruits par un procédé complémentaire (gaz, eaux, solvants, poussières). Suivi intensif pour garantir destruction complet des PCB. Facteur limitant : métaux lourds, humidité, fraction fine. Valorisation dépend de l'efficacité du procédé.	EPA 2012 [10]
Procédés biologiques	B40	Landfarming	-	-	-		+	Difficilement applicable pour PCB (non pour métaux lourds). Procédé en phase de développement (à valider à l'échelle industrielle, selon [9]) . Efficacité (pour PCB) variable. Nécessite beaucoup de place Non adapté pour déchets (hétérogènes). Contrôles / traitement eaux, poussières, air . Objectif d'assainissement difficilement atteignable	EPA 2012 [10] MADEP sur matériaux Pila, PCB Axelera [9]

Etape 2 – Evaluation générale des procédés de décontamination in-situ Identification de procédés d'assainissement techniquement réalisable

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Eaux souterraines	Evaluation	Références
C Zone insaturée							
P. pneumatiques	C10	Aspiration de l'air interstitiel	-	-	-	Procédé non applicable pour polluants présents sur le site (peu ou pas volatiles)	
P. hydraulique	C20	Infiltration verticale	-	-	-	Procédé efficace pour polluants mobiles, mais non pour PCB / métaux lourds	
P. biologique	C30	Bioventilation	-	-	-	Polluants principaux non volatiles	
	C40	Aérobisation	-	-	-	Résultats de dégradation aérobie peu probants	[11]
Zone saturée							
Procédés pneumatiques	C50	Barbotage (air sparging) ou stripping (stripping)	-		-	Procédé non applicable pour polluants présents sur le site (peu ou pas volatiles)	
	C51	Prélèvement de phase	-	-	(+)	Pour huile (transformateur) dans les eaux souterraines au centre de la zone haute la décharge. Procédé à appliquer en combinaison avec d'autres procédés. Nécessite tTraitement / élimination des phases. Procédé à appliquer en cas de nécessité et seulement en combinaison avec autres procédés.	
édés hydr auliq	C52	Pump and treat	-	-	(+)	Applicable pour la décontamination des eaux souterraines comme procédé complémentaire. Pas applicable pour décontaminer les alluvions (PCB peu ou pas soluble, efficacité limitée, longue durée). A appliquer en combinaison avec autres procédés pour la contamination résiduelle.	

	Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Eaux souterraines	Evaluation	Références
	C60 Infiltration verticale / infiltration dans la nappe	-	-	-	Procédé pas adapté pour les polluants de faible solubilité comme les PCB	
	C61 Circulation d'eau souterraine	-	-	(+)	Applicable pour la décontamination des eaux souterraines comme procédé complémentaire. Pas applicable pour décontaminer les alluvions (PCB peu ou pas soluble, efficacité limitée, longue durée). Procédé en combinaison avec autres procédés de décontamination pour la pollution résiduelle dans la nappe, mais succès d'atteindre l'objectif d'assainissement peu probable	
	C62 Barrières réactives : Fe ⁰ (nanoparticules), Fe/Pd ou Fe/Ni, substances sorbantes (charbon active, agents tensioactifs)	-	-	-	Procédé appliqué pour traitement de sédiments et eaux souterraines. Efficace comme confinement combiné avec un procédé d'assainissement appliqué à la source de contamination (décharge). Procédés hydrauliques passifs pour le panache mais non pour la source de pollution. Application limitée à l'échelle industrielle. Limité par la faible biodisponibilité des PCB. Faible potentiel de déhalogénéation par Fe ⁰ . Fer zéro : coûts élevés, temps de réactivité court. Difficilement contrôlable en termes de processus cinétiques. Perte rapide de la réactivité Fe/Pd ou Fe/Ni. Longue durée (> 50 ans) Procédé en combinaison avec autres procédés de décontamination pour la pollution résiduelle dans la nappe	EPA, 2012 [10]
	C63 Lavage des sols (soil flushing)		-	-	Infiltration de liquides de lavage (substances solubles à l'eau, p.ex. alcools, tensides) ou émulsions sur la surface de la zone contaminée. Les polluants et les liquides de lavages sont pompés à l'aval de la zone contaminée dans un puits. Procédé en phase de développement. Applicable pour des zones contaminées délimitées et de petite taille.	
Procédés biologiques	C70 Déchloration anaérobie (bactéries)	-	-	-	Procédé non invasive. Peu d'expérience sur sites réels. Applicable pour des faibles contaminations et en présence d'un milieu favorable (population microbologique présent). Produits de dégradation, car déchloration incomplète (dépend du congénère). Procédé en combinaison avec autres procédés de décontamination pour la pollution résiduelle dans la nappe	Gomes et al. 2013 [8]
	C71 Déchloration aérobie (bactéries)	-	-	-	Procédé non invasive. Pour contaminations faibles. Résultats laboratoire (peu ou pas à grande échelle). Produits de dégradation, car déchloration incomplète (dépend du congénère). Succès d'atteindre l'objectif d'assainissement peu probable.	Gomes et al. 2013 [8]

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Eaux souterraines	Evaluation	Références
Procédés chimiques	C80	Oxydation chimique (ISCO),	-	-	-	Pas d'oxydants effectifs disponibles pour dégradation des PCB. Nécessite essais-pilote sur le site pour déterminer la faisabilité, efficacité et durée du procédé. Succès d'atteindre l'objectif d'assainissement peu probable.	[16]
	C81	Procédé ISCO en combinaison avec Fenton's Reagent	-	-	-	Destruction PCB (complet ?), Possibilité de coupler procédé avec bio remédiation. Instabilité du réactif, risque de volatilisation des contaminants, risque d'explosion. Produits de dégradation. Procédé en combinaison avec autres procédés de décontamination pour la pollution résiduelle dans la nappe. Succès d'atteindre l'objectif d'assainissement incertain.	[10]
	C82	Déchloration reductive (méthode biorem : Fe ⁰)	-	(+)		Application sur des sédiments avec apport de Fe Zero Valent. Exemple de biorem sur un site : teneur initiale en PCB (7): max. 330 µg/kg PCB, teneur moyenne après assainissement : 25 µg/kg PCB (7). Expérience : réduction PCB de 70%. Applicable pour la fraction minérale (alluvions). À déterminer plus précisément la faisabilité, efficacité et durée du procédé en relation avec les critères et contraintes spécifiques du site. Nécessite essai-pilote sur le site pour déterminer la faisabilité, efficacité et durée du procédé pour évaluer si l'objectif d'assainissement peut être atteint.	
	C83	Extraction par solvants (soil flushing)	-	-	-	Réduction importante des teneurs élevées en PCB. Destruction des PCB par un procédé complémentaire. Peu d'expérience à l'échelle industrielle. Contrôle étroit des flux et du taux de récupération, risque environnementale, agressivité des produits, Nécessite beaucoup de solvant, Coûts importants, Efficacité moyenne.	[8]
Procédé thermiques	C90	TCH (thermal conductive heating) (ISTD=in situ thermal desorption)	-	(+)	(+)	Applicable pour zone non-saturée ou si l'apport d'eau (Sarine, eaux souterraine) peut être empêché (palplanche). Traitement des gaz. Exige température d'env. 300°C pour désorption efficace. Nécessite barrière hydraulique pour zone saturée. Demande d'énergie suppl. en cas d'humidité importante. Cas réalisés : Rio Tinto Carbone Savoie (procédé GTR™ISTDI). Risque de production de dégradation (dioxine / furane). PCB doivent être détruits par un procédé complémentaire (gaz et eaux). Nécessite essais-pilote sur le site pour déterminer la faisabilité, efficacité et durée du procédé pour évaluer si l'objectif d'assainissement peut être atteint.	[1]

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Eaux soterraines	Evaluation	Références
C90		ET-DPS (EUREMTECH)	-	(+)	(+)	<p>Applicable pour zone saturée et non saturée. Nécessite barrière hydraulique, étanchéité gaz (risque de libération de gaz lors du traitement in-situ). PCB doivent être détruits par un procédé complémentaire (gaz et eaux) ; traitement des gaz (haute température, présence dioxine/furane), Traitement des eaux.</p> <p>Longue expérience au niveau mondiale.</p> <p>Nécessite essais-pilote sur le site pour déterminer la faisabilité, efficacité et durée du procédé pour évaluer si l'objectif d'assainissement peut être atteint.</p>	

Etape 2 – Evaluation générale des procédés de décontamination : confinement /immobilisation Identification de procédés d'assainissement techniquement réalisable

		Procédés	Déchets, polluants	Alluvions	Evaluation	Référence
Confinement horizontal	D10	Confinement de surface (moyennement / hautement perméable)	(+) pour pollution résiduelle	-	Le procédé est techniquement faisable pour toutes les variantes d'assainissement partielles. Le procédé minimise la pénétration des eaux météoriques et par conséquent le flux de polluants atteignant la nappe et empêche le contact direct avec les déchets laissés sur place. Le choix du type de confinement (étanchéité de surface, couverture simple) dépend des exigences liées au flux résiduel acceptable et aux caractéristiques des couches supérieures des déchets (degré de contamination, résurgences d'eaux, etc), de la topographie spécifique du site (surface plane, talus, berge etc.) et des critères / contraintes de la végétalisation.	OFEV, [5]
	D20	Paroi étanche	(+) pour pollution résiduelle		Procédé non durable. Une paroi étanche le long de la zone haute par exemple nécessite des mesures complémentaires pour le drainage / pompage des eaux souterraines qui nécessitent un entretien et une surveillance d'une durée indéterminable (>> 50 ans). Une paroi étanche uniquement pour le corps de la décharge, en combinaison avec une excavation partielle des matériaux exposés aux risques de glissement / érosion correspond à un confinement de surface (procédé D10).	
Confinement vertical	D21	Paroi perméable zone saturée / paroi perméable zone non saturée	Stabilisation / sécurisation		Procédé non durable. Au contraire d'une paroi étanche, la paroi perméable comme par exemple une paroi de pieux non jointif permet l'écoulement des eaux souterraines (et par conséquent la relation hydraulique Sarine – eaux souterraines, elle réduit par contre la surface d'écoulement. Ce procédé ne permet alors pas de retenir les polluants. La fonction de ce procédé se limite à son effet stabilisation du pied de la décharge. Une paroi rigide dans la zone non saturée, fixée aux pieux non jointif permet de créer une séparation décharge / Sarine.	
	D22	Systèmes hydrauliques actifs, abaissement du niveau de la nappe phréatique, déviation ou captage des eaux souterraines	(+) pour pollution résiduelle		Procédés non durable sans mesures d'assainissement préliminaire de décontamination du corps de la décharge et les alluvions. Ces procédés ne sont envisageables pour la réduction du risque d'émission d'une contamination résiduelle répondant aux objectifs d'assainissement.	

Procédés de drainage	D30	Étanchéité de fond	-	-	-	Procédé techniquement faisable mais très complexe et couteux car le site contaminé s'étend sur une très grande surface. Le procédé est efficace uniquement en combinaison avec d'autres procédés liés aux lixiviats (captage, pompage, traitement) → procédés non durable.	
	D40	Captage et traitement des eaux de lixiviation	-	-	-	Procédés techniquement faisables mais pas durable.	
	D41	Évacuation des eaux (superficielles)	(+) pour pollution résiduelle			Procédés techniquement faisables en combinaison avec confinement de surface (D10) de matériaux valorisé sur le site.	
Procédés d'immobilisation	D50	Stabilisation par charbon actif	(+) pour pollution résiduelle			Procédés étudiés à l'échelle laboratoire (Axelera, 2013 [9]) ou sur sédiments marins pour réduire la biodisponibilité des PCB. Procédés applicables après une décontamination des matériaux faiblement pollués valorisés sur le site ou alluvions. Vu l'importance des volumes à traiter l'application du procédé est à évaluer plus en détail concernant la quantité de produits nécessaires pour le traitement. → Procédé applicable uniquement pour les matériaux décontaminés préalablement.	PCB Axelera [9] Zimerman [19], Gosh [18]
	D51	Solidification par liants hydrauliques	(+) pour pollution résiduelle			Procédé permettant de stabiliser – solidifier le lessivage des sédiments par ajout de charbon actif et de bentonite. Ces procédés réduisent la mobilité des PCB mais pas leur potentiel de polluants. Selon [9] ces procédés nécessite validation à l'échelle industrielle. Procédé non durable sans traitement préalable par décontamination, envisageable pour alluvions présentant une contamination résiduelle, mais nécessite des essais-pilotes pour déterminer l'efficacité du procédé en fonction des paramètres du site.	PCB Axelera [9] EPA, 2012 [10]

Documents concernant les Méthodes d'assainissement

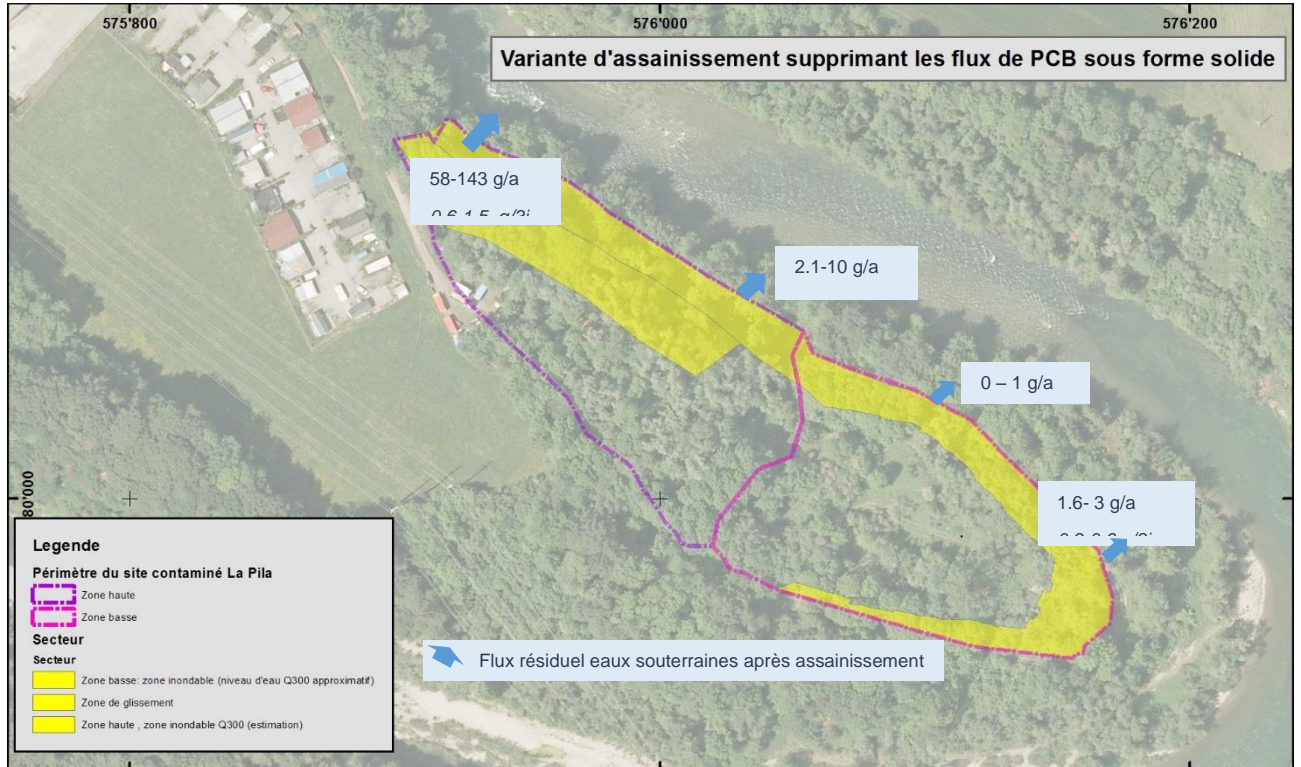
- [1] Office fédérale de l'Environnement, OFEV, 2016 : Assainissement in situ. L'environnement pratique.
- [2] Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets. (Ordonnance sur les déchets, OLED). du 4 décembre 2015 (Etat le 19 juillet 2016).
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU : Abfallentsorgung bei Altlastensanierungen und bei Bauvorhaben auf belasteten Standorten. CAS-Grundkurs Altlastenbearbeitung, 24.06.2016, Christoph Reusser BAFU.
- [4] Procédés ISTD et TCH: <http://terratherm.com/thermal/tch/index.htm>
- [5] OFEV, 2007 : Confinement des sites contaminés par des décharges. L'Environnement pratique. N° UV-0720-F
- [6] . TPS, 2015: Désorption thermique GTR™ in situ (ISTD) et on site (ESTD). Notice technique.
- [7] CSD Ingénieurs SA, 28.02.2014 : Décharge de la Pila. Projet d'assainissement selon l'OSites. Prise en considération des nouvelles données et éléments depuis décembre 2010
- [8] Gomes H, Celia Dias-Ferreira b, Alexandra B. Ribeiro, Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. Science of the Total Environment 445-446 (2013) 237-260
- [9] Projet PCB-AXELERA. CIS PCB. Plan national d'actions sur les PCB. .02.2013. Pascal Dauthuille
- [10] EPA, 2012: Technology Alternatives for the Remediation of PCB Contaminated Soils and Sediments. Engineering Issues
- [11] Brgm / irstea, nov. 2012 : Décharge de la Pila. Commune de Hauterive. Expertise des investigations et du projet d'assainissement de la décharge de la Pila et de ses environs. Rapport final. BRGM/RP-61497-FR.
- [12] Norwegian Research Council "Coast and Sea" Project 185032, april 2011: Sediment remediation through activated carbon amendment. Long-term monitoring of a field pilot in Trondheim Harbour.
- [13] Global NEST, 2010: Activated carbon amendment to remediate contaminated sediments and soils. A review. Global NEST Journal, Vol 12, N° 3, pp 305-317. 2010
- [14] Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2007 : Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten. Teil 1: Einführung, Leitfaden, Handlungsempfehlungen. Teil II: Entwicklungs- und Erfahrungsstand Wissenschaftlich-technische Grundlagen – Ausblick – Literatur – Patente – Verzeichnisse – Anhänge.

