



ARCAVI

Commune d'ÉTEIGNIÈRES (08)

**Demande d'Autorisation
Environnementale du projet
d'extension de l'ISDND en
rehausse sur d'anciens casiers
Étude de tassements et
prédimensionnement d'une
géogrille**



Réf : NO14000677/1087339-02

FLBT-APER/LAC

09/12/2024

GINGER BURGEAP Région Nord-Ouest (Arras) • 5, chemin des Filatiers • 62223 Sainte-Catherine
Tél : 03.21.24.38.00 • burgeap.arras@groupeginger.com

ARCAVI

Commune d'ÉTEIGNIÈRES (08)

Demande d'Autorisation Environnementale du projet d'extension de l'ISDND en rehausse
sur d'anciens casiers
Étude de tassements et prédimensionnement d'une géogridde

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction Nom / signature	Vérification Nom / signature	Validation Nom / signature
Rapport	13/09/2024	01	F. BERNADET  A. PERE 	A. CHEREL 	A. CHEREL 
Rapport	19/11/2024	02	B. DUVAL 	A. CHEREL 	A. CHEREL 
Rapport	03/12/2024	02	B. DUVAL 	A. CHEREL 	A. CHEREL 

Numéro de projet / de rapport :	Réf : NO1400067 / 1087339-02
Num. du site d'intervention (GMP) :	A46832
Domaine technique :	14-5

SOMMAIRE

1.	Introduction	5
2.	Sources.....	7
3.	Historique d'exploitation	8
3.1	Zonage d'exploitation [3][4][5][6].....	8
3.2	Description générale des zones d'exploitation	9
3.3	Caractéristiques géométriques des zones d'exploitation [5][6].....	10
4.	Caractéristiques du projet d'extension [1]	12
5.	Problématique des tassements	14
5.1	Principes généraux [13][14][1]	14
5.2	Mécanismes des tassements	15
5.3	Tassements à grande échelle	15
5.3.1	Phases de tassements	15
5.3.2	Principes de modélisation	16
6.	Estimation des tassements du projet	19
6.1	Hypothèses considérées	19
6.2	Etude des tassements à grande échelle	20
7.	Prédimensionnement d'une géogrille	21
7.1	Données d'entrée	21
7.1.1	Rappel de la géométrie de l'ouvrage [1].....	21
7.1.2	Caractéristiques mécaniques [1]	22
7.2	Principes de dimensionnement	22
7.2.1	Principes généraux	22
7.2.2	Principes spécifiques	24
7.3	Étude des affaissements localisés et dimensionnement d'une géogrille	27
7.3.1	Données générales	27
7.3.2	Hypothèses d'entrée	28
7.3.3	Méthodologie de calcul	28
7.4	Justification de la capacité de lestage et de recouvrement	32
7.4.1	Prédimensionnement du lestage	32
7.4.2	Recouvrements longitudinal et latéral des lés de géogrilles.....	34
8.	Conclusion	35
9.	Incertitudes et limites de l'étude	37

TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques géométriques des zones d'exploitation (source : [5][6]).....	11
Tableau 2 : Données géométriques du projet de rehausse (source : [1])	12
Tableau 3 : Données d'entrée pour les calculs des tassements	19
Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques retenues	22
Tableau 5 : Résistance en traction et raideur pour le cas de figure étudié	30
Tableau 6 : Coefficients partiels sur les actions (ELU, sources : [9][13]).....	31
Tableau 7 : Coefficients partiels sur les propriétés de la géogrille (sources : [9][10][11]).....	31
Tableau 8 : Coefficients partiels pour le prédimensionnement du lestage (ELU, source : [9])	32
Tableau 9 : Dimensions de la zone de lestage et angles de frottement considérés	33
Tableau 10 : Recouvrements longitudinal et latéral des lés de géogrilles	34

Tableau 11 : Caractéristiques requises pour la géogrid	35
--	----

FIGURES

Figure 1 : Vue aérienne et emprise ICPE du site	5
Figure 2 : Zones d'exploitation (source : [6])	8
Figure 3 : Phasage d'exploitation des zones 1 et 2 et sondages (source : [5], sans échelle)	10
Figure 4 : Localisation des sondages effectués au droit des zones 1 et 2 (source : [5])	11
Figure 5 : Hauteurs de déchets + couverture sur l'emprise de la rehausse	13
Figure 6 : Évolution de la hauteur d'un casier rehaussé au cours du temps (source : [13])	16
Figure 7 : Modélisation de l'exploitation d'un casier selon le modèle ISPM (source : [1])	17
Figure 8 : Abaque de prédiction des tassements secondaires (source : [1])	18
Figure 9 : Coupe de principe de la BSP en fond	21
Figure 10 : Coupe de principe de la BSA	22
Figure 11 : Schéma de principe d'une extension en appui vertical et comparaison aux coupes de principe du projet de casier ISDND en rehausse (source : [1][13])	23
Figure 12 : Principes d'un renforcement par géogrid (sources : [9][15])	25
Figure 13 : Mise en action d'une géogrid lors d'un affaissement localisé (source : [13])	26
Figure 14 : Mécanisme de mobilisation des efforts d'ancrage (sources : [9][13])	26
Figure 15 : Schéma illustrant un renforcement par géogrid d'un affaissement localisé avec création d'une cavité cylindrique	27
Figure 16 : Décomposition des efforts résistants pour de faibles déformations en surface (source : [9])	33

ANNEXES

- Annexe 1. Dossier de plans
- Annexe 2. Fiche de calcul du prédimensionnement de la géogrid
- Annexe 3. Fiche de calculs de l'étude de tassement

1. Introduction

La Société Anonyme d'Économie Mixte Ardennaise d'Amélioration du Cadre de Vie (SAEM ARCAVI) a exploité à partir de 1976 la décharge contrôlée d'Éteignières (08). Plus récemment, la SAEM ARCAVI a été autorisée, par l'Arrêté Préfectoral (AP) n°4806 en date du 20/08/2008, et par ses Arrêtés complémentaires, à exploiter son Installation de Valorisation et d'Élimination des Déchets Ardennais (IVEDA) sur ce même site. L'IVEDA comprend notamment :

- Une Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) dont la capacité maximale autorisée est de 120 000 t/an (dont 10 000 t/an de stockage d'amiante ciment lié),
- Une Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) dont la capacité maximale autorisée est de 40 000 t/an,
- Une installation de transit et tri de déchets non dangereux,
- Des unités de traitement et de revalorisation du biogaz,
- Une unité de traitement des lixiviats (UTL),
- Une plate-forme de compostage et de conditionnement de bois énergie.

La figure suivante présente une vue aérienne du site ainsi que sa limite ICPE.

Figure 1 : Vue aérienne et emprise ICPE du site



Compte tenu des perspectives d'évolution des quantités de déchets réceptionnés, ARCAVI souhaite étendre les capacités de stockage de ses installations.

Dans ce cadre, ARCAVI a missionné GINGER BURGEAP pour réaliser la Demande d'Autorisation Environnementale (DAE) associée à cette optimisation de l'activité.

Le scénario d'aménagement retenu est le suivant :

- Stockages ISDND et amiante en rehausse des casiers existants sur l'emprise actuelle ;
- Stockage inerte (ISDI+) sur la zone d'extension à l'est.

A noter également, après des échanges avec l'administration, ARCAVI a décidé de :

- Réduire la capacité maximale autorisée pour l'ISDND à 90 000 t/an pour les cinq premières années (de 2026 à 2030), puis à 80 000 t/an (de 2031 à 2038), au lieu des 110 000 t/an actuellement autorisés ;
- Substituer l'aménagement des casiers de stockage de déchets inertes autorisés et non utilisés sur le site actuel vers la nouvelle parcelle d'extension à l'est, qui est une zone humide ;
- Aménager les futurs casier amiante à l'intérieur du site actuel afin d'éviter de les placer dans la nouvelle parcelle.

Cette étude constitue l'étude de tassements du projet d'extension de l'ISDND en rehausse sur les zones exploitées précédemment, à annexer à l'APS de la DAE. Un prédimensionnement de géogridde est également intégré à cette étude.

2. Sources

Les documents suivants ont été pris en compte pour réaliser cette étude.

► Précédentes études du site

- [1] Etudes d'avant-projet sommaire (APS) – Commune d'ETEIGNIERES (GINGER BURGEAP 1102348-01 13/09/2024)
- [2] Étude de stabilité de la DAE « Étude de stabilité » (GINGER BURGEAP, 1048350-02, 24/04/2024)
- [3] Rapport d'activité de l'année 2021 (ARCAVI, version 3, 09/06/2022)
- [4] Étude de faisabilité technique et financière du déstockage des massifs de déchets anciens de l'Installation de Valorisation et d'Élimination des Déchets Ardennais à Éteignières - Phases 2, 3 et 4 (INDDIGO, septembre 2016)
- [5] Étude de faisabilité technique et financière du déstockage des massifs de déchets anciens de l'Installation de Valorisation et d'Élimination des Déchets Ardennais à Éteignières - Réunion de présentation des résultats de la phase 1 (INDDIGO, 22/03/2016)
- [6] Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter (DDAE) global d'une Installation de Valorisation des Déchets Ardennais (IVDA) à Éteignières (08) - Pièce 5 : Présentation technique du projet (ANTEA, A 44495 / version A, mars 2007)

► Plans

- [7] Plan .dwg Topo-Maj170408 (pas de références)
- [8] Plan .dwg 6996f7 (plan topographique du site) (Régis DUMAY, D 69/93-04, décembre 1995)