- [15] Office fédérale de l'Environnement, OFEV, 2005: Directive. Elimination des déchets dans les cimenteries. L'environnement pratique. 2^{ème} édition actualisée. Etat : octobre 2005
- [16] The Interstate Technology & Regulatory Council In Situ Chemical Oxidation Team, janv. 2005: Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Technical/Regulatory Guideline Second Edition
- [17] Alex Mikszewski , 2004 : Emerging Technologies for the In Situ Remediation of PCB-Contaminated. Soils and Sediments: Bioremediation and Nanoscale Zero-Valent Iron. U.S. EPA
- [18] Ghosh U. et al, 2004: In situ bioavailability reduction of PCBs in sediments: from bench-scale to field demonstration. SERDP Remediation Technology Development Forum. Sediment Remediation Action Team Meeting, February 18-19, 2004, Baltimore Maryland
- [19] Zimmerman J.R. et al, 2004: In situ stabilization of persistent organic contaminants in marine sediments (CU207). Strategic Environmental Research and Development Program
- [20] DSC, Dr. Stupp Consulting – DSC <http://www.dscweb.de/sanverfahren/exsitu.html>.
- [21] Rahuman M.S.M: Mujeebur, Pistone L. et al, 2000: Destruction technologies for polychlorinated biphenyls (PCB). ICS-UNIDO PUBLICATION "Proceedings of Expert Group Meetings on POPs and Pesticides Contamination: Remediation Technologies (April 2000) and on Clean Technologies for the Reduction and Elimination of POPs (May 2000).
- [22] United Nations Environment Programme, August 2000: Survey of Currently Available Non-Incineration PCB Destruction Technologies. Inter-Organization programme for the sound management of Chemicals.
- [23] Biorem. <http://www.biorem.biz/product-solutions/>
- [24] Universität Bern, -Institut für Geologie-. Altlasten – Grundkurs. Modul: Sanierung von Altlasten. Überblick über Sanierungstechniken. Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier

**ANNEXE C SYNTHÈSE DES 3 SCÉNARIOS DE SUPPRESSION DE
FLUX PCB SOUS FORME SOLIDE ET DISSOUTE. EXTRAIT DE [6]**

Scénario A : suppression du flux PCB sous forme solide lié au glissement et à l'érosion

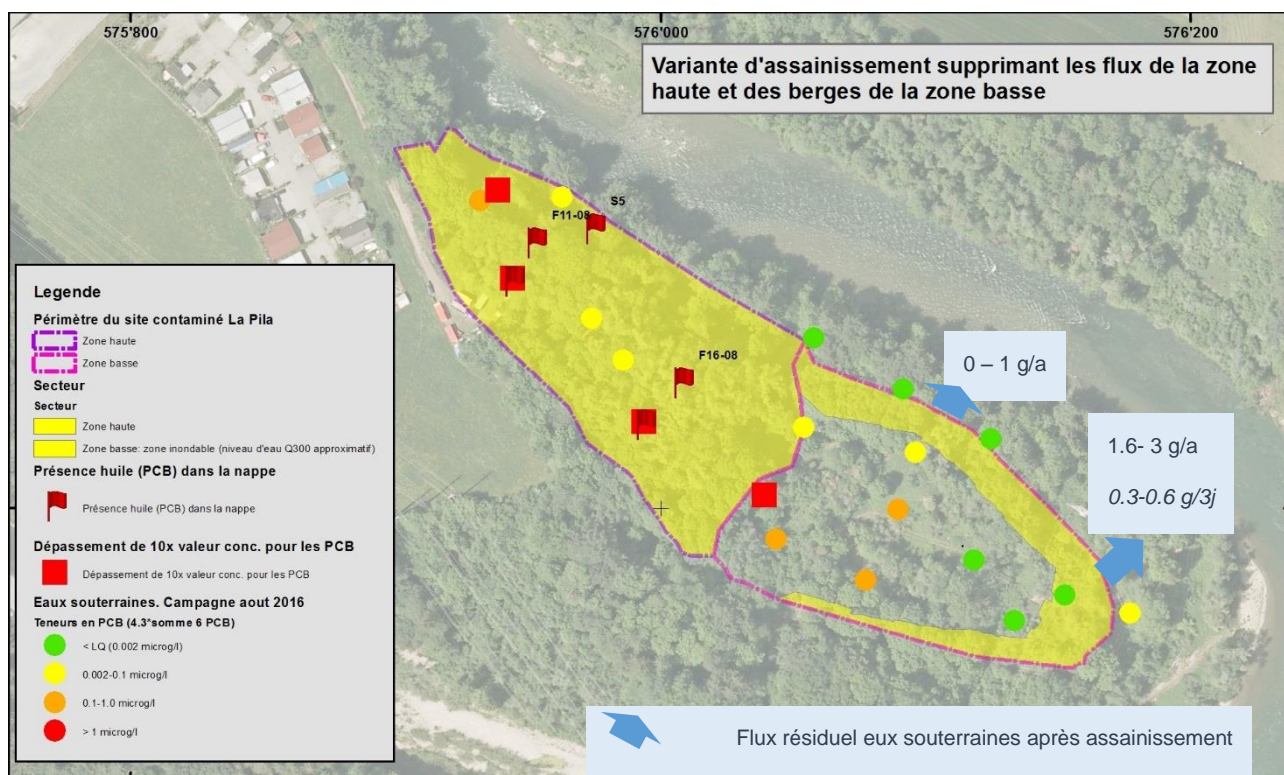
Cette variante supprime tous les flux PCB sous forme solide (glissement + érosion) de la zone haute et le flux PCB sous forme solide (érosion) de la zone basse.



Scénario B : suppression des flux déterminants de la zone de la décharge incluant les matériaux les plus susceptibles de produire des flux PCB sous forme solide et dissous (=zone haute) + suppression du flux PCB sous forme solide de l'érosion de la zone basse.

Ce scénario supprime tous les flux PCB sous forme solide (glissement + érosion) et des flux PCB sous forme dissous des eaux souterraines s'exfiltrant dans la Sarine provenant de la zone de la décharge qui contribue au maximum au flux : la zone haute. Elle supprime tous les risques du scénario précédent susceptibles d'augmenter le flux PCB dans les eaux souterraines et d'imposer des mesures de sécurité et de traitement des eaux dont la durabilité et l'applicabilité ne sont pas garanties à long terme. Étant donné que les matériaux les plus contaminés et les plus susceptibles d'être à l'origine des dépassements importants des concentrations en PCB dans les eaux souterraines, se situent dans la partie inférieure du corps de la décharge, ce scénario inclut la décontamination totale de la zone haute (corps de la décharge + alluvions).

Ce scénario inclut également la suppression des flux PCB sous forme solide (érosion des berges) de la zone basse. Cet objectif peut être atteint par confinement de la surface ou décontamination par excavation



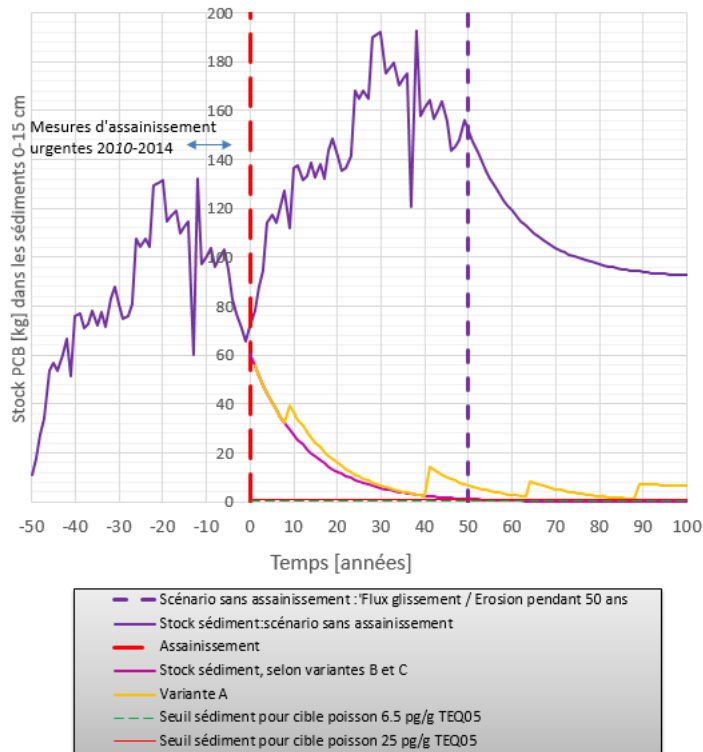
Scénario C : suppression de tous les matériaux susceptibles de produire des flux PCB sous forme dissoute et solide

Ce scénario agit sur tous les flux susceptibles d'impacter le système Sarine. Il prévoit ainsi l'élimination totale de tous les matériaux susceptibles de produire, à court et à long terme, des flux PCB sous forme dissoute et solide. Ceci signifie l'élimination du corps entier de la décharge et des alluvions contaminés par le PCB. Avec ce scénario, tous les risques résiduels liés au scénario B sont éliminés d'une manière durable et définitive



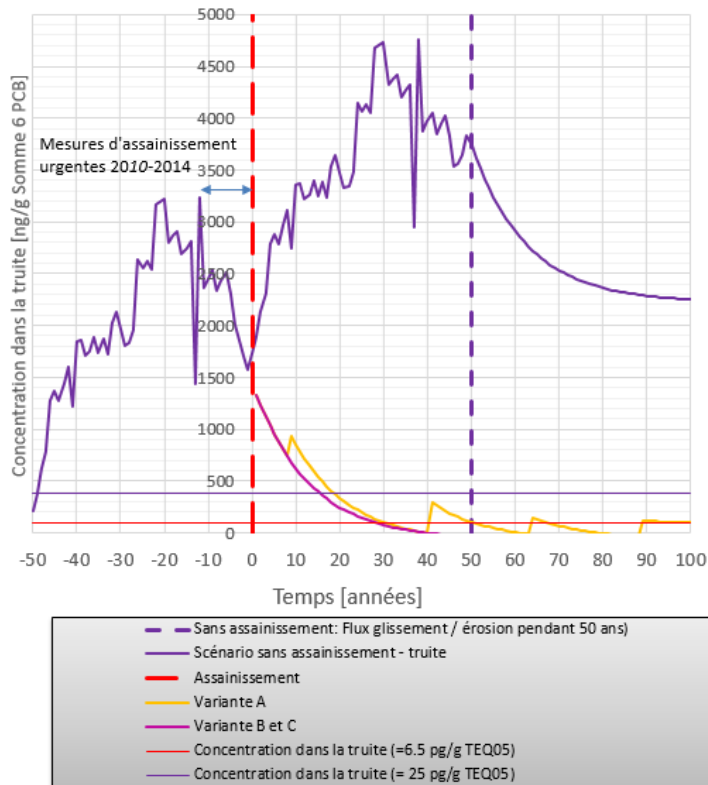
Influence des scénarios sur les flux de la décharge

Evolution du stock PCB dans les sédiments avec le temps en fonction des scénarios A, B et C

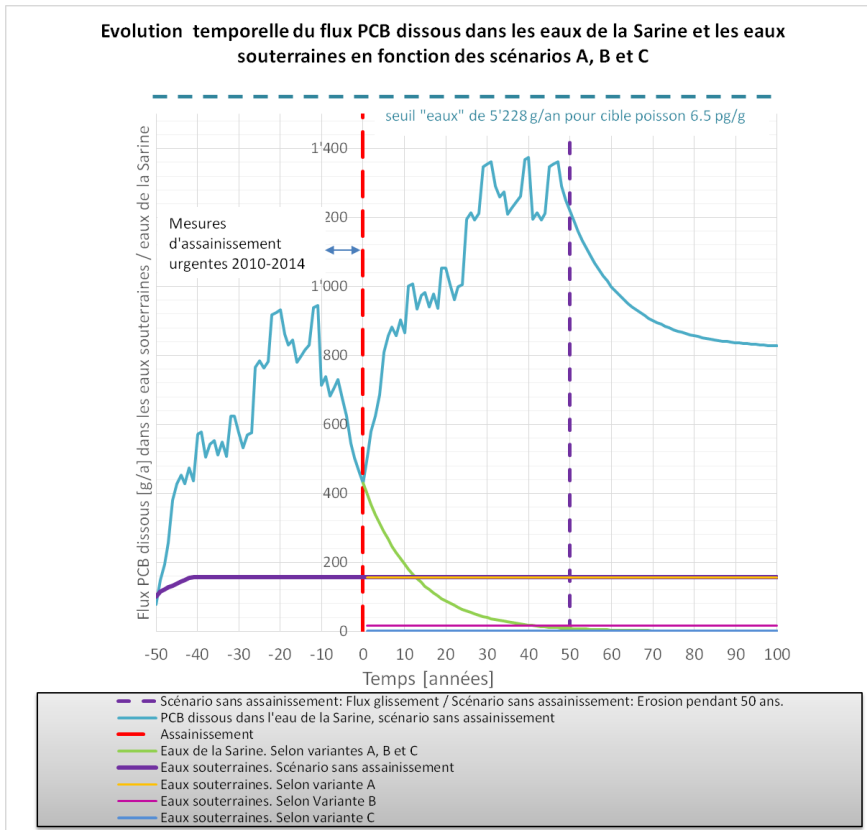


Influence des scénarios sur les flux PCB provenant de la décharge et les améliorations sur le stock PCB dans les sédiments du secteur le plus impacté par la décharge (dans le secteur Pila Gérine) par rapport à un scénario sans mesures d'assainissement. Extrait de [6], figure 8-7

Evolution des concentrations dans la truite avec le temps en fonction des scénarios A, B et C

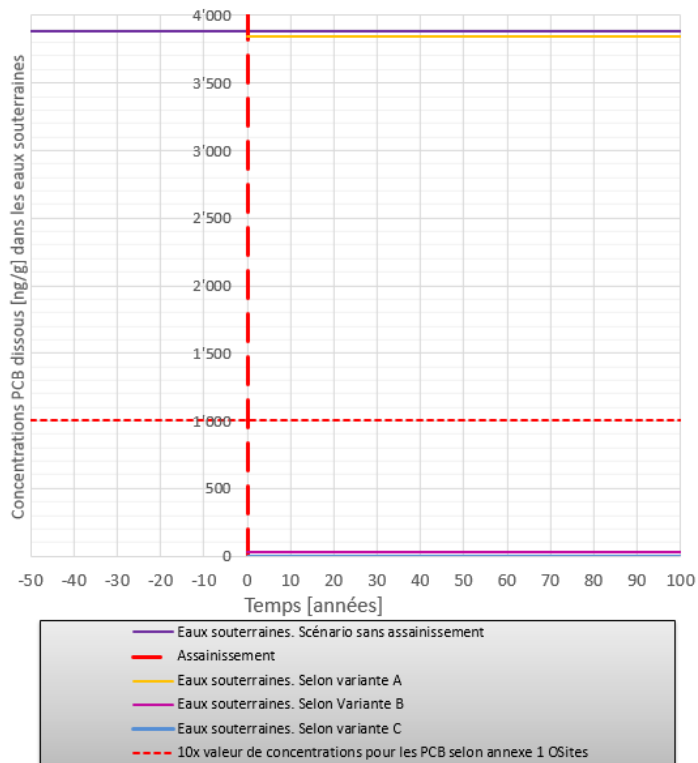


Influence des scénarios sur les concentrations en PCB (Somme 6 PCB en [ng/g] dans la truite du secteur le plus impacté par la décharge (entre décharge et barrage Maigrage) par rapport à un scénario sans mesures d'assainissement. Extrait de [6], figure 8-8



Influence des scénarios sur les flux PCB dissous provenant de la décharge et les améliorations sur les flux PCB dissous des eaux de la Sarine et des eaux souterraines s'exfiltrant. Effets pour le secteur le plus impacté par la décharge (secteur Pila-Gérine) par rapport à un scénario sans mesures d'assainissement. Extrait de [6], figure 8-9

Evolution temporelle des concentrations en PCB dissous dans les eaux souterraines pour les scénarios sans assainissement et des scénarios A, B et C



Influence des scénarios sur les concentrations PCB dissous dans les eaux souterraines s'exfiltrant dans la Sarine. Comparaison avec la valeur de concentration pour les PCB selon annexe 1 OSites. Extrait de [6], figure 8-10

**ANNEXE D
ACTUEL**

PLAN DE SITUATION ET PROFILS DE L'ÉTAT



Projet d'assainissement de La Pila

Situation 1:2'000

CSDINGENIEURS+
 Environnement
 Géologie et géotechnique
 Génie civil
 Déchets et dépollution
 Gestion des eaux







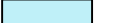



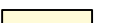

Chantemerle 37 - Granges-Paccot
 CP 384 - 1701 Fribourg
 Tél. 026 460 74 74
 Fax. 026 460 74 79
 fribourg@csd.ch
 www.csd.ch

Dessin FRBCA	N° mandat FR2706.17
Echelle 1:2'000	Date 24.11.2017
Format A3	N° d'annexe -





Légende

— Profil

LEGENDE:

 Décharge	 Basses eaux [3.5 m3/s]
 Gravier de la Tuffière	 Hautes eaux
 Paléosol	 Q max crue artificielle
 Alluvions de la Sarine	 Q1'000
 Molasse	 Niveau moyen de la nappe (août 2016, hors puits de pompage)
 Remblais propre	
 Molasse (forages projetés)	

Concentration en PCB

	x < 1
	1 < x < 4.21
	4.21 < x < 10
	10 < x

MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	24.11.2017	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFH/PAS	Adaptations
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Etat actuel
 Profil géologique 01



CSD INGENIEURS SA
 Chantemerle 37
 CH-1701 Fribourg
 www.csd.ch

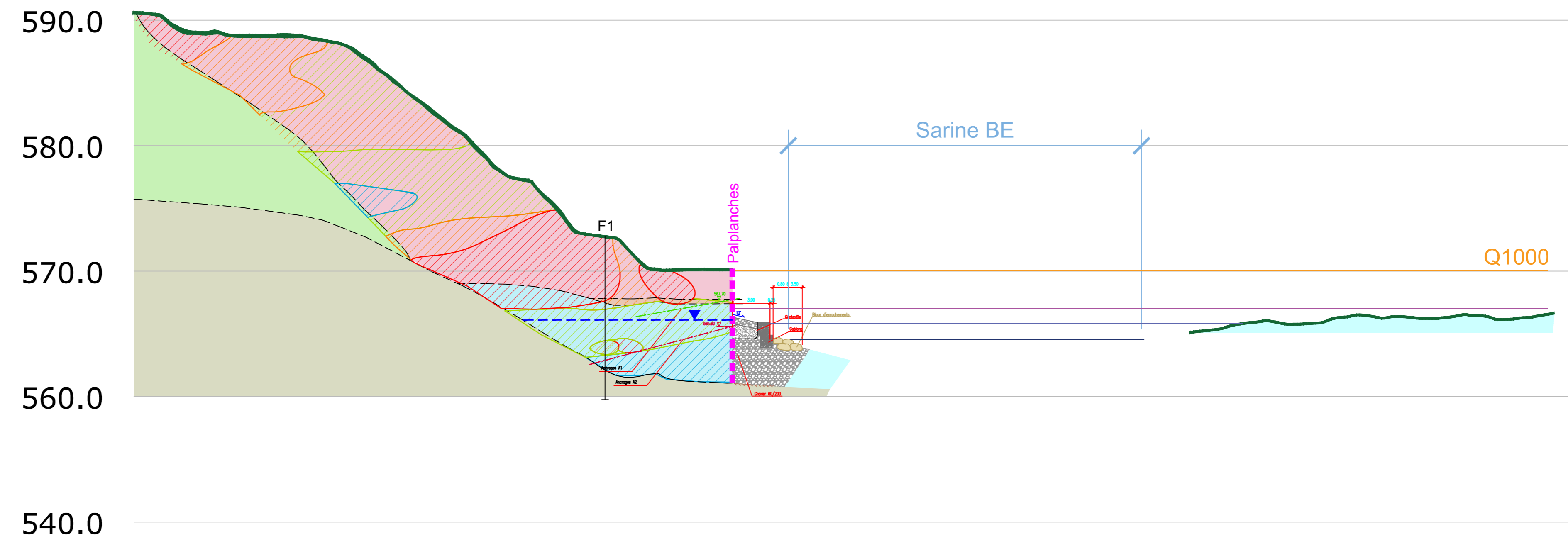
t +41 26 460 74 74
 f +41 26 460 74 79
 e fribourg@csd.ch

Echelle
 1:250














N° du mandat
 FR02706.17

Dessiné	24.11.2017/FRBCA
Contrôlé	24.11.2017/FREDG
Approuvé	
Format	78.0x29.7
N° du mandat	Phase Plan N° Index





Profil 01



LEGENDE:

 Décharge	 Basses eaux [3.5 m3/s]
 Gravier de la Tuffière	 Hautes eaux
 Paléosol	 Q max crue artificielle
 Alluvions de la Sarine	 Q1'000
 Molasse	 Niveau moyen de la nappe (août 2016, hors puits de pompage)
 Remblais propre	 Gravier 60/200 (existant)
 Molasse (forages projetés)	

Concentration en PCB

	x < 1
	1 < x < 4.21
	4.21 < x < 10
	10 < x

MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	24.11.2017	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFH/PAS	Adaptations
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Etat actuel
 Profil géologique 03