► Normes

- [9] Norme XP G38-065 : Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés - Renforcement de la base des remblais sur zones à risques d'effondrement - Justification du dimensionnement et éléments de conception (AFNOR, septembre 2020)
- [10] Norme NF G38-067 : Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception (AFNOR, mai 2017)
- [11] Norme NF G38-064 : Utilisation des géotextiles et produits apparentés - Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques - Justification du dimensionnement et éléments de conception (AFNOR, mai 2016)
- [12] NF EN 1997-1 : Eurocode 7 - Calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales (AFNOR, juin 2005)

► Autres

- [13] Guide de recommandations pour la conception des extensions d'ISDND en appui sur des casiers anciens (BRGM, BRGM/RP-69455-FR, mars 2020)
- [14] Guide de recommandations pour la conception des couvertures d'Installations de Stockage de Déchets Dangereux, Non Dangereux et Inertes (BRGM, BRGM/RP-69462-FR, mars 2020)
- [15] Dimensionnement à court terme et à long terme de structure renforcée par géosynthétique sur cavités potentielles : prise en compte de la sécurité (Recontres géosynthétiques CFG, mars 2015)
- [16] Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II (Déchets ménagers et assimilés) (ADEME, 2005)

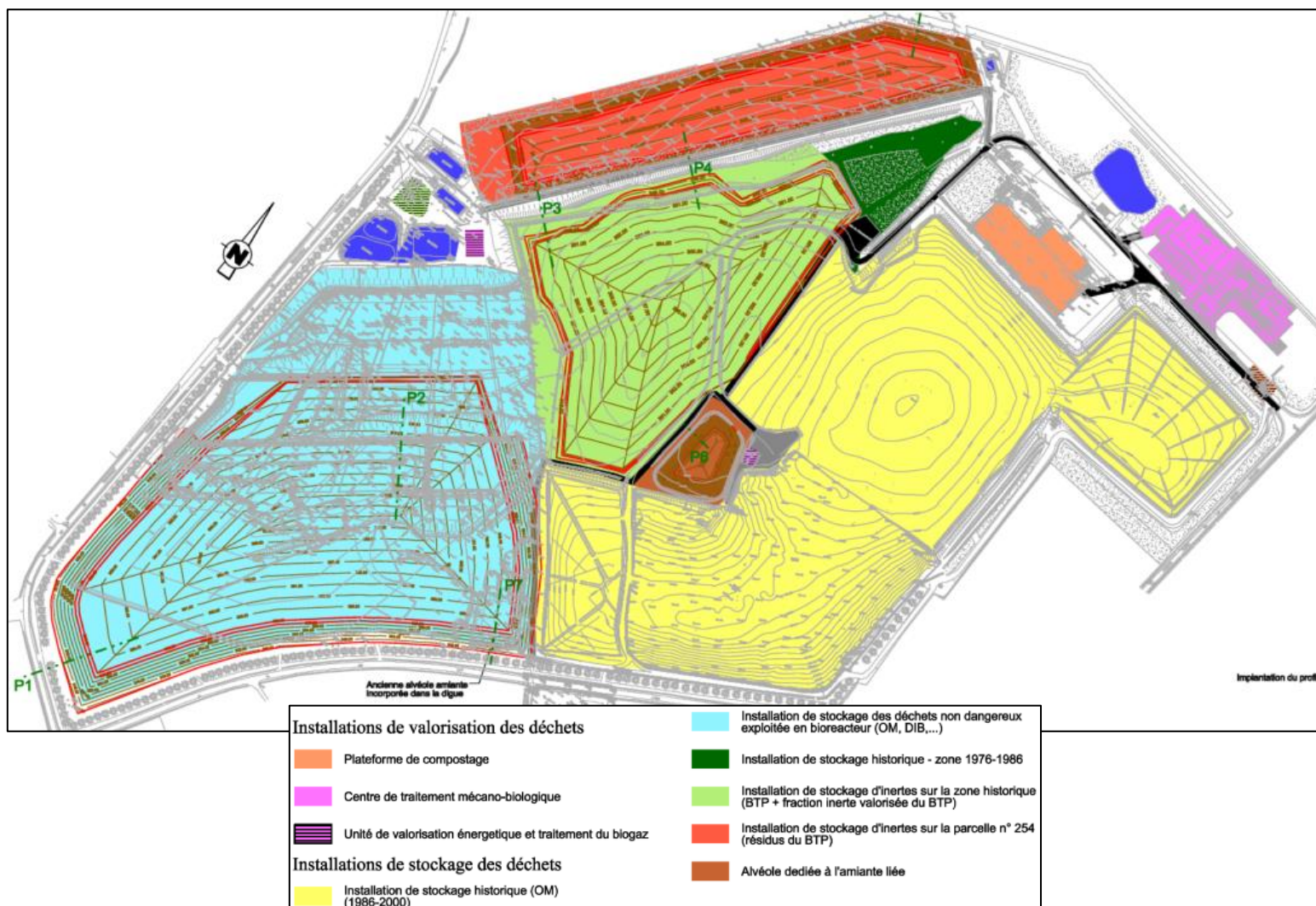
3. Historique d'exploitation

3.1 Zonage d'exploitation [3][4][5][6]

Le site d'Éteignières a globalement été exploité en 3 zones successives, selon le phasage suivant :

- Zone n°1 exploitée entre 1976 et 1986 (ou 1988 selon les sources), réhabilitée courant 2000, et sur laquelle un réseau de pompage des lixiviats a été installé lors des travaux de réhabilitation. Un stockage de déchets inertes a été effectué ultérieurement au droit de la majorité de la zone n°1, sur les déchets non dangereux plus anciens. Un casier de stockage de déchets de plâtre a également été aménagé depuis sur la pointe Nord de la zone 1,
- Zone n°2 exploitée entre 1986 (ou 1988 selon les sources) et 2000, entièrement réhabilitée (couverture en limons argileux, réseau de captage du biogaz, réseau de captage des lixiviats) et engazonnée. Conformément à l'AP du 23/07/1998, une partie de cette zone a été surélevée à partir du 2^{ème} semestre 1998 et fermée en envoyant de nouveaux apports de déchets sur cette zone (création d'un dôme) jusqu'en mai 1999. Les casiers de stockage de déchets d'amiante 3 et 4 ont depuis été aménagés sur la frange Sud de la zone 2,
- Zone n°3 exploitée depuis 2001 (alvéoles 1 à 16, 18 à 20, 23 et 24). Pour mémoire, les alvéoles 5 à 8 ont déjà été rehaussée en partie comme autorisé par l'AP n°4806 du 20/08/2008. Sur cette zone, les casiers sont exploités en mode bioréacteur. L'estimation de la capacité de stockage de déchets du site selon le mode d'exploitation actuel conduit à une fin d'exploitation prévisionnelle à échéance 2025.

Figure 2 : Zones d'exploitation (source : [6])



3.2 Description générale des zones d'exploitation

Pour mémoire, l'emprise d'extension en rehausse de l'ISDND est située :

- Zone n°1 : hors casier de stockage de déchets de plâtre aménagés postérieurement à l'exploitation de la zone 1,
- Zone n°2 : hors casiers de stockage de déchets d'amiante aménagés postérieurement à l'exploitation de la zone 2,
- Hors emprise des casiers de stockage de déchets d'amiante 1 et 2 situés entre les zones 1 et 2.

Les zones ou parties de zones non concernées par le projet de rehausse ne sont pas traitées dans la suite de ce rapport (notamment la zone n°3).

► Zone n°1 [4]

Extrait du document [4] : « Il n'y a pas de séparations en casiers ou cellules pour la zone 1. L'exploitation s'est faite globalement du Nord vers le Sud par alvéoles successives, séparées par des diguettes de hauteur limitée (1 à 2 m). Lors des rehausses (2 mètres en moyenne), ces diguettes étaient également rehaussées. Toutefois, l'indépendance hydraulique entre les alvéoles n'est pas assurée : continuité verticale des séparations, étanchéité. Dans ce cas, on considère comme un seul massif de déchets cette zone 1.

La zone 1 est pas (extrémité Nord) ou peu surcreusée (1-2 mètres maximum).

La zone 1 et la zone 2 sont séparées entre elles par une digue en matériaux du site peu perméables. On peut considérer qu'elles sont indépendantes hydrauliquement ».

La nature exacte des déchets stockés dans la zone 1 n'est pas connue. Il est supposé qu'une majorité d'ordures ménagères est présente dans la zone 1, qui a été recouverte ultérieurement par des déchets inertes (Cf. Figure 3).

► Zone n°2 [4][5][6]

Extrait du document [4] : « Concernant la zone 2, les cellules sont séparées par des digues de 5 à 7 mètres de hauteur, en matériaux limoneux du site. On distingue 3 zones d'exploitation successives :

- 2-1 : Zone centrale – ancienne zone OTAN,
- 2-2 : Zone carrée en face de l'actuel pont-bascule,
- 2-3 : Zone Sud proche de la route.

La numérotation des cellules à l'intérieur de chacune de ces 3 zones suit l'avancement de l'exploitation (Cf. Figure 3, hormis la cellule 14 pour la zone 2-1 qui a été exploitée en dernier).

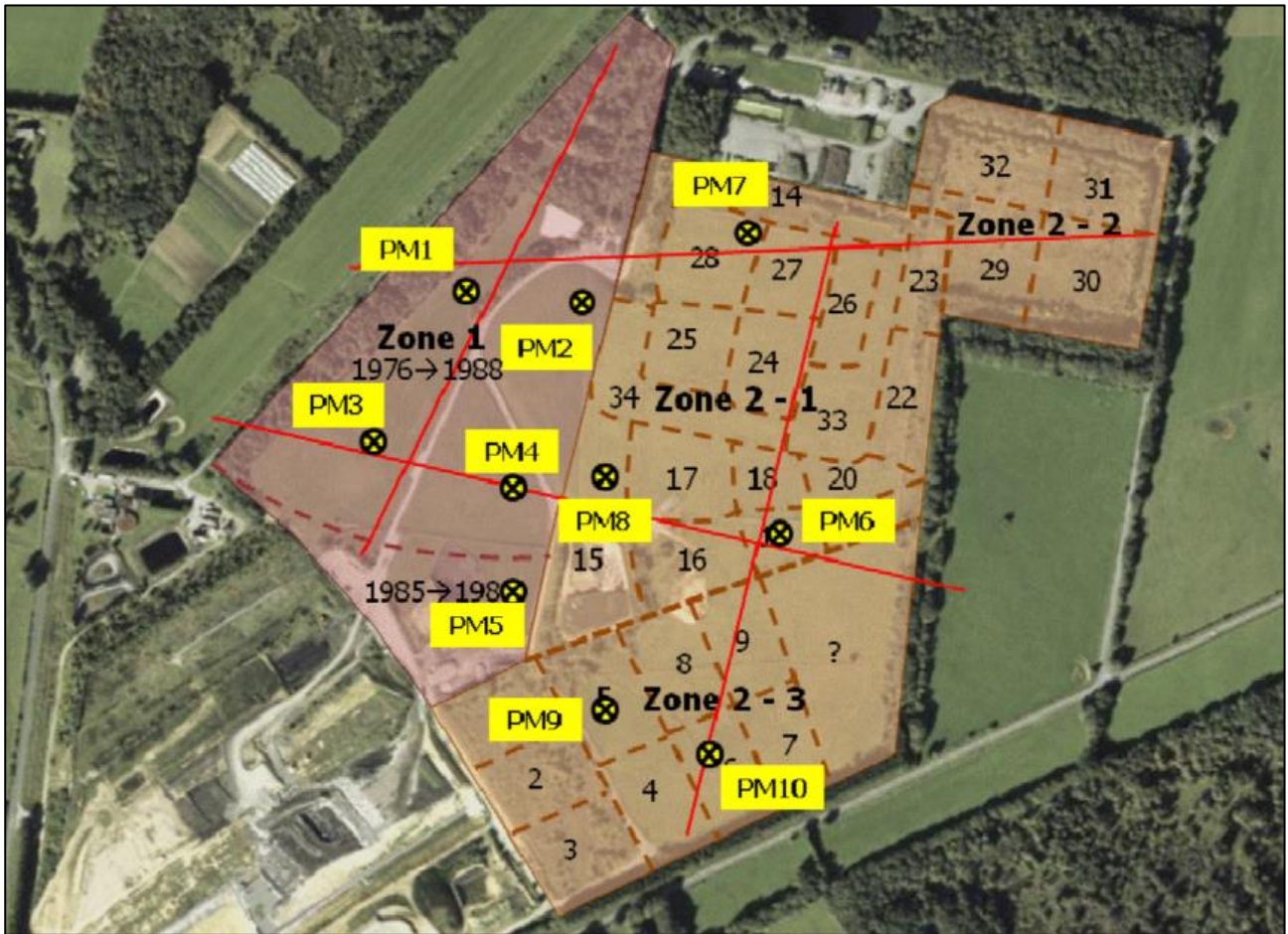
Il n'y a pas de forme de base pour la zone 2-1 (cellules 14 à 28, 33 et 34), les cellules pouvant être carrées, rectangulaires, triangulaires, plus ou moins allongées selon la place disponible. Les cellules 14 (renforcement du talus Nord de cette zone 2-3), 33 et 34 (comblement de la piste d'exploitation) sont particulièrement allongées et ont des surfaces au sol limitées. Par la suite (zone 2-2 puis zone 2-3), les cellules sont globalement rectangulaires et de surfaces constantes. [...]

La zone 2 est peu surcreusée (3-4 mètres maximum) ».

D'après le document [6], une géomembrane assure l'étanchéité de fond des cellules.

La nature exacte des déchets stockés dans la zone 2 n'est pas connue. Comme pour la zone 1, il est supposé qu'une majorité d'ordures ménagères est présente dans la zone 2. Au regard des épaisseurs de couverture mises en évidence dans le document [5], cette zone a également été recouverte postérieurement à son exploitation par des déchets inertes afin de modeler les pentes de couverture.

Figure 3 : Phasage d'exploitation des zones 1 et 2 et sondages (source : [5], sans échelle)



3.3 Caractéristiques géométriques des zones d'exploitation [5][6]

Afin d'évaluer les caractéristiques géométriques des zones 1 et 2, nous avons replacé manuellement sur les plans du projet les sondages réalisés dans le cadre de l'étude [5] (Cf. Figure 4). Des sondages profonds à la tarière ainsi que des sondages à la pelle mécanique, ont été réalisés les 14 et 15/12/2015. En l'absence d'information dans le document [5], il a été considéré que les sondages à la tarière étaient voisins des sondages à la pelle. Les données des sondages PM10/S10, trop éloignés de la zone d'étude, n'ont pas été prises en compte.

Le Tableau 1 synthétise les principales caractéristiques géométriques des zones d'exploitation passées, concernées par le projet de rehausse et utiles à l'étude.

Figure 4 : Localisation des sondages effectués au droit des zones 1 et 2 (source : [5])



Les hauteurs de déblais/remblais correspondent au reprofilage qui sera réalisé préalablement à l'aménagement des sous-casiers en rehausse

Tableau 1 : Principales caractéristiques géométriques des zones d'exploitation (source : [5][6])

Paramètre	Zone n°1 (PM1/S1 à PM5/S5)	Zone n°2 (PM6/S6 à PM9/S9)
Épaisseur min. de couverture (m)	2.2	1.4
Épaisseur moy. de couverture (m)	3.8	1.9
Épaisseur max. de couverture (m)	5.0	2.3
Épaisseur min. de déchets (m)	3.0	5.0
Épaisseur moy. de déchets (m)	4.9	6.5
Épaisseur max. de déchets (m)	6.0	8.0

4. Caractéristiques du projet d'extension [1]

Le casier en rehausse sera aménagé et exploité en suivant la numérotation des sous-casiers, soit en 25 phases.

L'exploitation des sous-casiers sera réalisée en commençant au-dessus des zones les plus anciennes qui seront les moins sensibles au tassement et au dégazage.

Les surfaces des sous-casiers seront comprises entre 2 520 et 5 890 m² en fond. Les volumes utiles de stockage seront eux compris entre 22 950 et 80 750 m³.

Le volume total de stockage sera de 1 114 800 m³, soit environ 1 059 060 tonnes (densité de 0,95).

Le rythme d'exploitation va baisser à 90 000 t/an pour les cinq premières années (de 2026 à 2030), puis à 80 000 t/an (de 2031 à 2038), au lieu des 110 000 t/an actuellement autorisés.

Les sous-casiers seront exploités successivement, chaque sous-casier ayant une durée d'exploitation inférieure à 1 an.

La hauteur maximale de déchets sera comprise environ entre 7 et 17 m selon les sous-casiers.

Le Tableau 2 synthétise les données géométriques du projet d'extension en rehausse utiles à l'étude, et détaillées par zone. La *sur la base de la valeur d'épaisseur maximale de déchets par alvéole

Figure 5 illustre les hauteurs cumulées de déchets et de couverture sur les zones 1 et 2.

Tableau 2 : Données géométriques du projet de rehausse (source : [1])

Paramètre	Zone n°1	Zone n°2
Épaisseur de couverture (m)	0.8	0.8
Épaisseur min. de déchets (m)*	10.88	7.58
Épaisseur moy. de déchets (m)*	13.59	9.84
Épaisseur max. de déchets (m)	17.01	16.26

*sur la base de la valeur d'épaisseur maximale de déchets par alvéole

Figure 5 : Hauteurs de déchets + couverture sur l'emprise de la rehausse



Cette figure est disponible en grand format en Annexe 1.

5. Problématique des tassements

5.1 Principes généraux [13][14][16]

Le guide de l'ADEME [16] fait référence dans le domaine des études de tassements de casiers de stockage de déchets. Les guides techniques plus récents, tels que ceux relatifs à la conception d'ISDND en rehausse [13] et à la conception de couvertures d'ISD [14], s'appuient sur ce guide pour les sujets en lien avec les tassements d'un massif de déchets.

Les extensions d'ISDND en appui sur des casiers existants peuvent être classées selon 3 catégories : extension verticale, latérale et mixte. Dans notre cas, **le projet correspond à une extension verticale**, en appui essentiellement sur le sommet de casiers existants.

Les principales problématiques rencontrées sur ce type d'extension sont liées à l'intégrité des dispositifs d'étanchéité et de drainage du nouveau casier vis-à-vis des tassements différentiels des déchets anciens, le drainage des lixiviats et du biogaz de ces déchets, et la stabilité globale du massif de déchets ainsi rehaussé.

Une connaissance précise et exhaustive du massif de déchets support est essentielle pour l'évaluation de la cinétique, de l'amplitude et de la répartition des tassements sous la future extension, ainsi que pour la conception du nouveau casier et la vérification de la stabilité mécanique du massif rehaussé.

Les tassements que subissent les massifs de déchets sont essentiellement de 2 natures, l'une liée aux charges appliquées et l'autre à leur caractère évolutif.