CSD INGENIEURS SA
 Chantemerle 37
 CH-1701 Fribourg
 www.csd.ch

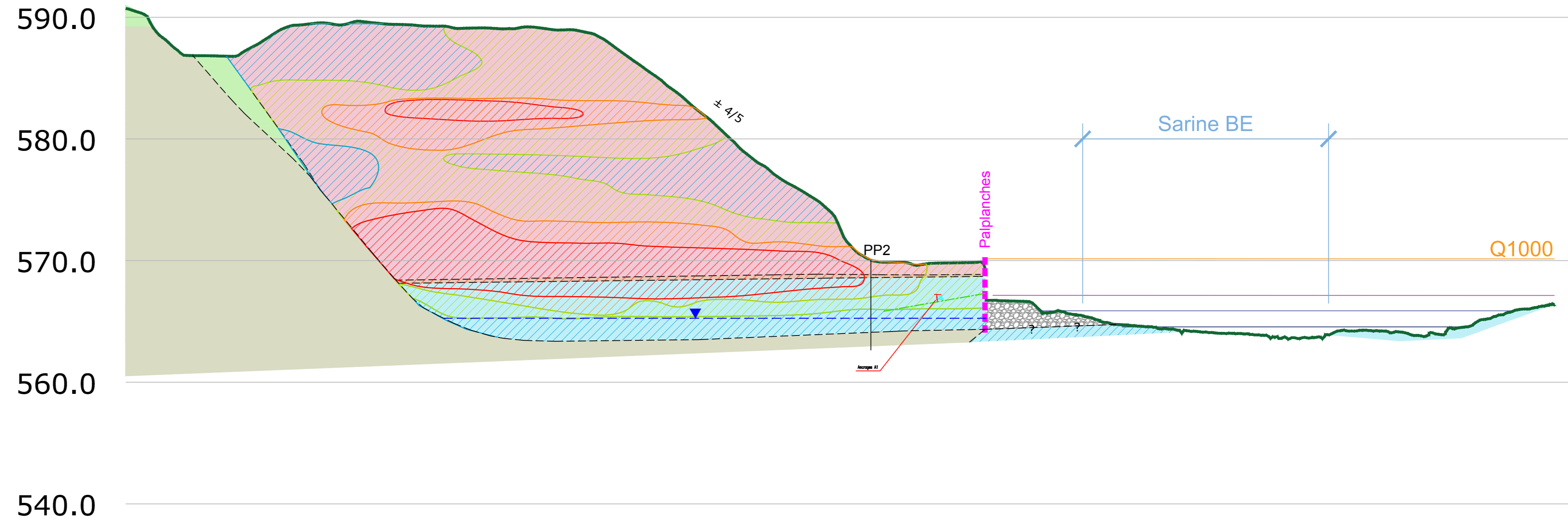
t +41 26 460 74 74
 f +41 26 460 74 79
 e fribourg@csd.ch

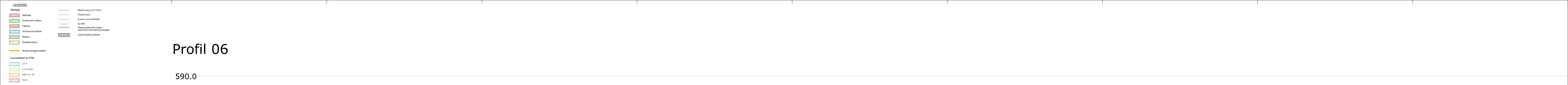
Echelle
1:250

N° du mandat
FR02706.17

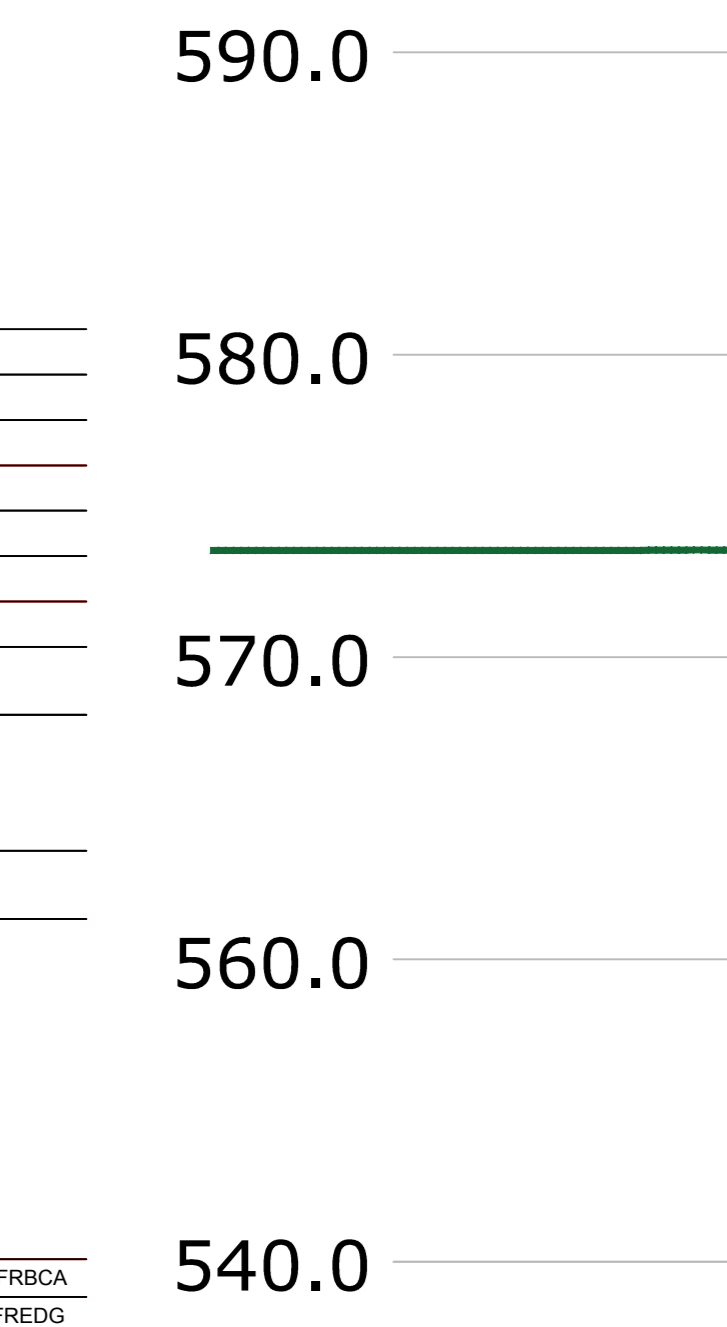
Dessiné	24.11.2017/FRBCA
Contrôlé	24.11.2017/FREDG
Approuvé	
Format	78.0x29.7
Phase	Plan N°
Index	

Profil 03





Profil 06



MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	24.11.2017	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFHIPAS	Adaptions
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Etat actuel

Profil géologique 06

CSD INGENIEURS+
INGÉNIEURS PAR NATURE

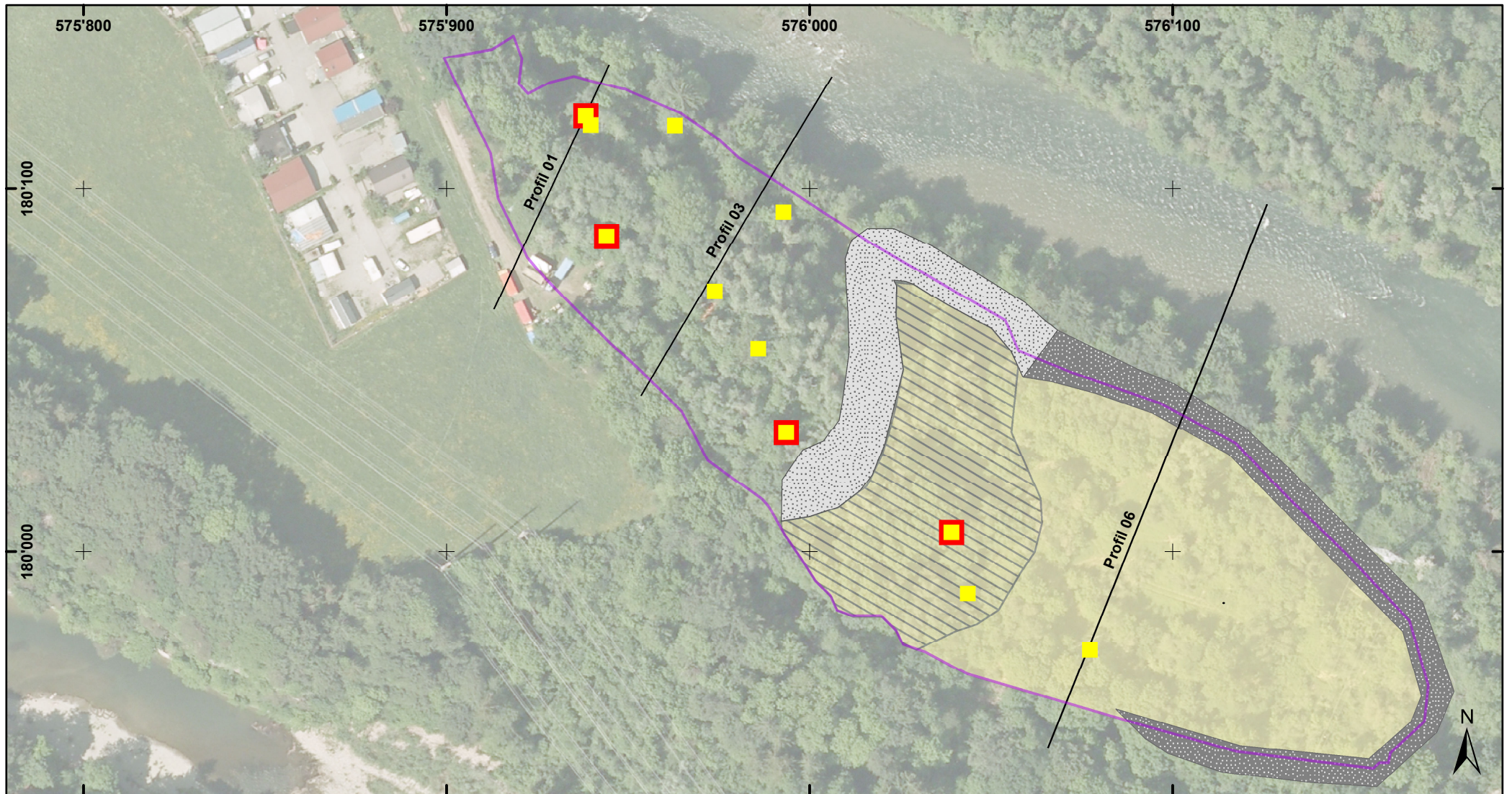
CSD INGENIEURS SA
Chantemerle 37
CH-1701 Fribourg
www.csd.ch

t +41 26 460 74 74
f +41 26 460 74 79
e fribourg@csd.ch

Dessiné 24.11.2017/FRBCA
Contrôle 24.11.2017/FREDG
Approuvé
Format 192x29.7
N° du mandat Phase Plan N° Index

Echelle 1:250
FR02706.17

ANNEXE E VARIANTE 2: PLANS DE SITUATION, PROFILS



Site contaminé La Pila. Commune de Hauterive

Variante n° 2

CSDINGENIEURS+

Umwelt
Geologie und Geotechnik
Ingenieurwesen
Abfall und Altlasten
Wasser

Chantemerle 37 - Granges-Paccot
CP 384 - 1701 Fribourg
Tel. 026 460 74 74
Fax. 026 460 74 79
fribourg@csd.ch
www.csd.ch

Dessin franh	Mandat N° FR2706.918
Date: 03.05.18	Masstab 1:1'500
Format A4	

Situation avant assainissement

Périmètre La Pila

□ Périmètre de la décharge

Eaux souterraines, Situation avant assainissement

■ Ammonium: Teneurs > 10 x valeur concentration OSites

Eaux souterraines, Situation avant assainissement

■ PCB: Teneurs 10 x valeur de concentration OSites

Après assainissement

Variante 1

▨ Talus vers zone basse

■ Zone basse, confinement

Reconstitution Berge

▨ Zone haute: piste d'accès, remblais propre, tapis blocs

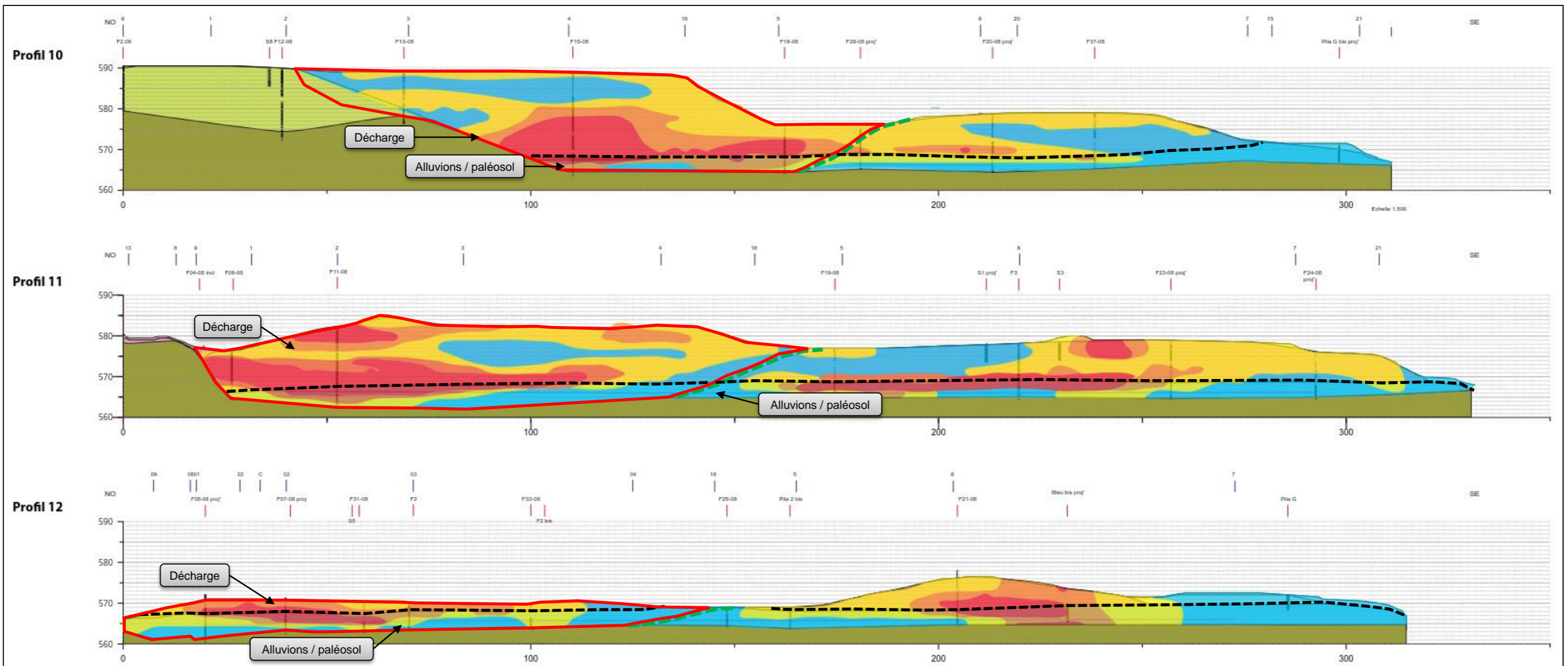
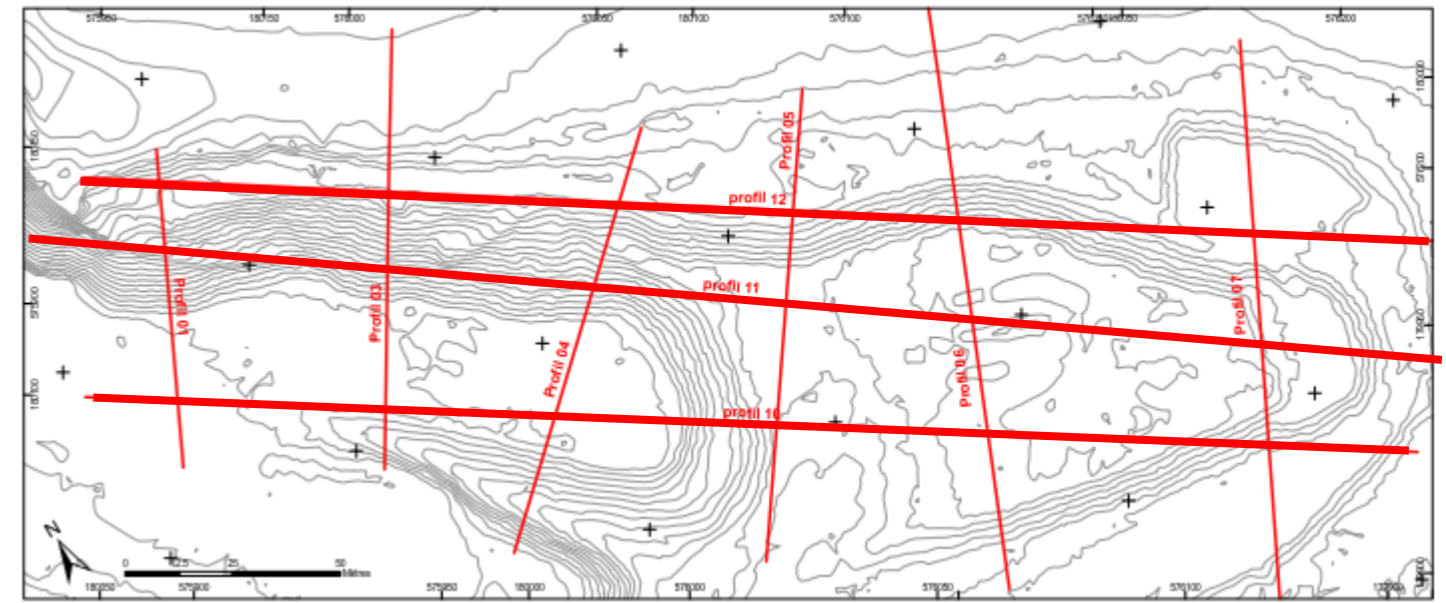
▨ Zone basse: piste d'accès, remblais propres, tapis blocs

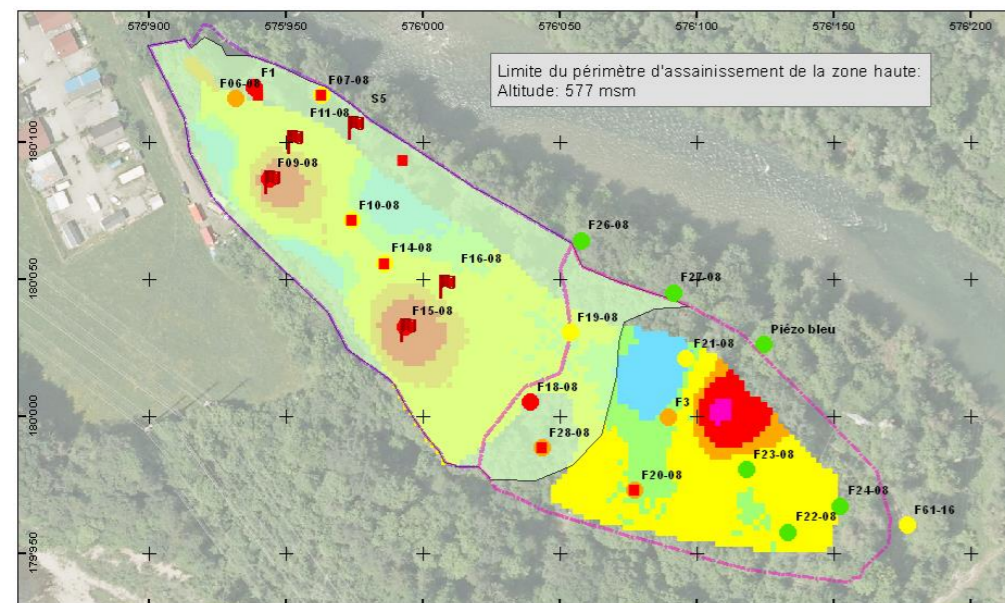
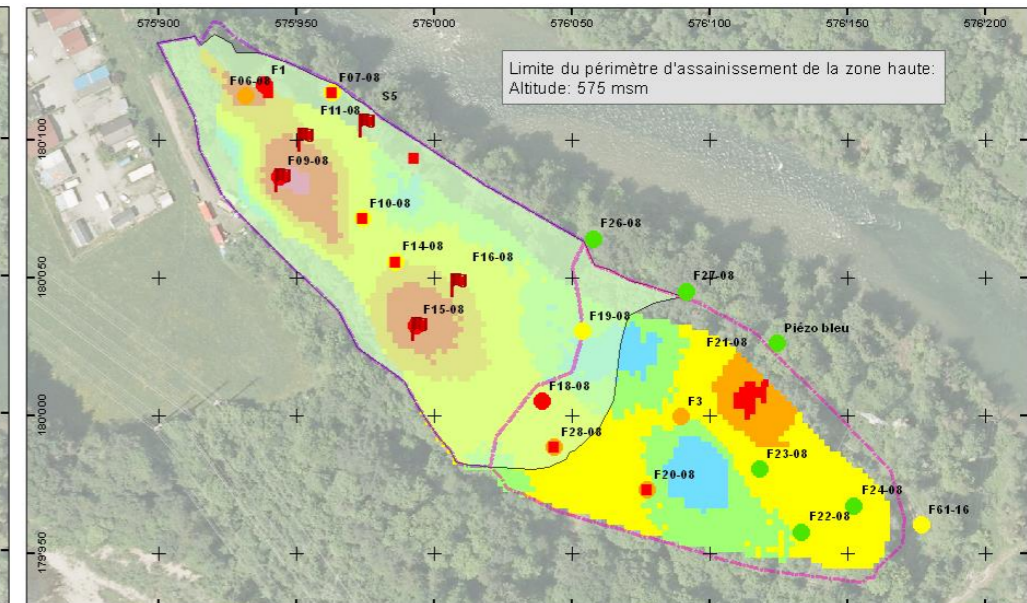
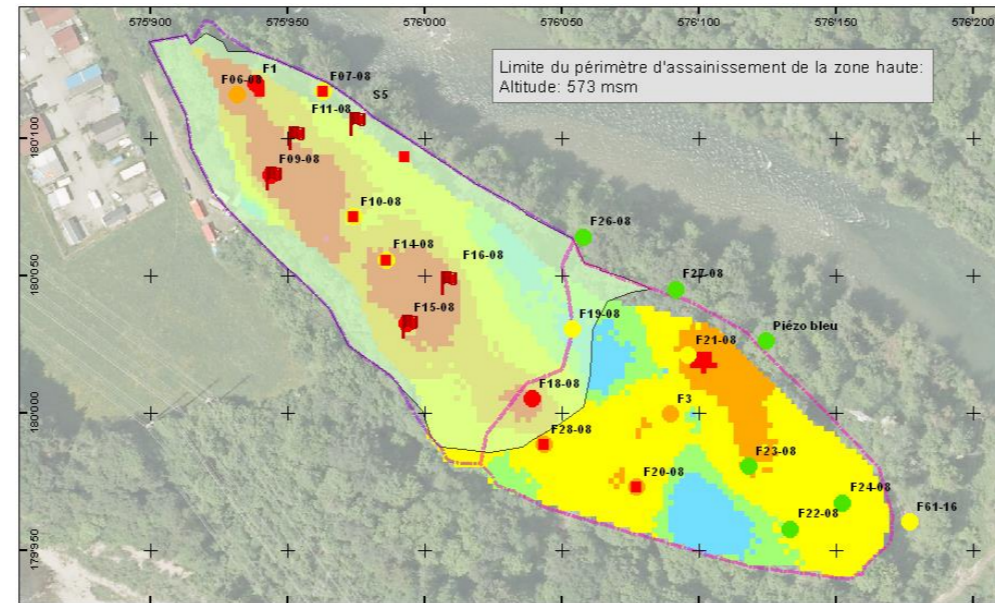
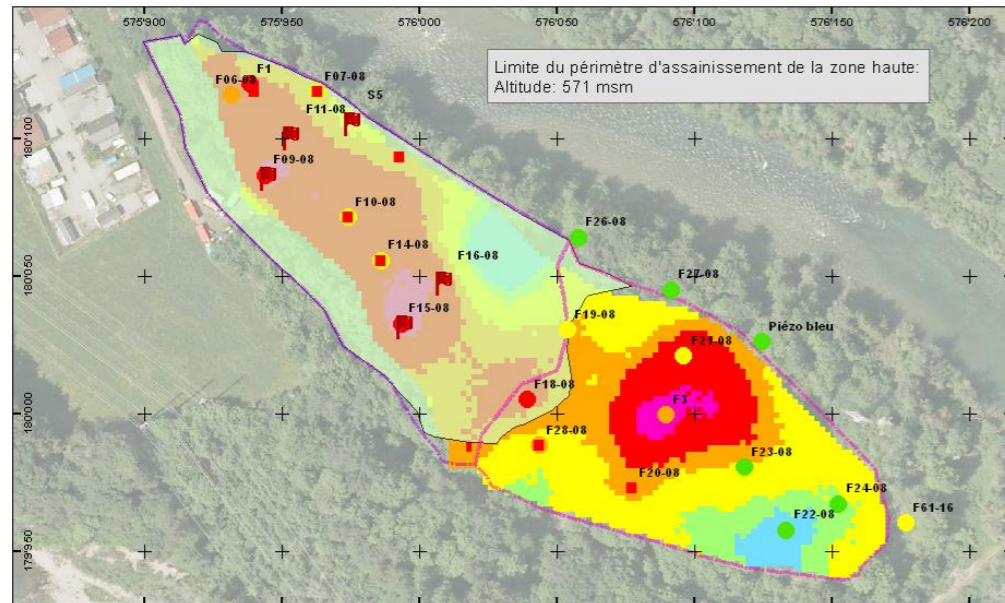
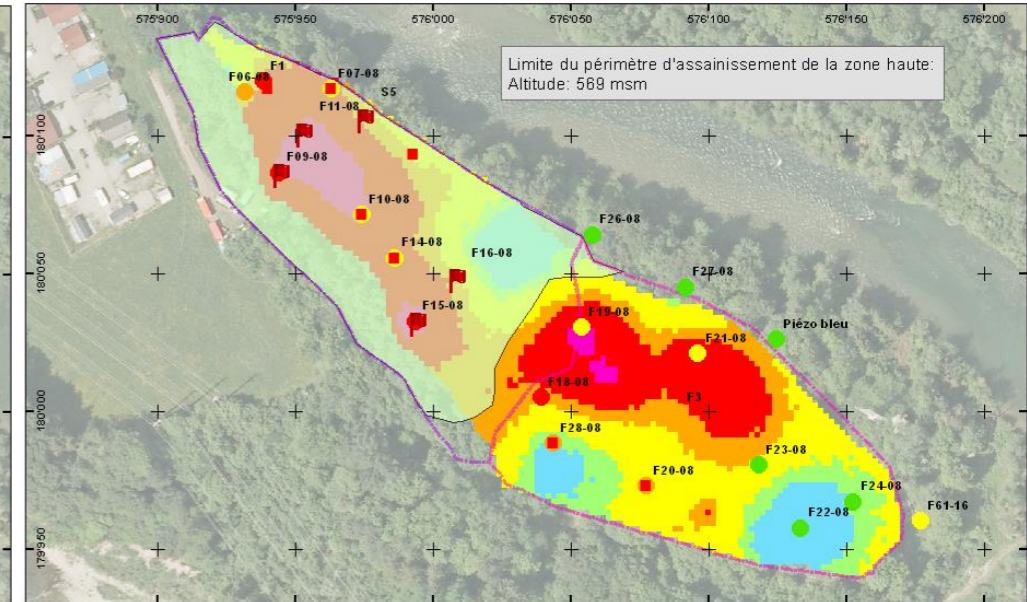
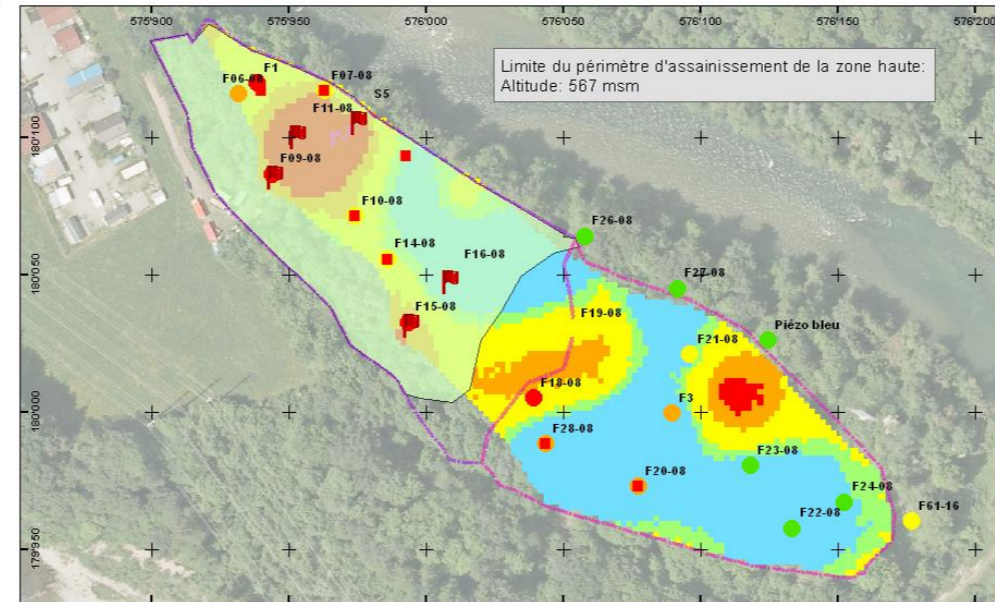
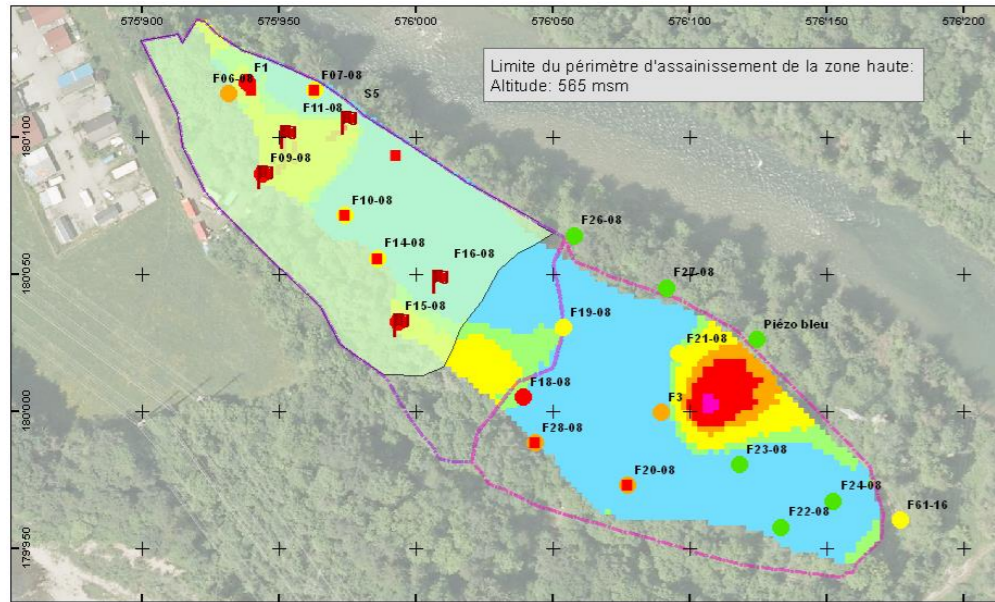


Excavation de la zone haute



Limite entre corps de la décharge et alluvions





Zone haute assainie

Zone haute assainie

Périmètre du site contaminé La Pila

Périmètre du site contaminé La Pila

Présence huile (PCB) dans la nappe

Présence huile (PCB) dans la nappe

Eaux souterraines. Campagne aout 2016

Ammonium (teneurs > 5 mg/l)

Eaux souterraines. Campagne aout 2016

Teneurs en PCB (4,3* somme 6 PCB)

< LQ (0.002 microg/l)

0.002-0.1 microg/l

0.1-1.0 microg/l

> 1 microg/l

Distribution spatiale des PCB (géostatistique)

Teneur total PCB (4,3* somme 6 PCB)

$X < 0.62$

$0.62 < X < 1$

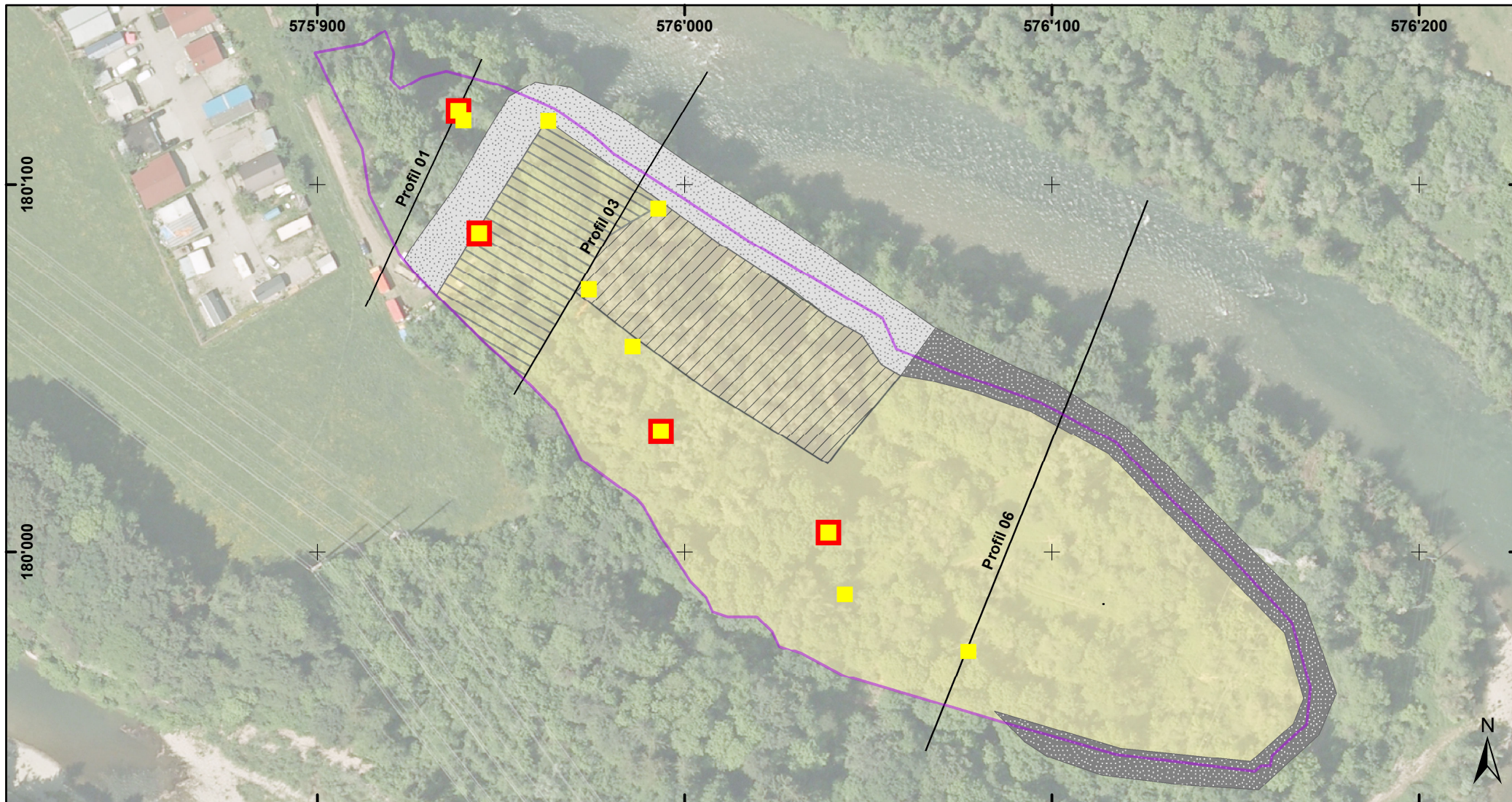
$1 < X < 4.21$

$4.21 < X < 10$

$10 < X < 50$

$50 < X$

**ANNEXE FVARIANTE 3 : PLAN DE SITUATION, PROFILS ÉTAT FUTUR,
SITUATION 2D, VUE 3D**



Site contaminé La Pila. Commune de Hauterive

Variante n° 3

CSDINGENIEURS+

Umwelt
Geologie und Geotechnik
Ingenieurwesen
Abfall und Altlasten
Wasser

Chantemerle 37 - Granges-Paccot
CP 384 - 1701 Fribourg
Tel. 026 460 74 74
Fax. 026 460 74 79
fribourg@csd.ch
www.csd.ch

Dessin franh	Mandat N° FR2706.918
Date: 03.05.18	Masstab 1:1'500
Format A4	

Avant assainissement

Périmètre de la décharge, après mesures urgentes 2013
Eaux souterraines. Situation avant assainissement

Ammonium. Teneurs > 10 x valeur concentration OSites
Eaux souterraines. Situation avant assainissement

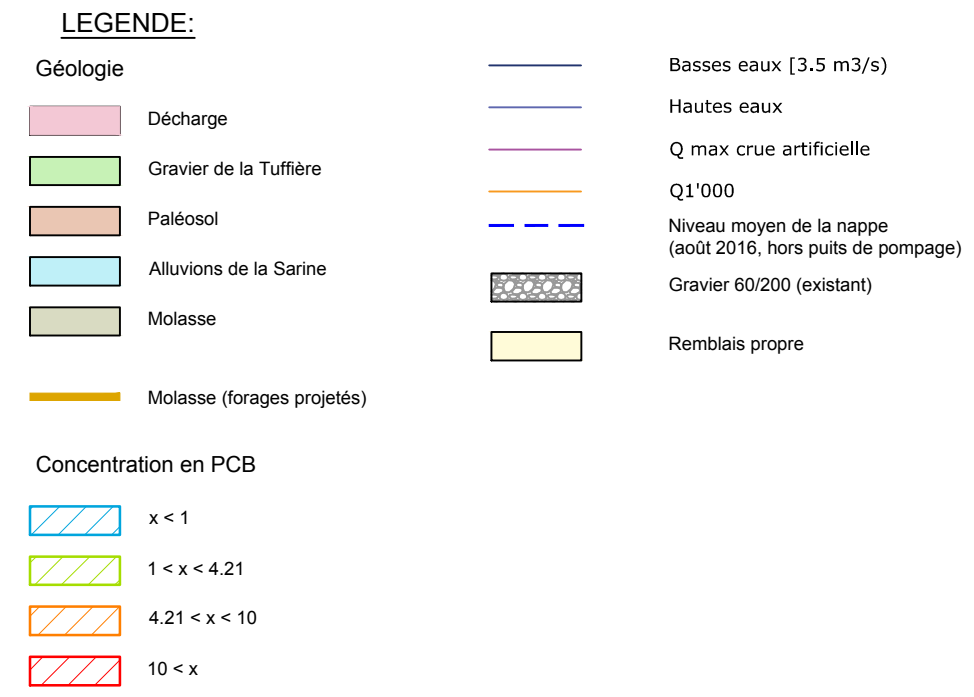
PCB. Teneurs > 10 x valeur de concentration OSites