Les massifs de déchets non dangereux sont généralement un conglomérat de différents types de matières de sol mélangés entre eux sous l'action d'un compactage. Les déchets constituant un massif peuvent être classés d'un point de vue purement mécanique (sol et non sol), d'un point de vue biologique (en fonction de leur vitesse de dégradation) ou encore en fonction de leur caractère déformable (méthode de classement qui combine les angles mécanique et biologique).

D'après cette dernière approche, les constituants d'un déchet peuvent être classés en 3 catégories (Grisolia et al., 1995) :

- **Éléments "inertes"** : matériaux ne voyant pas leur composition varier au cours du temps et dont la résistance à la déformation est élevée. Cette catégorie inclut les particules de sol mais aussi les gravats, le verre, les céramiques, les métaux, les plastiques durs et le bois,
- **Éléments déformables** : papiers, plastiques en feuilles, textiles, caoutchouc, canettes et boîtes de conserve alimentaire, etc. Lorsqu'ils sont soumis à un chargement, ces matériaux tendent à se tasser instantanément du fait des vides importants caractérisant leur arrangement initial. De plus, certains d'entre eux continuent à se déformer dans le temps sous charge constante,
- **Éléments dégradables** : cette classe d'éléments encore appelés "putrescibles" regroupe les matériaux évoluant rapidement en terme de composition et de consistance. C'est notamment le cas des déchets alimentaires et des végétaux. La dégradation de ces substances induit des changements profonds dans la structure du matériau et s'accompagne d'une réduction du volume total occupé.

Cette classe ne rend cependant pas compte des changements d'état (et donc de caractéristiques) s'opérant en fonction de l'évolution des contraintes et du temps (bois qui passe d'un état "inerte" à un état compressible au cours de sa dégradation). De manière générale, les éléments subissant une dégradation physique ou biochimique voient leur comportement mécanique évoluer jusqu'au stade ultime de constituants inertes dont le comportement équivaut à celui d'un sol. Cette dégradation s'accompagne d'une réduction de la taille des éléments constitutifs

5.2 Mécanismes des tassements

Les actions à l'origine des tassements peuvent être subdivisée schématiquement en 5 catégories :

- **Mécanique**, en lien avec les surcharges appliquées. Ces phénomènes peuvent se prolonger à surcharge constante sur de longues périodes,
- **Biochimique**, en lien avec la décomposition de la matière organique. Cette perte de masse solide se traduit par une désagrégation partielle de la structure particulaire, phénomène qui s'accompagne d'un tassement à moyen et long terme,
- **Physico-chimique**, en lien avec les actions de corrosion, d'oxydation et de combustion. Les transformations physico-chimiques représentent un processus très long et encore méconnu, et sont généralement marginale par rapport à la dégradation biochimique,
- **Tamissage et percolation**, en lien avec la diminution de la taille caractéristique des constituants du déchet. Ce phénomène est continu à l'échelle d'un casier et peut être accéléré par des vibrations ou des circulations l'eau,
- **Interactions** : les différentes actions listées précédemment interfèrent entre elles, ce qui accentue les phénomènes de tassements.

Ces actions se superposent ainsi de manière complexe au cours du temps. Leur association peut néanmoins être représentée à partir de **2 mécanismes de tassements distincts** :

- Le **tassement primaire** à court terme, résultant essentiellement des actions mécaniques. Cette composante de courte durée (quelques jours) est généralement supposée indépendante du temps,
- Le **tassement secondaire** à long terme, résultant essentiellement des actions biochimiques et physico-chimiques, supposé indépendant de la charge et pouvant se produire pendant plusieurs décennies. Ce mécanisme est celui qui a le plus d'incidence sur les performances d'une couverture de casier au cours du temps.

Pour préserver la stabilité et l'efficacité des éléments fonctionnels des anciens casiers, il est ainsi important d'anticiper, en fonction de la répartition spatiale, de la hauteur et de l'âge des déchets, l'amplitude des tassements attendus à grande échelle.

Bien que constitués en majorité d'une matrice fine de comportement mécanique modérément variable spatialement (à âge et niveau de compression donné), les déchets non dangereux peuvent présenter localement une certaine hétérogénéité résultant de la présence potentielle de gros éléments (matelas, ferraille, etc.) ou au contraire d'éléments fortement dégradables, qui peuvent faire l'effet de points plus ou moins durs ou mous au sein de la structure du matériau.

Aussi, en complément de l'étude des tassements à grande échelle, il convient, afin d'anticiper avec la plus grande prudence les déformations maximales qui peuvent se produire au sein d'un massif de déchets, de prendre en compte parallèlement le risque de survenue d'affaissements localisés à petite échelle et de tassements différentiels structurels.

5.3 Tassements à grande échelle

5.3.1 Phases de tassements

La Figure 6 illustre l'évolution de la hauteur d'un casier sous l'action des mécanismes de tassements à grande échelle, en fonction de son état d'exploitation :

- Pendant la phase d'exploitation (ou remplissage) du casier, les couches sont soumises à une surcharge croissante,
- En phase de post-exploitation, les surcharges appliquées sur chacune des couches de déchets sont considérées constantes. Les tassements de fluage et la dégradation du déchet se poursuivent,

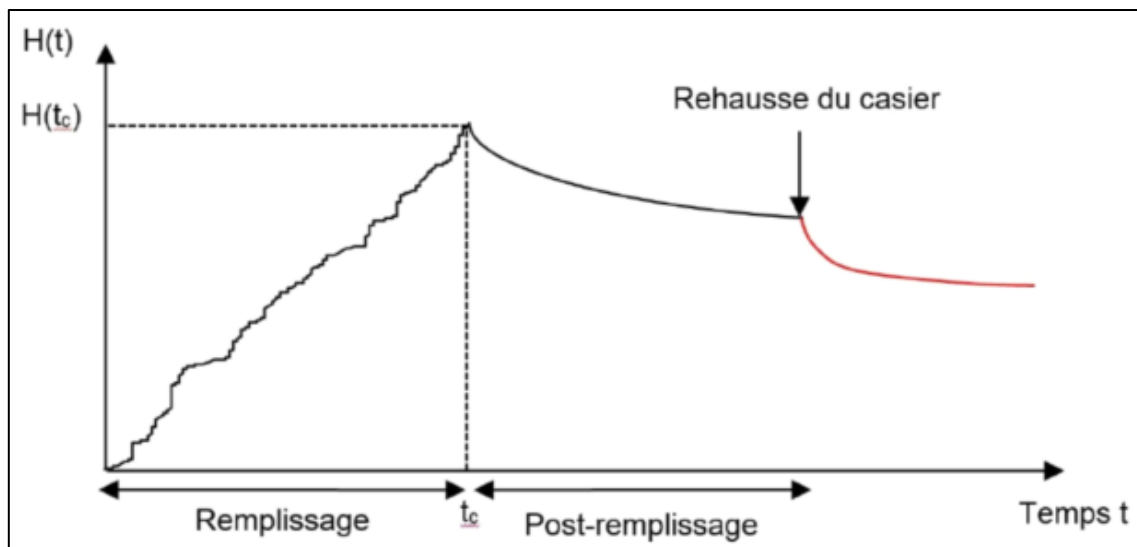
- Lors d'une extension verticale, une phase de rechargement a lieu, entraînant une **reprise accélérée des tassements (de nature essentiellement mécanique)**.

Des tassements globaux équivalents à 5 à 30 % de la hauteur initiale des déchets peuvent apparaître suite à la dégradation des déchets et aux autres phénomènes associés selon le guide [16]. Ils peuvent représenter des hauteurs cumulées de plusieurs mètres après 30 ans.

La répartition entre les tassements primaires et secondaires reste à ce jour spécifique à chaque site en fonction de ses caractéristiques (type et hauteur de déchets, taux de compactage, etc.). Le guide [16] avance les valeurs suivantes :

- Tassements primaires : 5 à 20 % de la hauteur initiale de déchets pour des surcharges équivalentes au poids de colonnes de déchets de 5 à 40 m,
- Tassements secondaires : 8 à 30 % de la hauteur de déchets sur une période de 30 ans (pour une moyenne de 15 à 20 %).

Figure 6 : Évolution de la hauteur d'un casier rehaussé au cours du temps (source : [13])



5.3.2 Principes de modélisation

Le type de modèle privilégié dans le guide [16] et repris dans le guide [13] pour modéliser les tassements est un modèle tiré de la mécanique des sols nommé ISPM¹.

Ce modèle représente le massif de déchets comme un empilement de couches élémentaires (Cf. Figure 7). Son application présente, vis-à-vis des autres modèles, des avantages tant fondamentaux (détermination de coefficients de compression intrinsèques au déchet) que pratiques (fiabilité accrue des prédictions). Les données d'entrée de ce modèle reposent essentiellement sur :

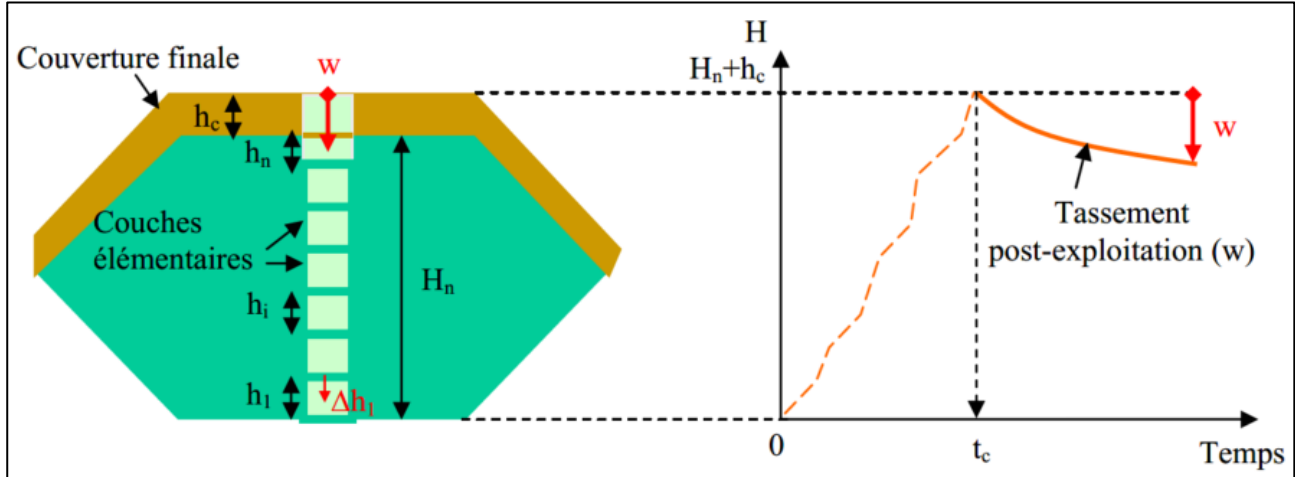
- La géométrie du massif de déchets,
- La surcharge,
- Le phasage d'exploitation,
- Les coefficients de compression primaire (C^*_R) et secondaire (C^*_{aE}).