Après assainissement

Variante 3: mesures d'assainissement

Solde de la décharge. Confinement (peu / moyennement perméable)
 Nouveau talus vers Sarine après excavation zone hot spot
 Zone de glissement: excavation et confinement
 Reconstitution Berge

Zone haute: piste d'accès, remblais propres, tapis blocs
 Zone basse: piste d'accès, remblais propres, tapis blocs



MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	24.11.2017	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFH/PAS	Variante 3
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Variante 3

Profil géologique 01

CSD INGENIEURS+
INGÉNIEUX PAR NATURE

CSD INGENIEURS SA
Chantemerle 37
CH-1701 Fribourg
www.csd.ch

t +41 26 460 74 74
f +41 26 460 74 79
e fribourg@csd.ch

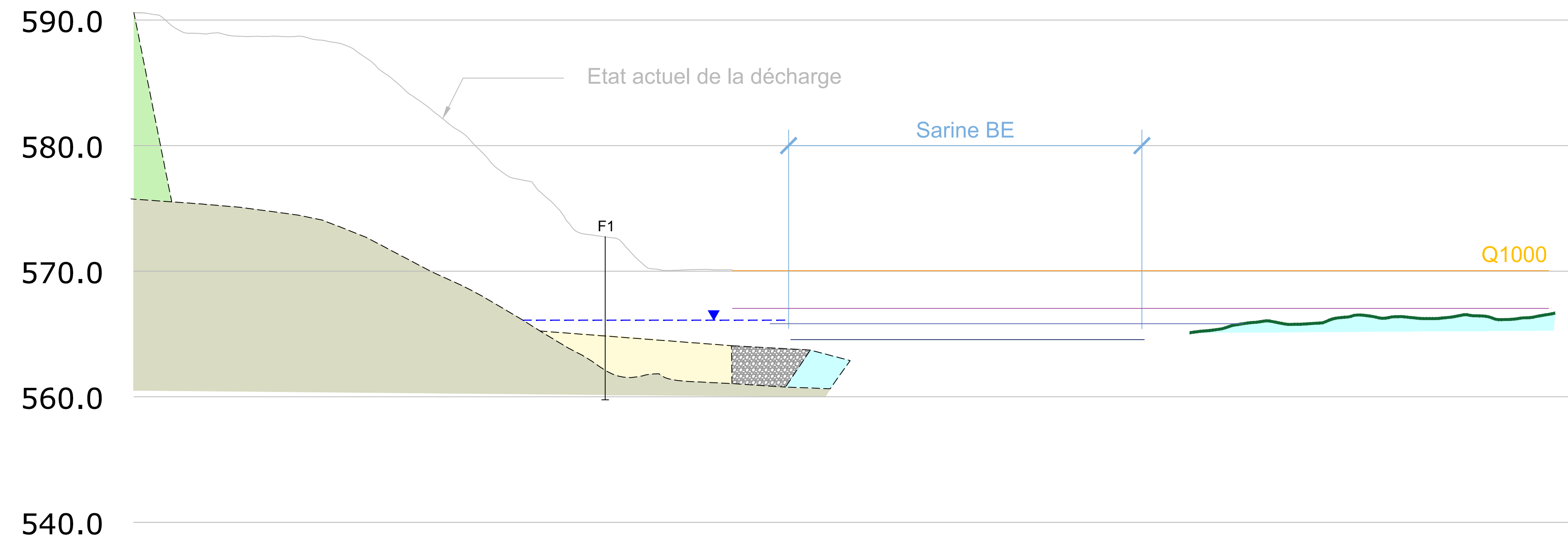
Dessiné 24.11.2017/FRBCA
Contrôlé 24.11.2017/FREDG
Approuvé
Format 78.0x29.7

Echelle 1:250

N° du mandat Phase Plan N° Index
FR02706.17 -

Profil 01

Variante 3



LEGENDE:

Géologie

- Décharge
- Gravier de la Tuffière
- Paléosol
- Alluvions de la Sarine
- Molasse
- Molasse (forages projetés)

Concentration en PCB

- $x < 1$
- $1 < x < 4.21$
- $4.21 < x < 10$
- $10 < x$

Hydrologie

- Basses eaux [3.5 m3/s]
- Hautes eaux
- Q max crue artificielle
- Q1'000
- Niveau moyen de la nappe (août 2016, hors puits de pompage)
- Tapis de bloc
- ancrage du pied de l'enrochement

Stabilisations/confinement de surface

- Remblais propre
- Confinement (natte bentonite / couche minérale)
- Couche d'égalisation et/ou de drainage
- Horizons B + A végétalisé (herbe)

MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	28.04.2018	FRBCA	FRPAS	Original
a	01.05.2018	SZY	AFH/PAS	Variante 3
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Variante 3

Profil géologique 03

CSD INGENIEURS+
INGÉNIEUX PAR NATURE

CSD INGENIEURS SA
Chantemerle 37
CH-1701 Fribourg
www.csd.ch

t +41 26 460 74 74
f +41 26 460 74 79
e fribourg@csd.ch

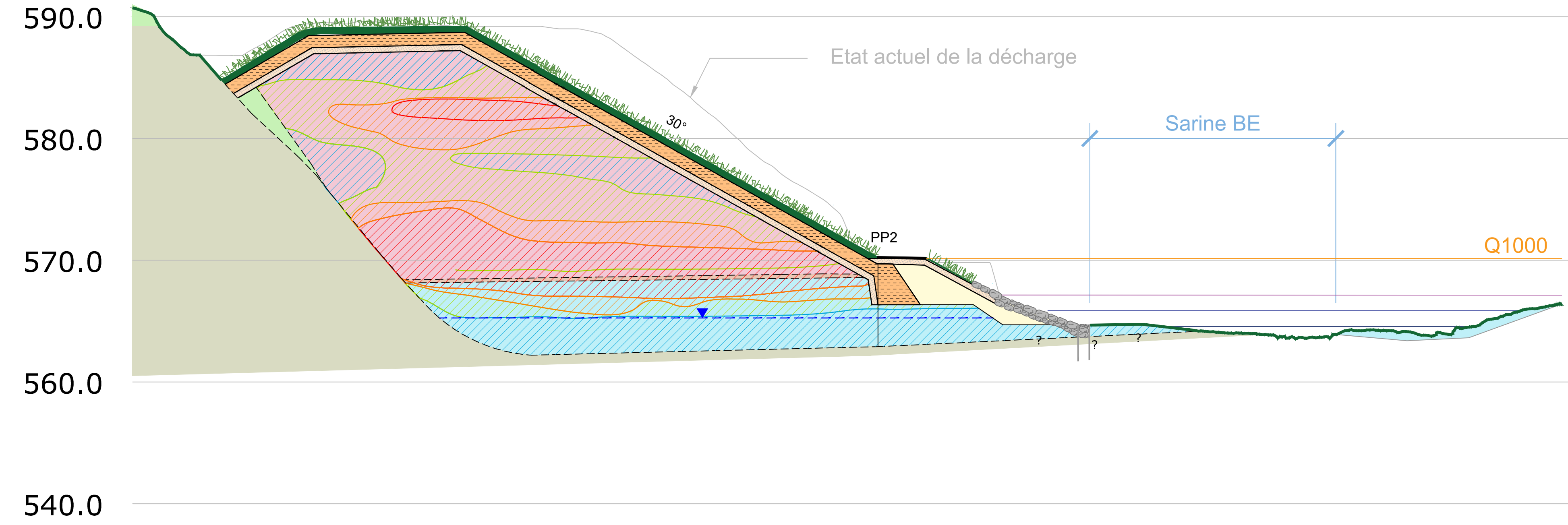
Echelle
1:250

N° du mandat
FR02706.17

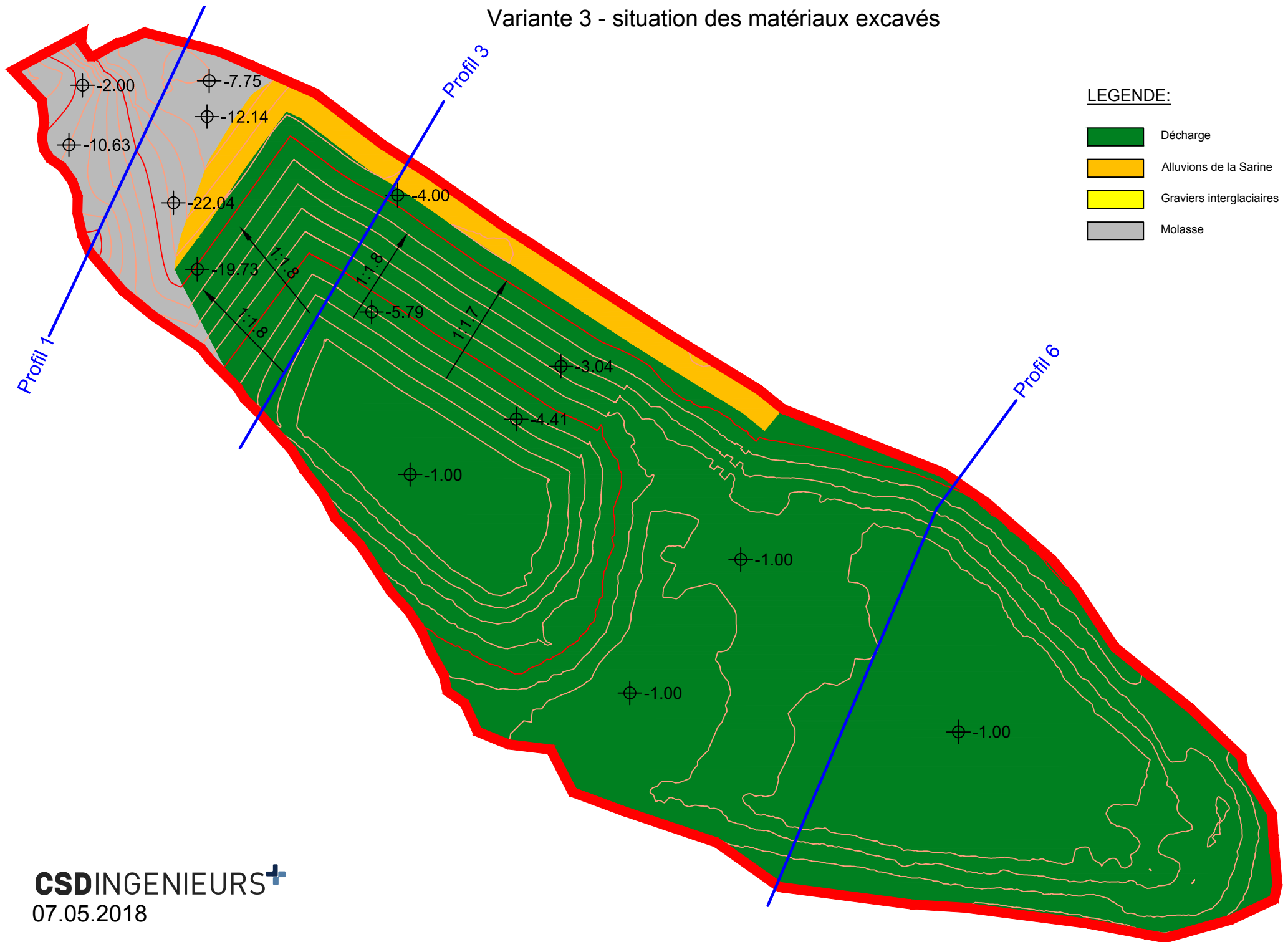
Dessiné 24.11.2017/FRBCA
Contrôlé 24.11.2017/FREDG
Approuvé
Format 78.0x29.7
Phase Plan N° Index

Profil 03

Variante 3



Variante 3 - situation des matériaux excavés

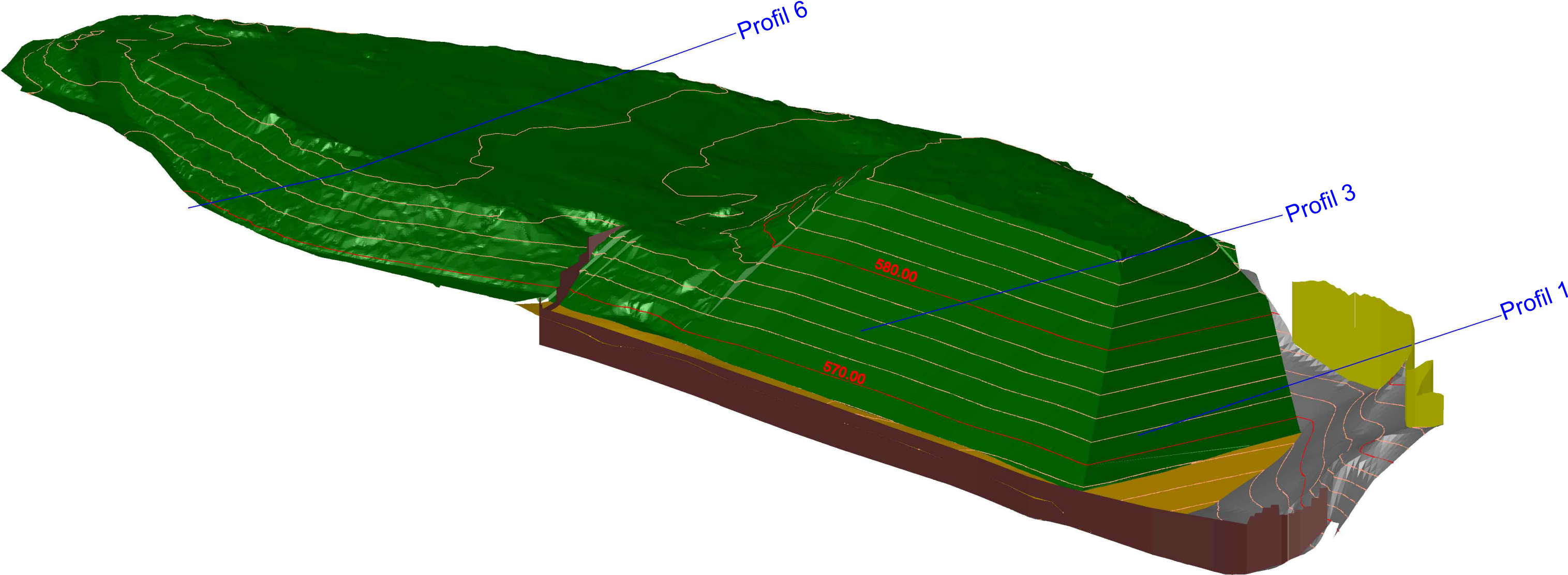


LEGENDE:

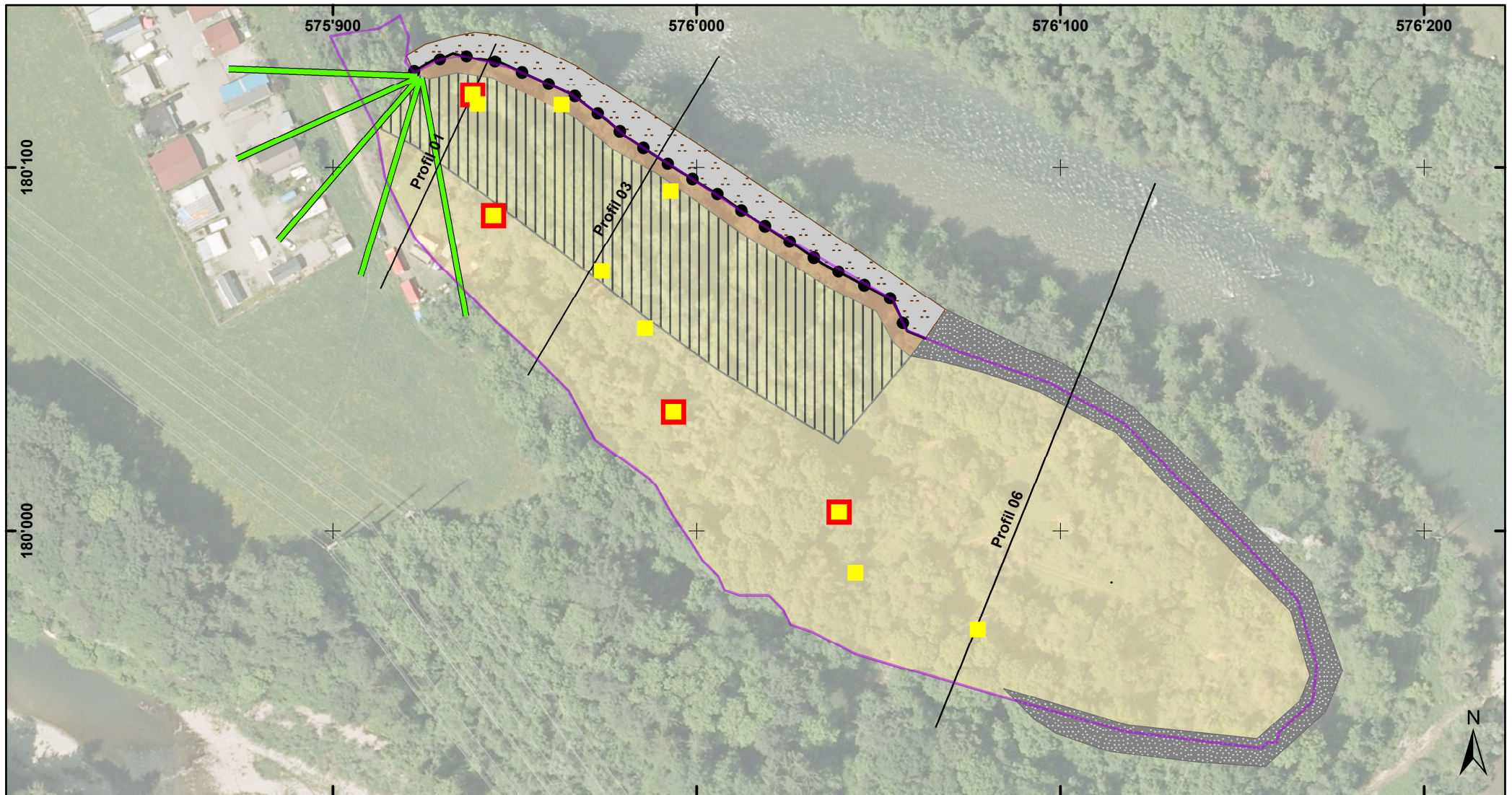
- Décharge
- Alluvions de la Sarine
- Graviers interglaciaires
- Molasse

Variante 3 : Vue 3D des matériaux après excavation

- LEGENDE:**
- Décharge
 - Alluvions de la Sarine
 - Graviers interglaciaires
 - Molasse



**ANNEXE G VARIANTE 4 : PLAN DE SITUATION, PROFILS ÉTAT
FUTUR, SITUATION 2D, VUE 3D, SCHÉMA DE LA PAROI**



Site contaminé La Pila. Commune de Hauterive

Variante n° 4

CSDINGENIEURS+

Umwelt
Geologie und Geotechnik
Ingenieurwesen
Abfall und Altlasten
Wasser

Chantemerle 37 - Granges-Paccot
CP 384 - 1701 Fribourg
Tel. 026 460 74 74
Fax. 026 460 74 79
fribourg@csd.ch
www.csd.ch

Dessin frahh	Mandat N° FR2706.918
Date: 03.05.18	Masstab 1:1'500
Format A4	

Avant assainissement

Périmètre La Pila

□ Périmètre de la décharge

Eaux souterraines. Situation avant assainissement

■ Ammonium: teneurs > 10 x valeur concentration OSites

Eaux souterraines. Situation avant assainissement

■ PCB: Teneurs > 10 x valeur de concentration OSites

Après assainissement

Variante 4

■ Solde de la décharge. Confinement (peu / moyennement perméable)

■ Piste accès (sur surface remodelée de déchets), confinement

■ Zone de glissement: excavation et confinement

Variante 4: infrastructures

■ Drains rayonnants (diamètre env. 1 m)

●●● Pieux non jointifs avec paroi de soutènement

Reconstitution Berge

■ Tapis blocs

■ Zone basse: piste d'accès, remblais propres, tapis blocs

LEGENDE:

Décharge	Basses eaux [3.5 m3/s]
Gravier de la Tuffière	Hautes eaux
Paléosol	Q max crue artificielle
Alluvions de la Sarine	Q1'000
Molasse	Niveau moyen de la nappe (août 2016, hors puits de pompage)
Molasse (forages projetés)	Tapis de bloc
x < 1	Gravier 60/200 (existant)
1 < x < 4.21	Remblais propre
4.21 < x < 10	Stabilisations/confinement de surface
10 < x	Confinement (natte bentonite / couche minérale)
	Couche d'égalisation et/ou de drainage
	Horizons B + A végétalisé (herbe)

MODIFICATIONS				
Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	24.11.2017	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFH/PAS	Variante 4
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Variante 4
Profil géologique 01



CSD INGENIEURS SA
Chantemerle 37
CH-1701 Fribourg
www.csd.ch

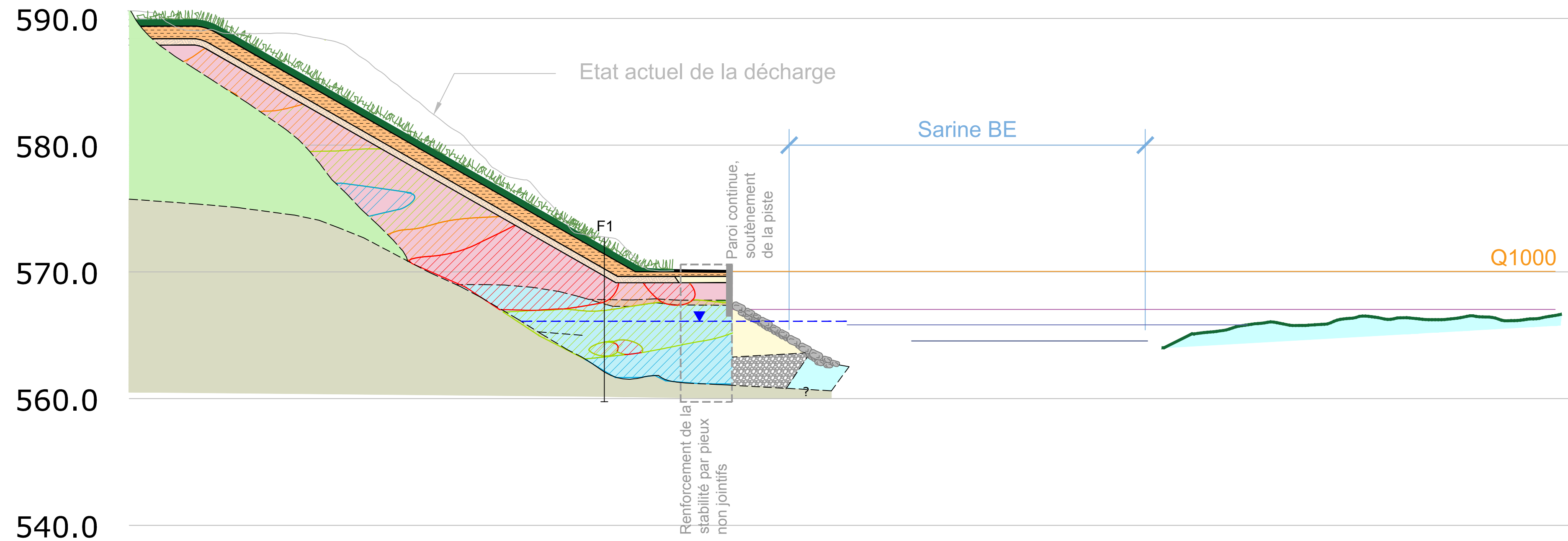
t +41 26 460 74 74
f +41 26 460 74 79
e fribourg@csd.ch

Echelle
1:250

N° du mandat
FR02706.17

Dessiné	24.11.2017/FRBCA
Contrôle	24.11.2017/FREDG
Approuvé	
Format	78.0x29.7
Phase	Plan N°
Index	

Profil 01
Variante 4



LEGENDE:

Géologie

- Décharge
- Gravier de la Tuffière
- Paléosol
- Alluvions de la Sarine
- Molasse
- Molasse (forages projetés)

Concentration en PCB

- x < 1
- 1 < x < 4.21
- 4.21 < x < 10
- 10 < x

Stabilisations/confinement de surface

- Remblais propre
- Confinement (natte bentonite / couche minérale)
- Couche d'égalisation et/ou de drainage
- Horizons B + A végétalisés (herbe)

Autres symboles:

- Basses eaux [3.5 m3/s]
- Hautes eaux
- Q max crue artificielle
- Q1'000
- Niveau moyen de la nappe (août 2016, hors puits de pompage)
- Tapis de bloc
- ancrage du pied de l'enrochement

MODIFICATIONS

Indice	Dessiné	Contrôle	Approuvé	Description des modifications
-	28.04.2018	FRBCA	FRPAS	Original
a	07.05.2018	SZY	AFH/PAS	Variante 4
b				
c				
d				

Consortium pour l'assainissement de La Pila

Projet d'assainissement de La Pila

Variante 4

Profil géologique 03

CSD INGENIEURS+
INGÉNIEUX PAR NATURE

CSD INGENIEURS SA
Chantemerle 37
CH-1701 Fribourg
www.csd.ch

t +41 26 460 74 74
f +41 26 460 74 79
e fribourg@csd.ch

Dessiné 24.11.2017/FRBCA
Contrôlé 24.11.2017/FREDG
Approuvé
Format 78.0x29.7

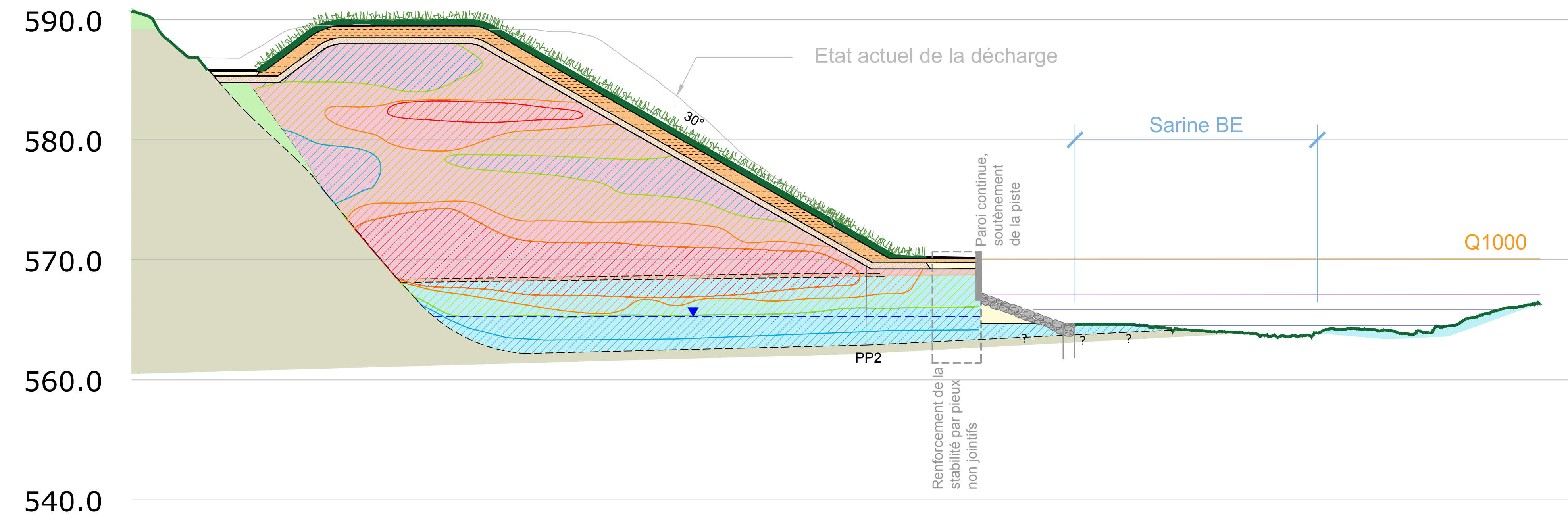
Echelle 1:250

N° du mandat Phase Plan N° Index

FR02706.17 -

Profil 03

Variante 4



Variante 4 - situation des matériaux excavés

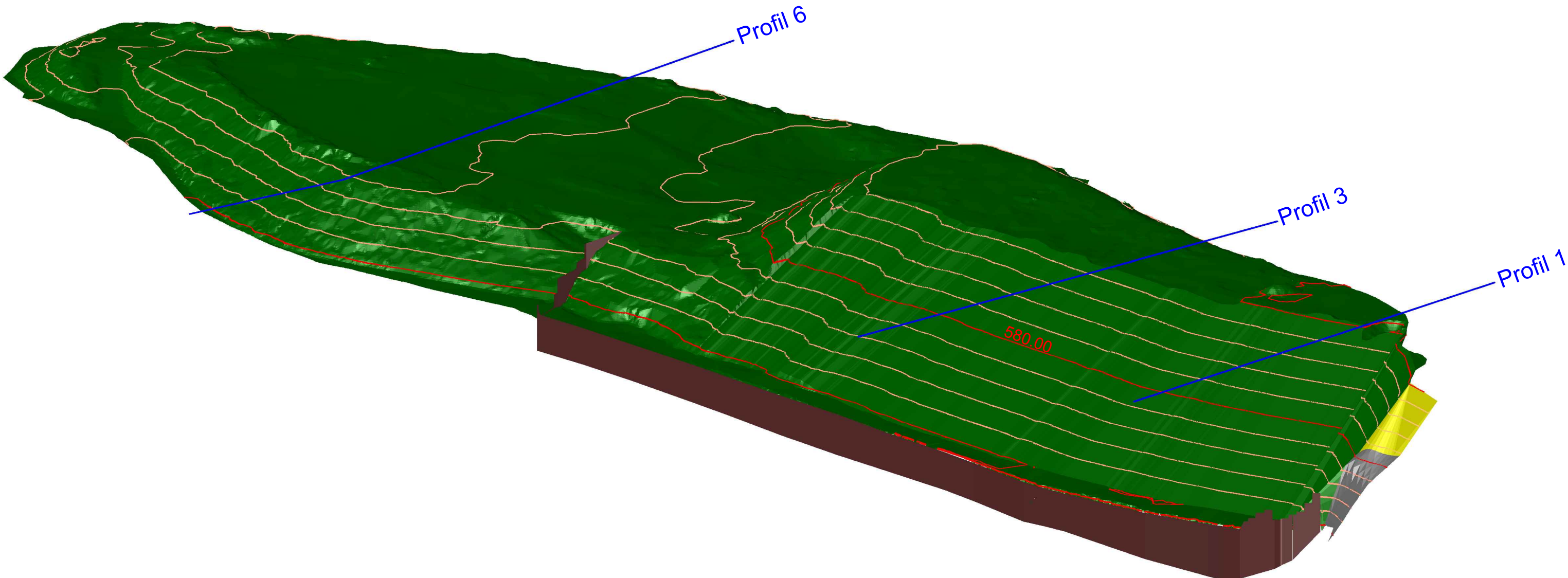


LEGENDE:

- Décharge
- Alluvions de la Sarine
- Gravier interglaciaires
- Molasse

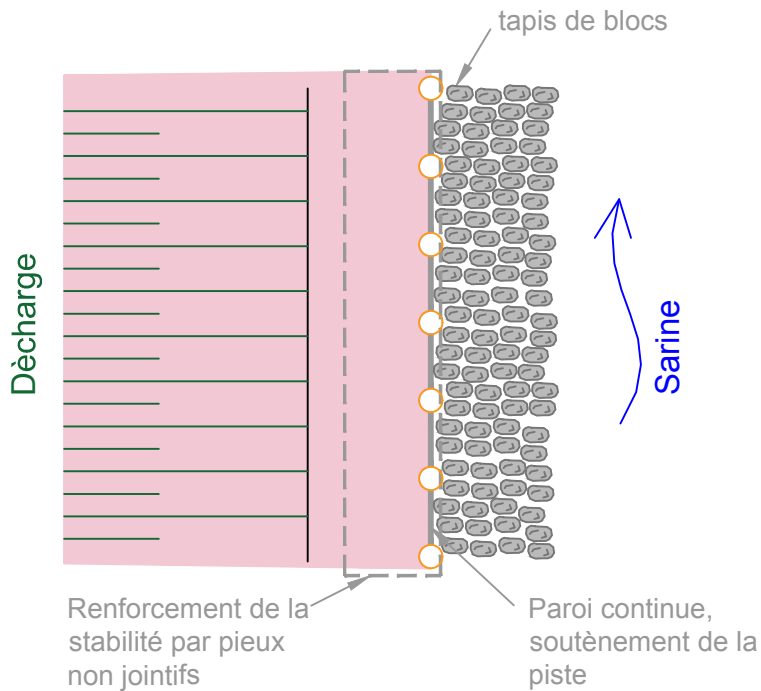
Variante 4 - vue 3D des matériaux après excavation

- LEGENDE:**
- Décharge
 - Alluvions de la Sarine
 - Gravier interglaciaires
 - Molasse

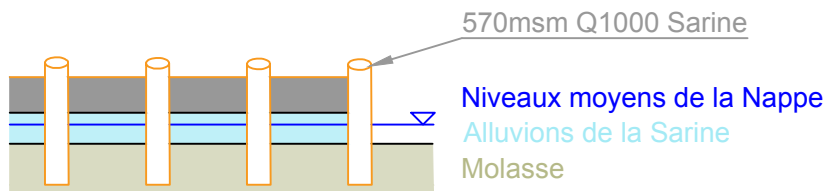


Variante 4 : schéma de la paroi

a) Vue en plan



b) Profil le long de la Saraine



**ANNEXE H DÉTAIL DE L'ÉVALUATION DES COÛTS
D'ASSAINISSEMENT POUR LES VARIANTES 1 À 4**

Décharge de la Pila - Variante n°1 - Assainissement total - Estimation des coûts

Position	Unités	Qtés	Prix unitaire	Prix total
Projet et suivi des travaux				5'466'000
Planification				
Elaboration du projet				
Direction des travaux assainissement et remise en état				
Suivi environnemental du chantier				
Surveillance et analyses (eaux souterraines, Sarine, air)	mois	60	40'000	2'400'000
Installations de chantier et travaux préparatoires				
Installation générale de chantier selon SIA 118	mois	60	80'000	4'800'000
Défrichage zone haute et basse, évacuation souches	m2	23'500	40	940'000
Clôtures / portails	ml	300	100	30'000
Mesures de suivi hygiène et sécurité (PHS)	mois	60	10'000	600'000
Raccordements services /adaptations	gl	1	30'000	30'000
Système de lavage pour les véhicules	mois	60	3'000	180'000
Pont-bascule avec gestion électronique	mois	60	2'000	120'000
Location, équipement de terrains (stockage et installations)				1'000'000
Place de stockage sur zone basse	m2	8'000	40	320'000
Sécurisation tas (feuille PE)	m2	768'000	2	1'536'000
Piste chantier principale	m	700	200	140'000
Entretien accès / piste				80'000
Installations de gestion et traitement des eaux				1'500'000
Forages flux amont (variante 4)	m		700	
Excavation, terrassement, sécurisation				
Fouilles de reconnaissance	p	700	200	140'000
Terrassement	t	500'760	50	25'038'000
Couverture provisoire surfaces assainies	m2	23'500	10	235'000
Surcoûts pour travaux en terrain difficile				5'007'600
Gestion des eaux usées, traitement, évacuation, analyses				700'000
Ancrage / sécurisation paroi palplanche, travaux hydraulique				300'000
Réalisation de bermes et pistes provisoires	m	3'000	150	400'000
Rampe d'accès à la fouille	gl	1	500'000	500'000
PV pour matériaux d'excavation issu de la paroi (variante 4)	t		100	
Contrôles externes en laboratoire	p	2'782	520	1'446'640
PV pour matériaux d'excavation issus du secteur falaise	t	3'600	100	360'000
Transport sur chantier, stockage interméd, transbord.	t	500'760	10	5'007'600
Reconstitution de la berge / enrochements				
Remodelage et enrochements	m3	2'400	400	960'000
Stabilisations/confinement de surface, remise en état (zone basse + haute)				
Secteur falaise	m2	1'000	400	400'000
Gravier, matériaux propres	m3	25'000	100	2'500'000
Pistes d'accès	m2		200	
Terres végétales, horizon B, apport, stockage, pose	m3	4'000	30	120'000
Terres végétales, horizon A	m3	3'000	40	120'000
Recultivation	m2	10'000	15	150'000
Démantèlement infrastructures, paroi palplanches				
Palplanches	m	190	300	57'000
Démantèlement infrastructures, repli pistes / places				800'000
Travaux d'entretien (sur 20 ans)				
Contrôles du site (visuel, géomètre, cas de crue)	p	20	10'000	200'000
Travaux végétation, coupe	p	100	10'000	1'000'000
Réfection endommagement talus				
Réfection berge (blocs, afouillement locaux)	p	2	60'000	120'000
Surveillance eaux souterraines et Sarine (sur 20 ans)				
Mise en œuvre, entretien réseau de surveillance		1	75'000	75'000
Analyses eaux souterraines (fraction dissoute+particulaire)	p	100	580	58'000
Analyses eaux Sarine	p	42	1'000	42'000
Prélèvement: Eaux souterraines + Sarine	p	140	1'500	210'000
Rapport technique	p	20	10'000	200'000

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	19'142'000
Travaux de terrassement	39'135'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	130'288'462
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	5'107'000
Post-assainissement : entretien et surveillance	1'905'000
Total variante 1 CHF HT	195'577'462