Tel que décrit précédemment, le tassement d'une couche de déchets est représenté suivant une composante primaire à court terme et secondaire à long terme.

¹ Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements

Dans notre cas, les casiers des zones 1 et 2 étant en phase de post-exploitation au moment de l'extension verticale (pas de tassements primaires), nous nous intéressons uniquement par la suite aux tassements secondaires, les tassement primaires ayant déjà eu lieu.

Figure 7 : Modélisation de l'exploitation d'un casier selon le modèle ISPM (source : [16])



Pour évaluer les tassements secondaires, l'application du modèle ISPM repose en premier lieu sur la détermination du coefficient de compression secondaire, $C_{\alpha\epsilon}^*$, qui peut être effectuée suivant l'une des 2 approches suivantes :

- Par analyse directe : sur la base de coefficients de compression pré-calibrés ou supposés. Cette approche est la seule valable dans le cas d'ISD en cours d'exploitation,
- Par analyse inverse : après calibration de $C_{\alpha\epsilon}^*$ à partir d'une campagne topographique d'une année à quelques années.

Dans notre cas, c'est l'analyse directe qui a été retenue.

Le guide [16] contient également des abaques de prédiction de tassements secondaires (Cf. Figure 8). La valeur ordonnée de la Figure 8 représente le tassement relatif de la colonne de déchets en %. La valeur abscisse représente un facteur temps adimensionnel (t (nombre d'années depuis la mise en place de la couverture) / t_c (temps de construction de la colonne de déchets)).

Le paramètre nh_0 représente la hauteur virtuelle de la colonne de déchets en l'absence de tout tassement.

En l'absence de considération des tassements primaires, on estime les tassements secondaires, supposés indépendants de la charge et fonction uniquement du temps, avec la formule suivante :

$$\frac{\Delta h_i^s}{h_0} = C_{\alpha\epsilon}^* \cdot \log \frac{\tau}{\tau_i}$$

Avec :

Δh_i^s : composante secondaire du tassement (réduction d'épaisseur par rapport à l'épaisseur initiale de la colonne de déchets au cours de la phase dite de « post-exploitation »)

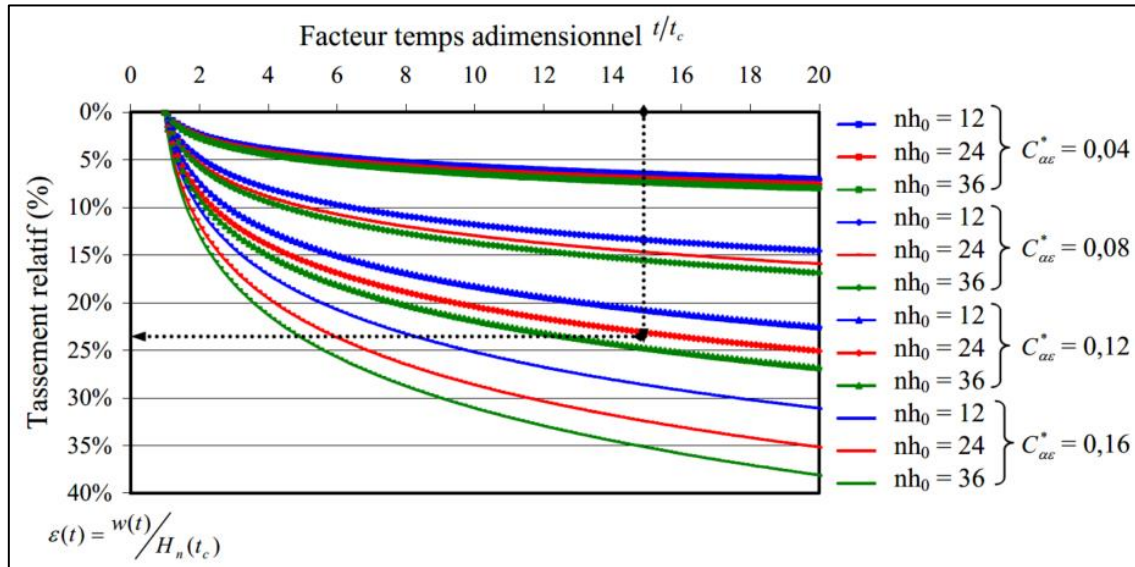
h_0 : épaisseur initiale de la colonne de déchets

$C_{\alpha\epsilon}^*$: coefficient de compression secondaire 'intrinsèque' du déchet

τ_i : temps de construction de la couche i

τ : temps depuis le début de la construction de la couche i

Figure 8 : Abaque de prédiction des tassements secondaires (source : [16])



Enfin, s'agissant d'un projet en extension verticale, il conviendra d'estimer **les tassements primaires complémentaires liés à la surcharge** générée par les nouveaux déchets qui seront stockés au droit du projet. Celle-ci est calculée selon un modèle basé sur l'utilisation d'un module de déformation et selon l'équation classique suivante :

$$(E_r)_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} = \frac{\Delta \sigma_i \cdot h_{oi}}{\Delta h_i}$$

Avec :

$(E_r)_i$: module de déformation élastique des déchets

$\Delta \sigma_i$: augmentation de contrainte au niveau de la couche i

Δh_i : tassement

h_{oi} : épaisseur de la couche considérée

6. Estimation des tassements du projet

6.1 Hypothèses considérées

Les données d'entrée que nous avons considérées pour le calcul sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Données d'entrée pour les calculs des tassements

Paramètre	Unité	Valeur (profil A, OM-OM Zone 1)	Valeur (profil B OM-OM Zone 2)
Casiers anciens ISDND			
Hauteur de déchets	m	6	8
Type de déchets	-	Moyennement fermentescibles	Moyennement fermentescibles
Durée d'exploitation t_c	ans	10 (1976-1986)	14 (1986-2000)
Coefficient de compression secondaire $C_{\alpha\epsilon}^*$	-	0,12	0,12
Date de fermeture	-	1986	2000
Durée de stabilisation t_r	ans	30	30
Surcharge casiers rehausse ISDND			
Hauteur de déchets	m	17.01	16.26
Densité des déchets	t/m ³	1.02	
Épaisseur de couverture (terre végétale + couche de reprofilage)	m	1 (= 0.8 + 0.2)	
Densité des matériaux de couverture	t/m ³	1.74	
Matériaux drainants	m	0.3	
Densité des matériaux drainants	t/m ³	1.63	
Module d'élasticité des déchets	kPa	1 500	

Dans le cadre du présent projet, nous avons retenu 2 profils (A et B) présentant la configuration la plus pénalisante en terme de hauteur de déchets sur les deux zones des anciens casiers où sont prévus la rehausse comme sur le volet stabilité du projet. Le profil A est réalisé pour la zone 1 et le profil B est réalisé pour la zone 2 des anciens casiers.

Remarque : Le calcul de la déformation engendrée par les tassements différentiels n'est pas abordé dans ce calcul (données géométriques insuffisantes). Les tassements différentiels impliquent une distorsion plus ou moins importante de la géomembrane en l'absence d'un dispositif de reprise des efforts tel qu'une géogridde.

6.2 Etude des tassements à grande échelle

En prenant en compte les hypothèses citées précédemment, et au droit des zones indiquées, nous avons incrémenté le modèle prédictif des tassements.

Les résultats de la modélisation sont présentés en **annexe 3**.

Les tassements secondaires liés à la rehausse ont été calculés selon la méthode ISPM préconisée par l'ADEME, en considérant notamment un coefficient de compression secondaire des déchets $C^*_{\alpha\epsilon}$ de 0,12, caractéristique de déchets fermentescibles. Le calcul montre que les zones 1 et 2 OM-OM semblent relativement stables vis à vis des tassements des massifs de déchets, les tassements secondaires ayant été en majorité effectués (au droit des casiers les plus récents en zone 2, le tassement secondaire maximal restant représenterait 0,42 m environ).

Le calcul des tassements primaires finaux des déchets sous-jacents a été effectué au bout d'une période de 30 ans après l'exploitation des casiers OM-OM concerné, période au terme de laquelle on considère que les tassements n'évoluent plus significativement.

Le tassement final a été obtenu en sommant le tassement secondaire résiduel au tassement primaire lié à la surcharge complémentaire générée par l'exploitation en rehausse (comprenant la hauteur de déchets stockés, affectée d'un module de déformation de 1 500 kPa caractéristique de déchets ménagers moyennement raides, ainsi que l'épaisseur de la couverture finale).