Décharge de la Pila - Variante d'assainissement n°2 - Estimation des coûts

Position	Unités	Qtés	Prix unitaire	Prix total
Projet et suivi des travaux				3'389'000
Planification				
Elaboration du projet				
Direction des travaux assainissement et remise en état				
Suivi environnemental du chantier				
Surveillance et analyses (eaux souterraines, Sarine, air)	mois	48	40'000	1'920'000
Installations de chantier et travaux préparatoires				
Installation générale de chantier selon SIA 118	mois	48	70'000	3'360'000
Défrichage zone haute et basse, évacuation souches	m2	23'500	40	940'000
Clôtures / portails	ml	300	100	30'000
Mesures de suivi hygiène et sécurité (PHS)	mois	48	10'000	480'000
Raccordements services /adaptations	gl	1	30'000	30'000
Système de lavage pour les véhicules	mois	48	3'000	144'000
Pont-basculer avec gestion électronique	mois	48	2'000	96'000
Location, équipement de terrains (stockage et installations)	gl			750'000
Place de stockage sur zone basse	m2	8'000	40	320'000
Sécurisation tas (feuille PE)	m2	576'000	2	1'152'000
Piste chantier principale	m	700	200	140'000
Entretien accès / piste				60'000
Installations de gestion et traitement des eaux				1'000'000
Forages flux amont (variante 4)	m		700	
Excavation, terrassement, sécurisation				
Fouilles de reconnaissance	p	400	200	80'000
Terrassement	t	333'400	50	16'670'000
Couverture provisoire surfaces assainies	m2	23'500	10	235'000
Surcoûts pour travaux en terrain difficile				3'334'000
Gestion des eaux usées, traitement, évacuation, analyses				700'000
Ancrage / sécurisation paroi palplanche, travaux hydraulique				300'000
Réalisation de bermes et pistes provisoires	m	2'000	200	400'000
Rampe d'accès à la fouille	gl	1	500'000	500'000
PV pour matériaux d'excavation issu de la paroi (variante 4)	t		100	
Contrôles externes en laboratoire	P	1'852	520	963'156
PV pour matériaux d'excavation issus du secteur falaise	t	3'600	100	360'000
Transport sur chantier, stockage interméd, transbord.	t	333'400	10	3'334'000
Zone haute : Reconstitution de la berge / enrochements				
Remplacement pied de berge avec matériaux propres	m3	6'000	100	600'000
Enrochements	m3	1'800	400	720'000
Zone basse : Reconstitution de la berge / enrochements				
Remodelage et enrochements	m3	3'000	300	900'000
Stabilisations/confinement de surface, remise en état (zone basse)				
Surface solde décharge développée	m2	12'600	300	3'780'000
Pistes d'accès, bermes	m2	2'600	200	520'000
Terre végétale, horizon B, apport, stockage, pose	m3	5'040	30	151'200
Terre végétale, horizon A	m3	3'780	40	151'200
Recultivation	m2	12'600	15	189'000
Stabilisations de surface (talus vers ancienne zone haute)				
Secteur falaise	m2	1'000	400	400'000
Surface développée du talus	m2	4'000	300	1'200'000
Démantèlement infrastructures, paroi palplanches				
Palplanches	m	190	300	57'000
Démantèlement infrastructures, repli pistes / places				400'000
Travaux d'entretien (sur 100 ans)				
Contrôles du site (visuel, géomètre, cas de crue)	p	100	20'000	2'000'000
Travaux végétation, coupe	p	100	12'600	1'260'000
Réfection endommagement talus	p	10	30'000	300'000
Réfection berge (blocs, afouillement locaux)	p	4	60'000	240'000
Surveillance eaux souterraines et Sarine (sur 100 ans)				
Mise en œuvre, entretien réseau de surveillance		5	75'000	375'000
Analyses eaux souterraines (fraction dissoute+particulaire)	p	350	580	203'000
Analyses eaux Sarine	p	210	1'000	210'000
Prélèvement: Eaux souterraines + Sarine	p	560	1'500	840'000
Rapport technique	p	100	10'000	1'000'000

Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires	13'811'000
Travaux de terrassement	26'876'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)	95'653'422
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état	9'068'400
Post-assainissement : entretien et surveillance	6'428'000
Total variante 2 CHF HT	151'836'822

Décharge de la Pila - Variante d'assainissement n°3 - Estimation des coûts

Position	Unités	Qtés	Prix unitaire	Prix total
Projet et suivi des travaux				2'742'000
Planification				
Elaboration du projet				
Direction des travaux assainissement et remise en état				
Suivi environnemental du chantier				
Surveillance et analyses (eaux souterraines, Sarine, air)	mois	36	30'000	1'920'000
Installations de chantier et travaux préparatoires				
Installation générale de chantier selon SIA 118	mois	36	60'000	2'160'000
Défrichage zone haute et basse, évacuation souches	m2	23'500	40	940'000
Clôtures / portails	ml	300	100	30'000
Mesures de suivi hygiène et sécurité (PHS)	mois	36	10'000	360'000
Raccordements services /adaptations	gl	1	30'000	30'000
Système de lavage pour les véhicules	mois	36	3'000	108'000
Pont-bascule avec gestion électronique	mois	36	2'000	72'000
Location, équipement de terrains (stockage et installations)				500'000
Place de stockage sur zone basse	m2	8'000	40	320'000
Sécurisation tas (feuille PE)	m2	384'000	2	768'000
Piste chantier principale	m	700	200	140'000
Entretien accès / piste				40'000
Installations de gestion et traitement des eaux				750'000
Forages flux amont (variante 4)	m		700	
Excavation, terrassement, sécurisation				
Fouilles de reconnaissance	p	150	200	30'000
Terrassement	t	119'100	50	5'955'000
Couverture provisoire surfaces assainies	m2	23'500	10	235'000
Surcoûts pour travaux en terrain difficile				1'191'000
Gestion des eaux usées, traitement, évacuation, analyses				400'000
Ancrage / sécurisation paroi palplanche, travaux hydraulique				200'000
Réalisation de bermes et pistes provisoires	m	1'300	200	260'000
Rampe d'accès à la fouille	gl	1	300'000	300'000
PV pour matériaux d'excavation issu de la paroi (variante 4)	t		100	
Contrôles externes en laboratoire	P	662	520	344'067
PV pour matériaux d'excavation issus du secteur falaise	t	3'600	100	360'000
Transport sur chantier, stockage interméd, transbord.	t	119'100	10	1'191'000
Zone haute : Reconstitution de la berge / enrochements				
Remplacement pied de berge avec matériaux propres	m3	4'800	100	480'000
Enrochements	m3	2'400	400	960'000
Zone basse : Reconstitution de la berge / enrochements				
Remodelage et enrochements	m3	3'000	300	900'000
Stabilisations/confinement de surface, remise en état (zone basse + haute)				
Secteur falaise	m2	1'000	400	400'000
Surface solde décharge développée	m2	21'000	300	6'300'000
Pistes d'accès, bermes	m2	2'600	200	520'000
Terre végétale, horizon B, apport, stockage, pose	m3	8'400	30	252'000
Terre végétale, horizon A	m3	6'300	40	252'000
Recultivation	m2	21'000	15	315'000
Démantèlement infrastructures, paroi palplanches				
Palplanches	m	190	300	57'000
Démantèlement infrastructures, repli pistes / places				300'000
Travaux d'entretien (sur 100 ans)				
Contrôles du site (visuel, géomètre, cas de crue)	p	100	25'000	2'500'000
Travaux végétation, coupe	p	100	21'000	2'100'000
Réfection endommagement talus	p	20	30'000	600'000
Réfection berge (blocs, afouillement locaux)	p	4	60'000	240'000
Surveillance eaux souterraines et Sarine (sur 100 ans)				
Mise en œuvre, entretien réseau de surveillance		7	105'000	735'000
Analyses eaux souterraines (fraction dissoute+particulaire)	p	490	580	284'200
Analyses eaux Sarine	p	210	1'000	210'000
Prélèvement: Eaux souterraines + Sarine	p	700	1'500	1'050'000
Rapport technique	p	100	10'000	1'000'000
Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires				10'880'000
Travaux de terrassement				10'466'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)				30'971'001
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état				10'736'000
Post-assainissement : entretien et surveillance				8'719'200
Total variante 3 CHF HT				71'772'201

Décharge de la Pila - Variante d'assainissement n°4 - Estimation des coûts

Position	Unités	Qtés	Prix unitaire	Prix total
Projet et suivi des travaux				2'108'000
Planification				
Elaboration du projet				
Direction des travaux assainissement et remise en état				
Suivi environnemental du chantier				
Surveillance et analyses (eaux souterraines, Sarine, air)	mois	24	30'000	720'000
Installations de chantier et travaux préparatoires				
Installation générale de chantier selon SIA 118	mois	24	50'000	1'200'000
Défrichage zone haute et basse, évacuation souches	m2	23'500	40	940'000
Clôtures / portails	ml	300	100	30'000
Mesures de suivi hygiène et sécurité (PHS)	mois	24	10'000	240'000
Raccordements services /adaptations	gl	1	30'000	30'000
Système de lavage pour les véhicules	mois	24	3'000	72'000
Pont-bascule avec gestion électronique	mois	24	2'000	48'000
Location, équipement de terrains (stockage et installations)				300'000
Place de stockage sur zone basse	m2	8'000	40	320'000
Sécurisation tas (feuille PE)	m2	384'000	2	768'000
Piste chantier principale	m	700	200	140'000
Entretien accès / piste				40'000
Installations de gestion et traitement des eaux				500'000
Forages flux amont (variante 4)	m	200	700	140'000
Excavation, terrassement, sécurisation				
Fouilles de reconnaissance	p	70	200	14'000
Terrassement	t	46'409	40	1'856'000
Couverture provisoire surfaces assainies	m2	23'500	10	235'000
Surcoûts pour travaux en terrain difficile				371'200
Gestion des eaux usées, traitement, évacuation, analyses				300'000
Réalisation de bermes et pistes provisoires	m	1'300	200	260'000
Rampe d'accès à la fouille				
Ancrage / sécurisation paroi palplanche, travaux hydraulique				100'000
PV pour matériaux d'excavation issus de la paroi (variante 4)	t	3'456	110	380'160
Contrôles externes en laboratoire	p	258	520	134'000
PV pour matériaux d'excavation issus du secteur falaise	t	3'600	110	396'000
Transport sur chantier, stockage interméd, transbord.	t	46'409	10	464'000
Zone haute : Reconstitution de la berge / enrochements				
Paroi semi perméable (pieux non jointifs en zone saturée)	m	160	3'600	576'000
Remplacement pied de berge avec matériaux propre	m3	1'080	100	108'000
Reconstitution berme au pied de décharge	m3	1'080	100	108'000
Enrochement zone haute	m3	2'700	400	1'080'000
Zone basse : Reconstitution de la berge / enrochements				
Remodelage et enrochements	m3	3'000	300	900'000
Stabilisations/confinement de surface, remise en état (zone basse + haute)				
Secteur falaise	m2	1'000	400	400'000
Surface solde décharge développée	m2	23'500	300	7'050'000
Pistes d'accès, bermes	m2	2'600	200	520'000
Terre végétale, horizon B, apport, stockage, pose	m3	7'100	30	213'000
Terre végétale, horizon A	m3	5'000	40	200'000
Recultivation	m2	23'500	15	352'500
Démantèlement infrastructures, paroi palplanches				
Palplanches	m	190	500	95'000
Démantèlement infrastructures, repli pistes / places				200'000
Travaux d'entretien (sur 100 ans)				
Contrôles du site (visuel, géomètre, cas de crue), niveau nappe	p	100	30'000	3'000'000
Travaux végétation, coupe	p	100	23'500	2'350'000
Réfection endommagement talus	p	20	30'000	600'000
Réfection berge (blocs, afouillement locaux)	p	4	60'000	240'000
Réfection paroi	p	2	288'000	576'000
Surveillance eaux souterraines et Sarine (sur 100 ans)				
Mise en œuvre, entretien réseau de surveillance	p	8	120'000	960'000
Analyses eaux souterraines (fraction dissoute+particulaire)	p	490	580	284'200
Analyses eaux Sarine	p	210	1'000	210'000
Prélèvement: Eaux souterraines + Sarine	p	700	1'500	1'050'000
Rapport technique	p	100	10'000	1'000'000
Projet, suivi, installations de chantier, travaux préparatoires				7'600'000
Travaux de terrassement				4'510'000
Transport et élimination des matériaux (tri, traitement, valorisation)				10'745'395
Sécurisation des surfaces, berges, remise en état				11'802'500
Post-assainissement : entretien et surveillance				10'270'200
Total variante 4 CHF HT				44'928'095

**ANNEXE I CRITÈRES RETENUS POUR L'ÉVALUATION DES
VARIANTES**

Critères	Description	Echelle d'évaluation					Remarques	
		1	2	3	4	5		
Faisabilité	Etat de la technique / perspectives de réussite	Procédés éprouvés et mis en œuvre avec succès Objectifs d'assainissement atteints avec une grande certitude, respect des délais	Très peu éprouvé/ connu	Peu éprouvé/ connu	Moyenne- ment éprouvé/ connu	Eprouvé / connu	Très éprouvé/ connu	Pour toutes les variantes, les techniques d'excavation/ prétraitement/ traitement sont des techniques fiables et éprouvées. La certitude d'atteindre les objectifs d'assainissement est plus faible pour les variantes partielles et décroît en fonction du volume de déchets excavés. Le non respect des délais et des coûts est plus important pour les variantes 1 et 2 qui nécessitent l'excavation et le traitement d'un grand volume de matériaux et déchets.
	Flexibilité par rapport à la technique	Possibilité d'adapter la variante si les conditions changent	Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	Les variantes 1 et 2, qui ne comportent pas de position de berge fixe, sont les plus flexibles pour ce qui concerne la réalisation de l'assainissement. La variante 4, qui possède la plus grande longueur de berge fixe, est la moins flexible.
	Infrastructure requise / Mesures de sécurité	Dispositifs de construction requis sur le site nécessaire de la santé (mesures/infrastructures nécessaires)	Place Protection Très importante	Importante	Moyenne	Peu importante	Très peu importante	Pour toutes les variantes, des mesures de confinement périphérique et de traitement des eaux seront nécessaires pendant l'assainissement. Elle seront plus importantes en cas d'assainissement total. Le prétraitement sur place nécessite également de l'espace pour le stockage et le traitement et plus de mesures de sécurité pour les travailleurs.
Efficacité	Degré d'atteinte des objectifs d'assainissement (PCB)	Etat de la technique Mesures adaptées à l'atteinte des objectifs d'assainissement	<20%	20-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Les variantes 1, 2 et 3 permettent d'atteindre les objectifs d'assainissement pour les PCB. La variante 4 ne permet pas de garantir le respect de la valeur de 10 x Osites en aval à proximité du site.
	Réduction du flux de PCB solide	Réduction du flux de PCB solide émis à partir du site de la Pila par rapport à l'état 0	<70%	70-80%	80-90%	90-100%	100%	Les 4 variantes permettent d'éliminer les flux de PCB solides à partir du site de la Pila
	Réduction du flux de PCB dissous	Réduction du flux de PCB dissous émis à partir du site de la Pila par rapport à l'état 0	<70%	70-80%	80-90%	90-100%	100%	Seule la variante 1 permet l'élimination totale du flux de PCB dissous à partir du site. Les variantes 2 et 3 permettent de réduire de respectivement 99% et de 97% ce flux. La variante 4 permet d'atteindre une réduction de 70% du flux de PCB dissous.
	Niveau de contrôle possible	Possibilité d'effectuer des contrôles en continu pendant l'assainissement et suivi des résultats Dangers associés à des accidents majeurs	Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	Les variantes partielles présentent un risque résiduel en cas de crue exceptionnelle. Pour la variante 4, ce risque est plus important.
Respect de l'environnement/ apport écologique	Potentiel de pollution/ réduction de la quantité de polluants	Potentiel de pollution restant sur le site / % de polluants détruits	<20%	20-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Le potentiel de pollution restant sur le site est compris entre 25 % et 90% de la masse de PCB totale pour les variantes partielles. Il est de 70% et plus en cas d'assainissement partiel de la zone haute.
	Nécessité d'un suivi et d'une surveillance et durée des opérations	Nécessité de réaliser un suivi et une surveillance Nombre d'années requises pour le suivi et la surveillance	Très important	Important	Moyen	Peu important	Très peu important	La nécessité d'une surveillance est plus importante (et plus longue après l'assainissement) pour les variantes partielles. La variante 4 est celle qui demande le suivi post-assainissement et la maintenance des infrastructures la plus importante.
	Consommation d'énergie	Energie consommée pour les mesures d'assainissement, le transport et l'élimination des déchets	Très élevée	Elevée	Moyenne	Faible	Très faible	L'énergie totale consommée est plus importante pour la variante totale. Elle décroît en fonction du volume de déchets et matériaux excavés et à traiter.
	Emissions	Pollution atmosphérique, bruit, poussières et odeurs produits par l'assainissement (intensité et durée)	Très élevée	Elevée	Moyenne	Faible	Très faible	La totalité des émissions produites est plus importante pour la variante de décontamination totale. Les émissions sont réduites par un volume d'extraction et de traitement moins important et par une durée moindre du chantier d'assainissement.

ANNEXE J CAS DE CRUE EXCEPTIONNELLE (HQ1'000)

Décharge de la Pila – Variantes d'assainissement

Annexe J - Cas de crue exceptionnelle

Table des matières

1. CAS DE CRUE EXCEPTIONNELLE	1
1.1 Contexte et données disponibles	1
1.2 Exploitation du modèle hydraulique	2
1.2.1 Données disponibles	2
1.2.2 Travaux effectués	2
1.2.3 Résultats	3
1.2.4 Réserves	5
1.3 Exploitation du modèle hydrogéologique	5
1.3.1 Données disponibles	5
1.3.2 Travaux effectués	5
1.3.3 Résultats	6
1.3.4 Réserves	8

1. Cas de crue exceptionnelle

1.1 Contexte et données disponibles

La crue artificielle de septembre 2016 a été suivie en détail et les données recueillies ont été exploitées dans le Rapport du 30 juin 2017. Avec un débit maximal effectif de 195 m³/s¹, et un temps de retour entre 2 et 10 ans, cette crue n'est cependant pas un événement extrêmement exceptionnel.

Les crues exceptionnelles récentes sont celles survenues en août 2005 et 2007 avec des débits de 750 m³/s et 605 m³/s à la station hydrométrique de Sarine Fribourg. Durant la crue de 2007, certains piézomètres de la décharge étaient équipés de sondes de niveau ; il s'agit des seules données recueillies directement durant une crue importante sur le site de la Pila.

Le type de crues à prendre en compte pour évaluer l'incidence des crues sur le site contaminé (solde des matériaux en cas d'assainissement partiel) et concevoir la sécurisation de la berge n'est pas défini. Le glissement de terrain potentiel a été calculé sur la base des niveaux de la Sarine estimés pour HQ₁₀₀ (« la crue centennale de la Sarine dans la région de la décharge de la Pila a été estimée par les services de l'Etat à 646 m³/s »). Cela correspond approximativement à la crue de 2005.

Le modèle hydrogéologique a uniquement été exploité en situation normale et avec les données de la crue artificielle de septembre 2016. Aucune crue exceptionnelle n'a été utilisée comme condition limite du modèle hydrogéologique à ce jour.

¹ Le débit de pointe initialement projeté était de 255 m³/s ; le débit de pointes effectif, de 195 m³/s a été établi ultérieurement (document Hydrique M13_001_07_Crue_Artificielle_Petite_Sarine_2016.docx du 17.07.2017 transmis par la SLC)

Les débits de pointe et l'hydrogramme à Rossens d'une crue HQ₁₀₀₀ (crue 1'050 m³/s) présentée dans l'étude Hydrique constituent des nouvelles données (reçu par la Section lacs et cours d'eau SLC en octobre 2017, confidentiel à n'utiliser que dans le cadre des études Pila).

1.2 Exploitation du modèle hydraulique

1.2.1 Données disponibles

Cette première évaluation est basée sur les nouvelles données reçues à fin octobre 2017 et l'expérience acquise dans le cadre des activités (travaux, investigations) sur le site.

Dans le cadre de vérification de la sécurité aux crues du barrage de Rossens le bureau Hydrique a établi un scénario de crue avec un temps de retour de 1000 ans. La crue HQ₁₀₀₀ retenue dans le cadre de cette étude a une durée de 36 heures et un débit de pointe de 1050 m³/s. Pour la vérification hydraulique, seul le débit de pointe (constant, sans hydrogramme de crue) a été utilisé.