Il en résulte que le tassement grande échelle futur total obtenu au bout de 30 ans après la fin de l'exploitation sera au maximum de 1.02 m, tous profils confondus, les valeurs obtenues étant de 0,77 m (profil A) et 1.02 m (profil B).

Dans la configuration de la mise en œuvre d'une couche de perméabilité réduite (dans le cas présent, une couche d'argile de 0,5 mètre d'épaisseur au minimum et de perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s surmontée d'un géosynthétique bentonitique de 6 mm d'épaisseur) à cette même interface, ce tassement compris entre 0,77 et 1.02 m pourrait déstructurer les matériaux, et créer une importante perméabilité liée à la fissuration.

La mise en œuvre d'une géogridde au droit de l'emprise de la zone de rehausse concernée par les tassements différentiels permettrait de reprendre les efforts induits et garantir la pérennité d'une couche de perméabilité réduite. La suite de ce document s'attache ainsi à réaliser un premier dimensionnement de la géogridde.

7. Prédimensionnement d'une géogridde

7.1 Données d'entrée

7.1.1 Rappel de la géométrie de l'ouvrage [1]

Afin de limiter les tassements différentiels et préserver l'intégrité des BSP et BSA des nouveaux casiers ISDND est prévu la mise en place d'une couche de transition et de renforcement au-dessus des anciens casiers, constituée de :

- 0,25 m de couche de forme ;
- une géogridde de renforcement ;
- 0,25 m de couche de finition.

Surmontant cette couche, la BSP et la BSA prévue sur les nouveaux casiers ISDND en rehausse est rappelée sur la Figure 9 et la Figure 10.

Figure 9 : Coupe de principe de la BSP en fond

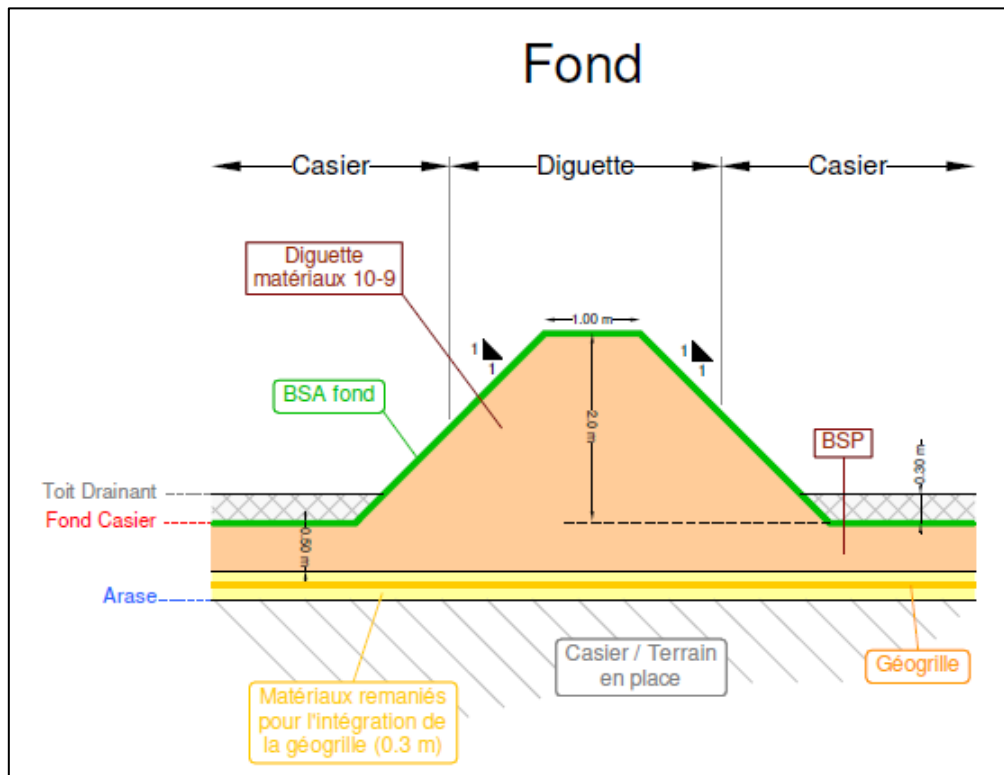


Figure 10 : Coupe de principe de la BSA



7.1.2 Caractéristiques mécaniques [1]

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques mécaniques retenue dans l'étude [1].

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques retenues

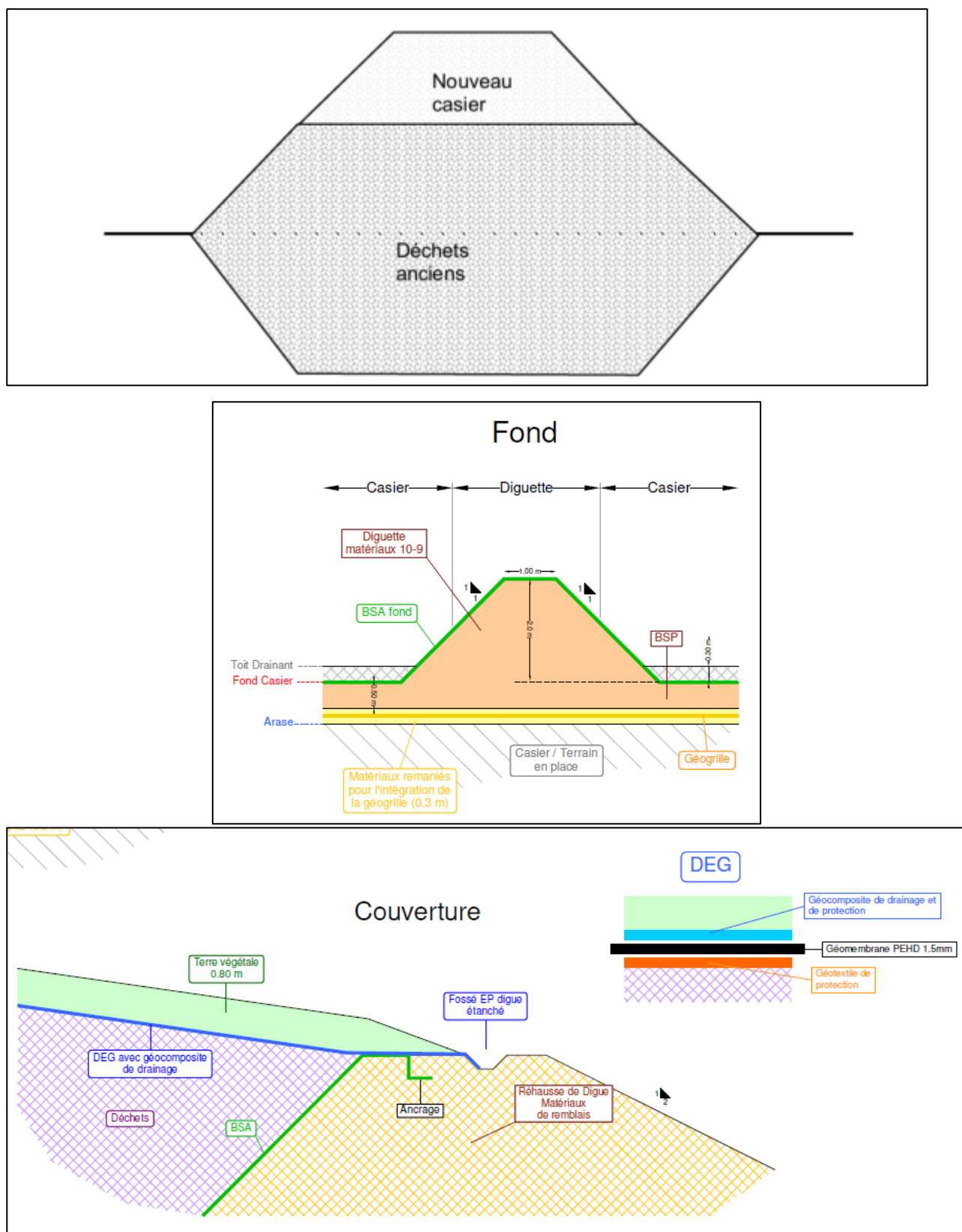
Faciès	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	Source	Commentaire
Déchets non dangereux	10	5	23	DDAE 2007 ANTEA	
BSP future	17	2	26	DDAE 2007 ANTEA	
Matériaux drainants	16	0	35	Bibliographie	Valeurs moyennes
Interface géogridde/couche de forme	-	-	30	Bibliographie	-

7.2 Principes de dimensionnement

7.2.1 Principes généraux

D'après le guide [13], le projet de digue périphérique peut être assimilé à un projet d'extension verticale d'un nouveau casier, en appui sur un casier ancien, comme illustré sur la figure suivante.

Figure 11 : Schéma de principe d'une extension en appui vertical et comparaison aux coupes de principe du projet de casier ISDND en rehausse (source : [1][13])



Bien que constitués en majorité d'une matrice fine de comportement mécanique modérément variable spatialement (à âge et niveau de compression donné), les déchets non dangereux présentent une certaine hétérogénéité résultant de la présence potentielle de gros éléments, ou au contraire d'éléments fortement dégradables, qui peuvent faire l'effet de points plus ou moins durs ou mous au sein de la structure du matériau.

Contrairement aux tassements à grande échelle, aucun modèle fiable n'est en mesure d'évaluer précisément les affaissements localisés pouvant avoir lieu dans les déchets. Cette détermination est faite de manière empirique, sur la base des retours d'expérience d'autres sites.

Une solution de renforcement par géogridde, positionnée à la base du futur casier, permettrait de limiter les conséquences d'un affaissement localisé. En effet, seul un dispositif de renforcement de type géogridde permet de se prémunir des conséquences d'un affaissement localisé dans un massif de déchets sur les structures à préserver (DEG de couverture de casiers notamment).

Le principe de renforcement par géogridde repose notamment sur les frottements à l'interface entre la nappe de renforcement et les couches de matériaux naturels qui l'encadrent. Dans notre cas, d'extension verticale (casier ou remblais en appui vertical sur un casier ancien), la nappe de renforcement doit être disposée au sein d'une couche de forme ou à la base de celle-ci pour un fonctionnement optimal. (voir Figure 15).

7.2.2 Principes spécifiques

Le programme collaboratif de recherche RAFAEL (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés) a notamment proposé une méthode de dimensionnement simplifiée, qui a permis l'émergence de solutions géosynthétiques dans les zones présentant des risques d'effondrement localisés.

Cette méthode a depuis fait l'objet de diverses améliorations et invalidations : dans le cas des affaissements localisés, la solution de confortement par géosynthétiques a fait l'objet de nombreuses recherches récentes tant sur le plan expérimental que théorique.

On peut notamment citer en France les travaux de Briançon L. et Villard P. (2006), de Villard P., Huckert A. and Briançon L. (2016), de Pham M.T., Briançon L., Dias D., Abdelouhab A. (2018) et de Hassoun M. (2019). Ces évolutions ont été prises en compte dans la norme XP G38-065 [9].

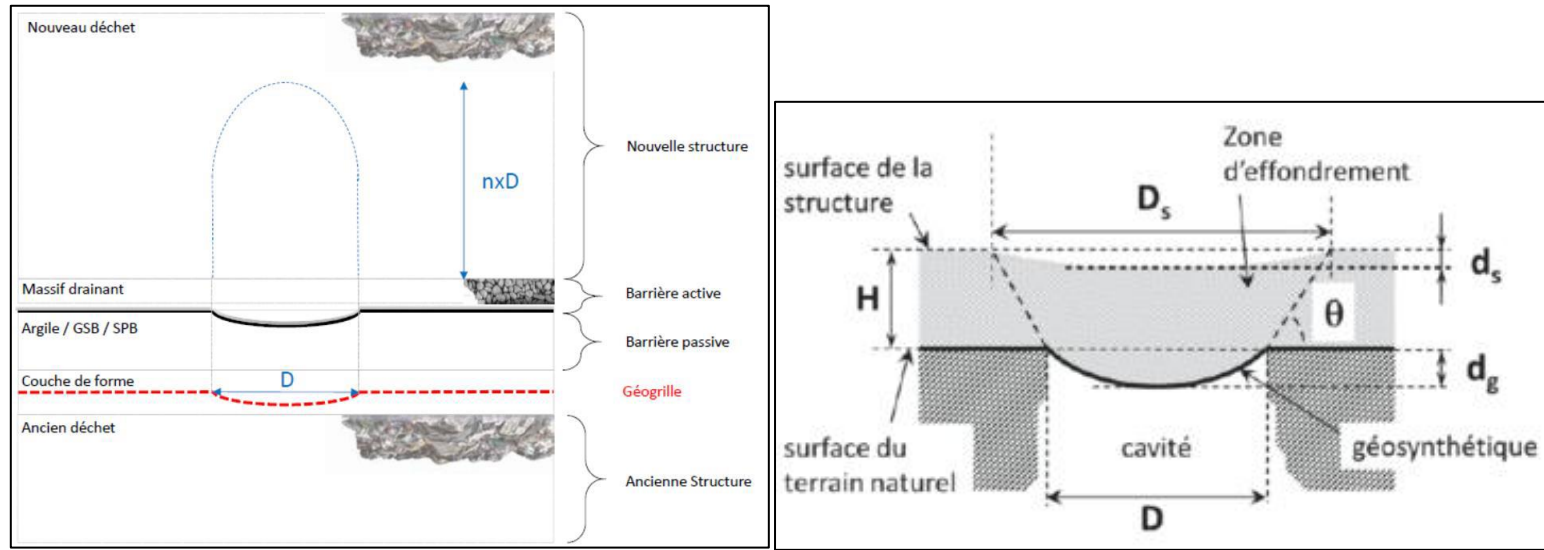
Par ailleurs, les spécificités décrites dans le guide du BRGM [13] sont à prendre en compte dans les cas spécifiques de projets de rehausse verticale et/ou latérale en Installation de Stockage de Déchets (ISD).

Il préconise notamment de considérer comme base de dimensionnement et aléa maximal la formation d'une cavité franche d'un diamètre de l'ordre de 1.0 à 2.0 m, pour représenter un affaissement localisé en sous-face d'un dispositif de renforcement de type géogridde

La Figure 12 illustre le principe d'un renforcement par géogridde selon 2 cas de figure :

- Cas du guide [13] : renforcement d'une structure de type BSP et BSA, en base d'une extension verticale de casier, lors d'un affaissement de la structure sous-jacente (ancien massif de déchets) matérialisé par une cavité de diamètre D,
- Cas de la norme [9] (repris dans le document [15]) : renforcement d'une structure de chaussée lors de la formation d'une cavité de diamètre D et influence sur la zone d'effondrement.

Figure 12 : Principes d'un renforcement par géogridde (sources : [9][15])



En présence d'un affaissement localisé et sous l'effet des charges, la géogridde se déforme en membrane et se met en tension au-dessus de l'affaissement. Les efforts de traction sont équilibrés grâce à une mobilisation progressive des ancrages de part et d'autre de l'affaissement.

La Figure 13 illustre la mise en action d'une géogridde (effort de traction et allongement) lors de la survenance d'un affaissement localisé.

La bonne conception du confortement vise à dimensionner la géogridde pour :

- Uniformiser les déformations globales,
- Contenir les déformations localisées et, en particulier, limiter les déformations de la couche d'étanchéité en présence,
- Éviter la rupture de la couche d'étanchéité.

Par ailleurs, lors de l'affaissement localisé, un glissement de la géogridde s'effectue et mobilise des efforts d'ancrage de part et d'autre de l'affaissement (Cf. Figure 14). Ce phénomène, décrit par Briançon et Villard (2008), a été repris dans le guide [13] et la norme [9] qui précisent que ce phénomène doit être pris en compte dans le cadre du calcul de l'allongement maximum admissible.

Enfin, il convient de noter que la conception des ouvrages de renforcement par géogridde suit les règles usuelles de conception des ouvrages géotechniques. Ainsi le calcul de dimensionnement de la géogridde doit tenir compte du cadre normatif en étant conforme aux principes de calcul aux états limites définis dans la norme NF EN 1990 et en respectant les exigences de la norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7) applicable au calcul des ouvrages géotechniques.

L'ouvrage est considéré en catégorie 2 au sens de l'Eurocode 7 : ouvrage courant qui ne présente pas de risque exceptionnel et n'est pas exposé à des conditions de terrain ou de chargement difficiles.

Figure 13 : Mise en action d'une géogrille lors d'un affaissement localisé (source : [13])