Le modèle hydraulique 1D utilisé par Hydrique a été repris dans le cadre de la présente étude, afin de obtenir les niveaux d'eau et les forces d'arrachement agissant aux pieds de la décharge de la Pila. La géométrie du lit de la Sarine se base sur les profils en travers relevés par l'OFEV en 2006. Le MNT a également été pris en compte afin de compléter les profils en rive droite au droit de la décharge de la Pila, vers la sonde de mesure des niveaux d'eau (entre le canal de fuite de la centrale de Hauterive et l'embouchure de la Gérine, en rive gauche). Ce modèle a été calé par Hydrique selon les hauteurs d'eau mesurées en continu depuis 2013 au droit de la décharge en aval de la centrale de Hauterive, et notamment pour un débit de pointe de 256 m³/s.

Pour les débits extrêmes, les profils inclus dans le modèle ne sont souvent pas assez larges et surestiment ainsi les niveaux d'eau (*remarque* : le logiciel considère une paroi verticale aux extrémités des profils).

Le modèle hydraulique 1D ne tient pas compte des phénomènes de courbure du cours d'eau, qui peuvent avoir un impact local non négligeable.

Afin de prendre en compte les courbures locales de l'écoulement, non représentées dans les profils OFEV, des rayons de courbure ont été mesurés sur les orthophotos du site. Ce procédé permet ensuite d'estimer la profondeur d'affouillement localisée.

1.2.2 Travaux effectués

Dans le cadre de la présente étude, les profondeurs d'écoulement pour la crue extrême (HQ₁₀₀₀), les forces d'arrachement et les potentiels d'affouillement en pied de berge ont été évaluées pour des profils représentatifs de la décharge de la Pila.

Les valeurs de profondeur d'eau et de forces d'arrachement ont été reprises du modèle hydraulique 1D fournis par Hydrique.

Pour les profils 1 et 3, qui se trouvent dans une zone avec une courbure locales (rayon en extradors : ~170 m), la formule de Kikkawa a été utilisée afin d'estimer la profondeur d'affouillement dans un virage et déterminer les profondeurs d'ancrage des protections de berge.

La surélévation du plan d'eau liée à l'effet de courbe a également été évaluée, afin de connaître les hauteurs de protection de berges).



Figure 1 Situation des profils utilisés pour l'évaluation et présentés en Annexe D

1.2.3 Résultats

La pente de la Sarine est assez faible (0.7%), voire localement négative (-0.18%, pour les tronçons rectilignes amont et aval du méandre de la centrale de Hauterive).

Modélisation HEC-RAS 1D

Le tableau ci-dessous reporte les résultats de modélisation hydraulique 1D faite avec le logiciel HEC-RAS, pour la crue HQ₁₀₀₀.

Les hauteurs d'eau varient entre 5.5 et 5.9 m. Les forces d'arrachement varient entre 75 et 100 N/m². Ces contraintes sont très faibles et peuvent être facilement contrastées par des enrochements de dimensions modestes.

Profil	RS (profil HEC-RAS)	Niveau d'eau (msm)	Hauteur d'eau maximale (m)	τ (N/m ²)
1	37'675.2*	569.2	5.9	80
3	37'728.9*	569.4	5.7	75
6 (aval)	37'881.4*	569.7	5.5	99
6 (amont)	38'247	571.4	5.6	80

Tableau 1 Résultats de la modélisation hydraulique HEC-RAS pour HQ₁₀₀₀. Les profils HEC-RAS (RS) avec un * correspondent aux profils interpolés par le logiciel, alors que les profils sans * ont été mesurés par l'OFEV.

Prise en compte de l'effet de courbe

Pour les profils 1 et 3, il est nécessaire de prendre en compte les conditions d'écoulement locales, très hétérogènes. Ces conditions localisées sont la source d'affouillements et érosions de berge locaux.

Le rayon de courbure entre les profils 1 et 3 est d'environ 170 m en extrados (157 m au centre du cours d'eau).

Le tableau ci-dessous indique les surélévations de plan d'eau en extrados dû à la courbure locale de la Sarine, ainsi que la profondeur d'affouillement potentielle pour deux diamètres moyens des sédiments du lit (10 et 20 cm).

Une surélévation du plan d'eau en intrados de l'ordre de 50-60 cm est attendue vers les palplanches. De plus, une profondeur d'affouillement de l'ordre de 1.5 à 2.5 m est possible en cas de crue millénaire HQ₁₀₀₀.

Profil	RS (profil HEC-RAS)	Surélévation du plan d'eau en extrados (m)	Niveau d'eau en extrados (msm)	Profondeur d'affouillement si $d_m=0.1$ m	Niveau de l'affouillement si $d_m=0.1$ m (msm)
1	37'675.2*	0.6	569.8	2.4	560.9
3	37'728.9*	0.5	569.9	2.3	561.4

Tableau 2 Prise en compte de la courbure locale (170 m), pour les calculs de surélévation du plan d'eau et de profondeur d'affouillement.

Dimensionnement des ouvrages de protection

Profil 6 :

La décharge se trouve en intrados sur ce profil. Aucun affouillement en pied de berge n'est attendu. Le niveau d'eau peut monter jusqu'à 569.7 msm dans la partie aval du profil et 571.4 msm dans la partie en amont du méandre. Les forces d'arrachement sont faibles et aucune stabilisation du pied de berge ne semble nécessaire. Cela est notamment confirmé par la présence de bancs de sédiments, typiques des zones en intrados.

Profil 1 et 3 :

La prise en compte de l'effet de courbe localisé permet d'identifier un risque d'affouillement du pied de digue de l'ordre de 2.5 m (560.9 et 561.4 msm respectivement). Une surélévation du plan d'eau en extrados peut également être attendue et sera de l'ordre de 50-60 cm. Les niveaux d'eau à attendre sont ainsi de 570.0 msm environ.

Les forces d'arrachement en pieds de berge peuvent atteindre 160 N/m² localement, en cas d'affouillement (profondeur d'eau de l'ordre de 8.3 m). En considérant une pente d'enrochement de 2:3 (angle de stabilité interne 46°), des blocs de 0.8 à 1 m de diamètre doivent être utilisés en pied de berge afin de stabiliser la fouille.

Afin de stabiliser le pied de berge contre un tel affouillement, il convient de mettre en place une protection profonde du talus. Deux possibilités existent :

1. Stabiliser le pied de berge sur 2.5 m sous le fond du lit au minimum
2. Mettre en place un tapis de blocs qui pourra se réarranger afin de remblayer la zone affouillée

Au vu des enjeux de protection (éviter l'export de matériaux depuis la décharge), il convient de mettre en place dès le départ une stabilisation du pied sur 2.5 m de profondeur. Lorsque le substratum molassique est peu

profond, les blocs devront être ancrés dans la molasse. Néanmoins, la réalisation d'un tel ouvrage étant très complexe (réalisation par basses eaux), il convient de mieux investiguer la possibilité de réaliser un lit de blocs reliés entre eux.

1.2.4 Réserves

Cette analyse initiale est basée sur une géométrie simple et une modélisation 1D des écoulements de la Sarine. Afin de considérer les effets localisés, il sera nécessaire de compléter l'analyse par des profils en travers supplémentaires et une modélisation 2D des écoulements. Cela permettra d'identifier les zones avec des fortes contraintes d'arrachement, afin d'optimiser l'envergure des protections de berge.

À l'endroit des palplanches, il conviendra de mesurer au minimum 4 profils en travers supplémentaires afin de connaître les contraintes locales de l'écoulement.

1.3 Exploitation du modèle hydrogéologique

1.3.1 Données disponibles

Cette première évaluation est basée sur les nouvelles données reçues à fin octobre 2017, le modèle hydrogéologique élaboré dans le cadre des mesures complémentaires et les données recueillies durant le suivi des crues sur la décharge.

Pour rappel, concernant la crue artificielle de septembre 2016 : Le débit de crue projeté était de 255 m³/s avec un volume d'eau de 11.5 Mio m³. Le débit de pointe recalculé était finalement de 195 m³/s avec un volume déversé de 9.5 Mio m³.

1.3.2 Travaux effectués

L'hydrogramme de la crue artificielle, d'une durée équivalente à la crue extrême HQ1000, a été utilisé afin de construire une nouvelle condition limite pour le modèle Feflow. Cet hydrogramme a été amplifié pour que le niveau de la Sarine soit supérieur de 3 mètres au niveau maximal atteint lors de la crue artificielle de septembre 2016.

Les différents niveaux de la Sarine représentés sur les profils sont rappelés dans le tableau suivant.

Les niveaux maximaux utilisés sont du même ordre que les niveaux issus du modèle HEC-RAS en tenant compte des effets locaux (surélévation du plan d'eau).

		Niveaux Sarine				
Profil	RS (profil HEC-RAS)	Basses eaux (msm)	Hautes eaux (msm)	Pic crue sept. 2016	Pic crue sept. 2016 + 3 m	HQ1000 (msm)
1	37'675.2*	564.55	565.82	567.04	570.04	569.2
3	37'728.9*	564.55	565.87	567.15	570.15	569.4
6 (aval)	37'881.4*	564.90	566.23	567.52	570.52	569.7
6 (amont)	38'247		566.91	568.85	571.85	571.4

Tableau 3 Niveaux mesurés, niveau HQ₁₀₀₀ pour condition limite Feflow. Résultats de la modélisation hydraulique HEC-RAS pour HQ₁₀₀₀.

L'hydrogramme ainsi construit a été utilisé comme condition limite du modèle Feflow pour l'état 0, c'est-à-dire sans palplanches ni pompage.

1.3.3 Résultats

Simulation des niveaux de la nappe en cas de crue HQ1'000

Sur la figure suivante, la réaction du sondage F1 mesurée lors crue exceptionnelle de 2007 est également représentée à titre de comparaison. On constate que la variation du niveau de la nappe observé en 2007 est rapide et importante. Ce phénomène pourrait s'expliquer par une transmission rapide de la charge plutôt que par augmentation réelle de la nappe au début de la crue.

Ce phénomène de mise en pression local n'est pas reproduit par le modèle. La relation hydraulique avec la Sarine est un système qui n'est quasiment jamais à l'équilibre, avec des états avant crue et après crue différents à chaque fois.

La réaction de la nappe au niveau du sondage F1 a tout de même été simulée pour une crue HQ1'000 (il convient de rappeler que le modèle hydrogéologique est utilisé pour un état 0 antérieur et un évènement exceptionnels, pour lesquels il n'est ni calé ni validé). La crue HQ1000 modélisée conduit à une élévation du niveau de la nappe dans l'emprise de la décharge ainsi qu'à une augmentation du flux d'eau transitant par les eaux souterraines.

L'évolution du niveau de la nappe, relativement à la Sarine est représentée graphiquement pour la crue artificielle de septembre 2016 et la crue exceptionnelle HQ1000. Nous constatons une élévation temporaire du niveau de la nappe, retardée par rapport au pic de crue dans la Sarine. Cette simulation permet de conclure que la nappe pourrait atteindre le pied de la décharge aux environs du sondage F1 lors d'une crue extrême. Ce phénomène dépend cependant entièrement de la durée des pics de crue dans la Sarine et est, par conséquent, limitée à quelques heures au sein de la décharge.

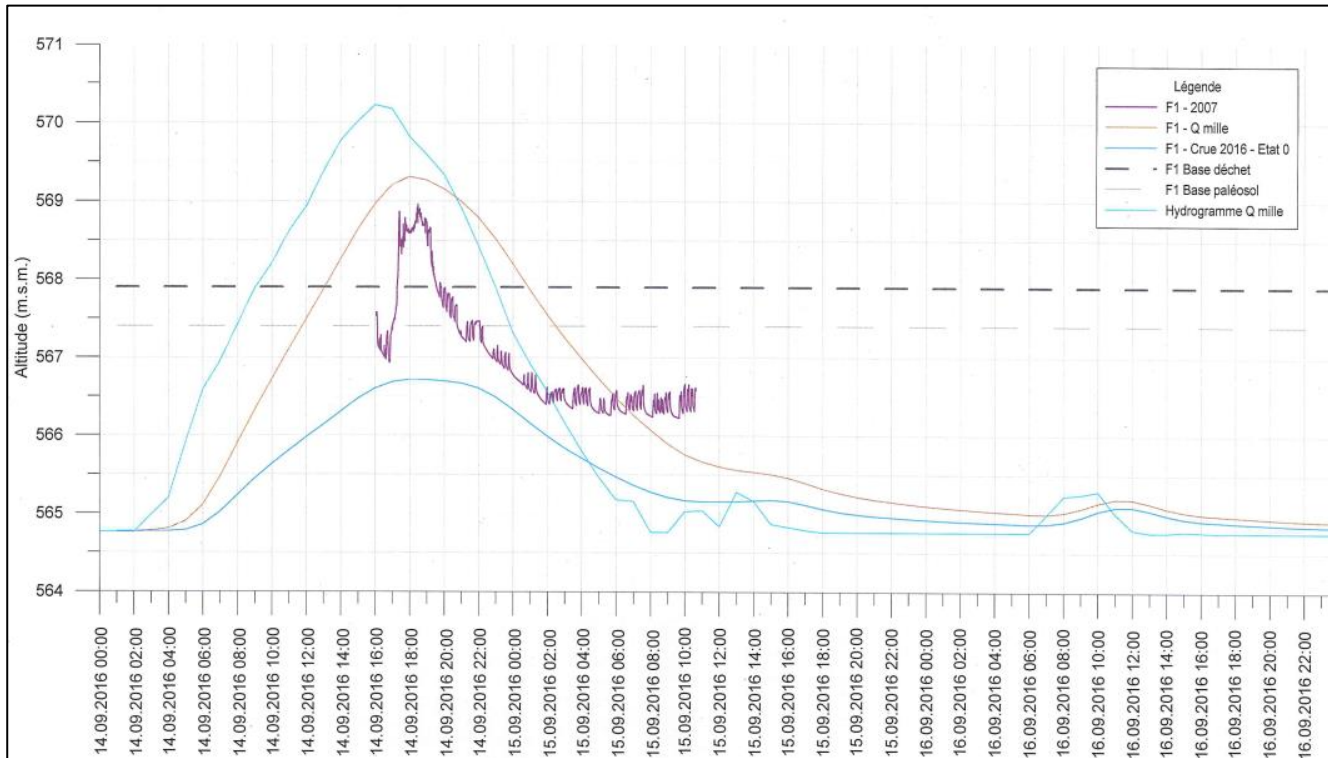


Figure 1.2 Simulation de la réaction de la nappe au sondage F1 pour une crue extrême HQ1'000 et mesures 2007

Flux d'eau et flux PCB lors d'une crue exceptionnelle HQ1'000

Les flux d'eaux souterraines lors d'une crue exceptionnelle HQ1'000 sont calculés selon le même principe que décrit dans l'annexe 5.3 du rapport des études complémentaires (version 2 du 25 mai 2018)

La crue avec un temps de retour de 1000 ans (Q_{1000}) retenue dans le cadre de l'étude bureau Hydrique est d'une durée de 36 heures et avec un débit de pointe de $1050 \text{ m}^3/\text{s}$ (référence au chapitre crue exceptionnel). Comparé aux flux hydraulique sortant des eaux souterraines lors de la crue artificielle de septembre 2016, le flux hydraulique sortant lors de la crue $Q_{1'000}$ augmente d'environ 33%

Pour le calcul du flux PCB dissous, on part d'un scénario worst-case présentant une vidange complète des eaux souterraines se situant sous le corps de la décharge. Les concentrations retenues sont les moyennes des concentrations analysées dans les sondages à l'intérieur de la décharge situés soit dans la zone haute soit dans la zone basse (cf. tableau ci-dessous). Les concentrations sont particulièrement élevées dans la zone haute, ce qui est du aux teneurs élevées dans la zone haute et dans les secteurs autour des sondages F15-08 (huile sur la nappe) et F16-08. Le scénario de vidange de cette zone en cas de crue extrême présente une situation très pessimiste qui ne peut pas être validé par le modèle hydrogéologique. Néanmoins ce scénario ne peut pas être exclu et pourrait se produire lors d'une situation extrême comme une crue exceptionnelle.

	Concentration moyenne 2008	Concentration moyenne aout 2016	Concentration retenue pour calcul flux PCB dissous Q1'000
	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Zone haute	20'900	12'990	1'010
Zone basse	1'660	360	16'945

Tableau 1.4 Concentrations retenues pour le calcul du flux PCB dissous en cas de Q1'000

Crue septembre 2016	Flux hydraulique (m ³ /3j)				Concentration en PCB dissous 4.3∑6PCB (ng/l)				Flux de PCB (g/3j)							
	Etat 2016		Etat 0		Situation normale		Crue		Etat 2016				Etat 0			
					moy.	max.	moy.	max.	moy.	max.	moy.	max.	moy.	max.	moy.	max.
	sem. norm. 3j	crue sept 16	sem. norm. 3j	crue sept. 2016			Teneurs max. crue		semaine normale - 3j	crue sept. 16	semaine normale - 3j		crue sept. 16			
segF61	617	1245	728	1'246	14	26	230	507	0.01	0.02	0.29	0.63	0.01	0.02	0.29	0.6
segPB	326	495	373	495	3	17	5	10	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0
segF27	388	596	431	603	0.3	3	4	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
PalPP4	2	3	120	161	75	300	75	300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.0
PalPP3	5	7	136	162	50	271	50	271	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.0
PalPP2	4	5	62	84	42	280	42	280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.0
PalF07-PP1	3	3	224	269	1'572	3'883	1'572	3'883	0.00	0.01	0.01	0.01	0.35	0.87	0.42	1.0
PalF05-PP1	3	4	68	118	1'572	3'883	1'572	3'883	0.00	0.01	0.01	0.01	0.11	0.26	0.19	0.5
∑ Zone basse	1331	2336	1532	2'344					0.01	0.02	0.29	0.64	0.01	0.03	0.29	0.6
∑ Zone haute				795												2.3
∑ totale	1348	2356	2142	3'139					0.02	0.05	0.30	0.67	0.49	1.25	0.92	2.9

Crue Q1'000	Flux hydraulique (m ³ /3j)				Concentration en PCB dissous 4.3∑6PCB (ng/l)				Flux de PCB (g/3j)			
	sem. norm. 3j	crue	sem. norm. 3j	crue Q1000			moyenne 2016/08	semaine normale - 3j	crue Q1000	semaine normale - 3j		crue Q1000
segF61			728	1'595			1'010			0.00		1.6
segPB			373	842			1'010			0.00		0.8
segF27			431	933			1'010			0.00		0.9
PalPP4			120	256			16'945			0.00		4.3
PalPP3			136	248			16'945			0.00		4.2
PalPP2			62	129			16'945			0.00		2.2
PalF07-PP1			224	451			16'945			0.00		7.6
PalF05-PP1			68	204			16'945			0.00		3.5
∑ Zone basse			1532	3'369						0.00	0.00	3.4
∑ Zone haute				1'289								21.8
∑ totale			2142	4'658						0.00	0.00	25.2

Figure 1.3 Flux hydrauliques et flux PCB pour une situation normale, en cas de crue septembre 2016 et de crue exceptionnelle HQ1'000

1.3.4 Réserves

Pour rappel :

A le modèle n'est pas calé pour simuler des crues extrêmes ni des crues de moindre importance. La discussion de l'effet des crues sur la nappe, discutées dans les chapitres précédents, a un caractère indicatif. Les résultats numériques ne sont pas à utiliser en tant que valeurs absolues, mais comme des ordres de grandeur destinés à comparer les variantes d'assainissement.

B le modèle n'est pas calé pour simuler un état 0 antérieur ou un état futur. Les mesures effectuées en 2016 ont permis de caler la zone basse, mais pas la zone haute.