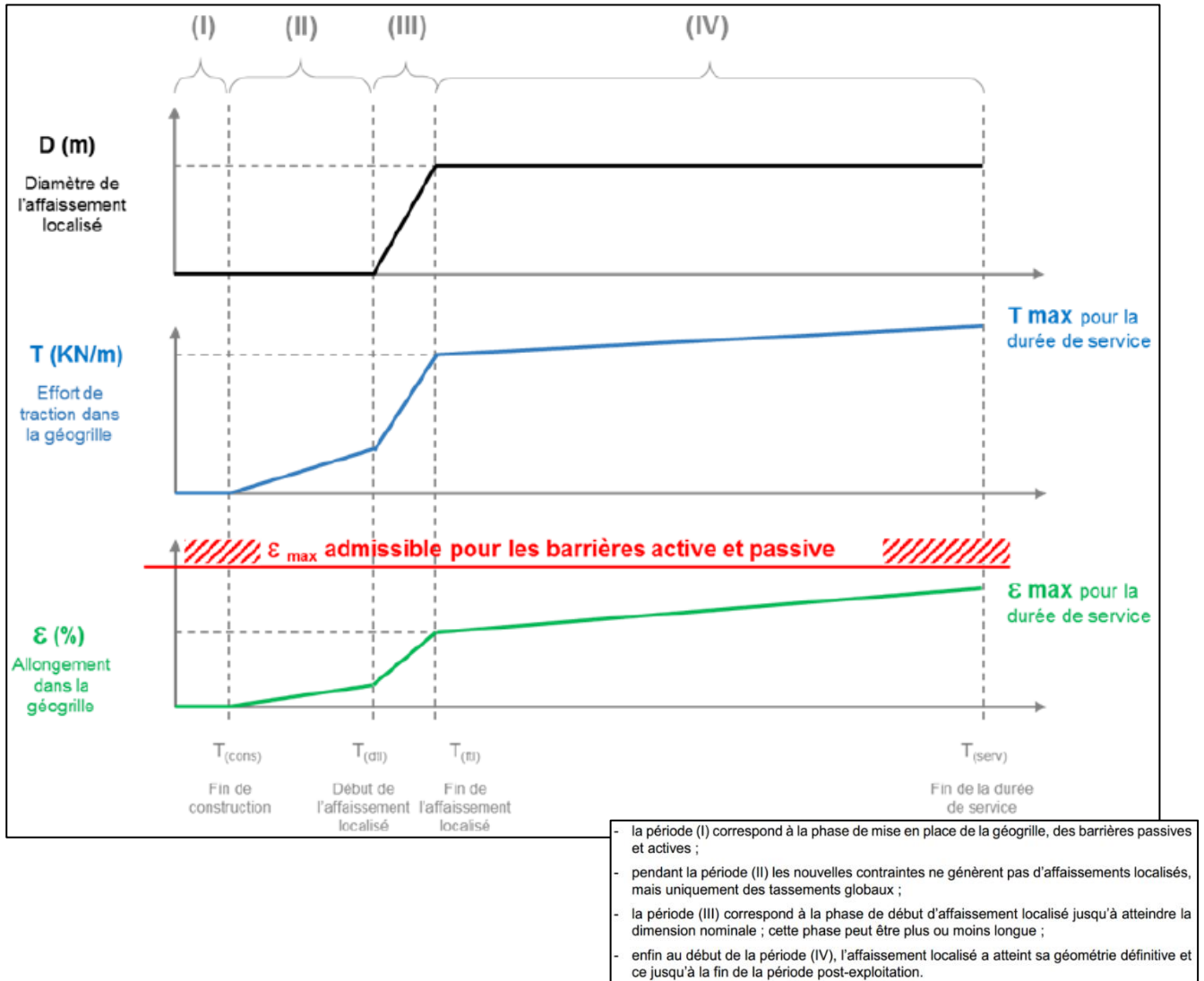
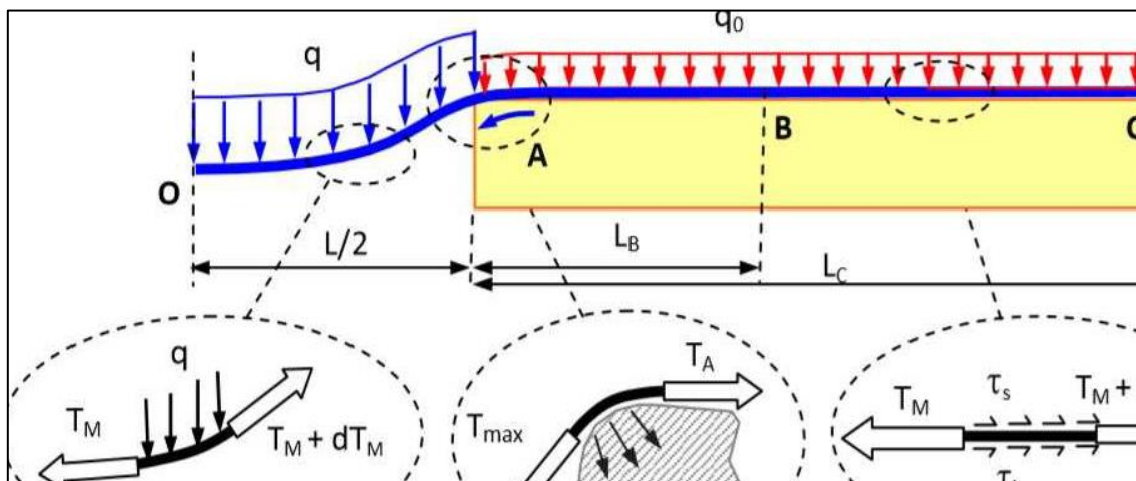


Figure 14 : Mécanisme de mobilisation des efforts d'ancrage (sources : [9][13])



7.3 Étude des affaissements localisés et dimensionnement d'une géogridde

7.3.1 Données générales

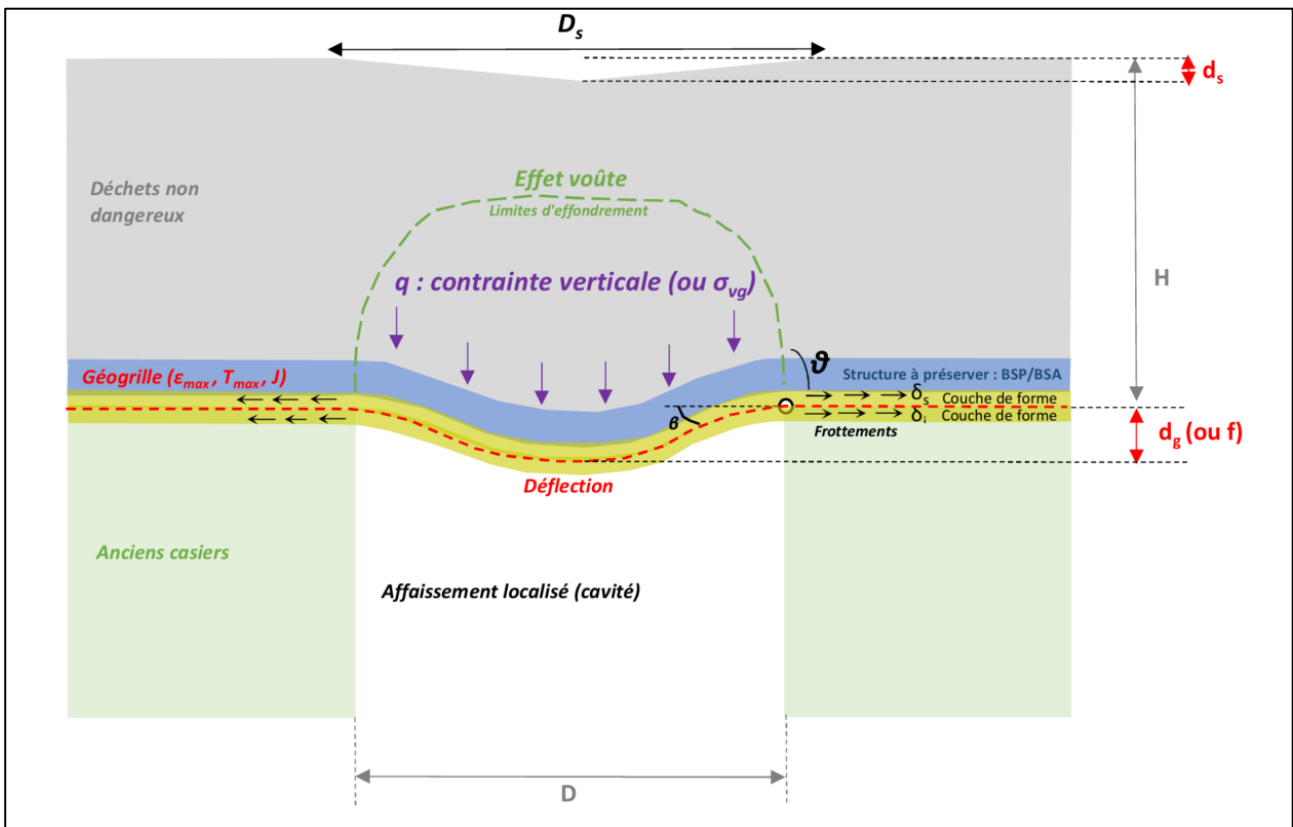
Les paragraphes suivants présentent le prédimensionnement d'une géogridde de reprise des affaissements localisés selon les référentiels en vigueur et selon les grands principes détaillés précédemment. La fiche de calcul associée est disponible en **Annexe 2**.

La hauteur maximale de déchets prévue sur les futurs casiers ISDND en rehausse varie de 7.58 à 17.01 m.

La BSP et la couche de couverture (terre végétale sur 0,8m + couche de reprofilage de 0.2m) sont également prises en compte dans les profils.

La Figure 15 illustre les différents paramètres entrant en jeu dans le dimensionnement d'une géogridde dans notre cas (posée à plat).

Figure 15 : Schéma illustrant un renforcement par géogridde d'un affaissement localisé avec création d'une cavité cylindrique



Avec :

q ou σ : contrainte verticale uniforme au-dessus de l'affaissement

D : diamètre de l'affaissement

D_s : diamètre de l'affaissement en surface

A : points de calcul de la résistance à la traction en bord de cavité

H : hauteur de remblais

d_s : hauteur d'affaissement en surface

7.3.2 Hypothèses d'entrée

Les hypothèses d'entrée ont été définies en conformité avec le guide BRGM [13]. Ainsi nous avons considéré que :

- Le diamètre nominal de l'affaissement localisé retenu est de 1 m (le guide BRGM recommande un diamètre de 1 à 2 m « en général »). Il convient de noter ici que le massif de déchets sous-jacent a été compacté et ne comprend pas d'éléments grossiers susceptibles de créer une cavité de gros diamètre.
- Une géomembrane PEHD intégrera le DEG de couverture des casiers. Le guide BRGM rappelle que la déformation maximale admissible d'une géomembrane PEHD 2 mm est de l'ordre de 3 % à l'état limite ultime (ELU),
- La distribution des charges est uniforme et verticale sur la géogridle,
- Un foisonnement des matériaux de remblais, soit $C_e = 1.00$ (pas de foisonnement pour les matériaux de type déchets d'après le guide BRGM [13]),
- Les limites d'effondrement suivent une remontée verticale (donc un angle $\theta = 90^\circ$), ce qui impliquerait une largeur de déformation en surface D_s égale au diamètre de la cavité D . Mais les limites d'effondrement n'atteignent pas la surface du fait de l'effet voûte et de la hauteur de déchets,
- Cet effet voûte implique que la surcharge du futur casier est calculée en prenant en compte non pas la totalité de la hauteur des remblais, mais une hauteur de $H = 3 \times D$, comme illustré en Figure 12 et Figure 15. Nous avons ainsi considéré une hauteur de remblais maximale $H = 3$ m. Cela conduit à n'étudier qu'un seul cas de figure par type de déchets au regard des hauteurs maximales de déchets mentionnées en partie 7.3.
- Le calcul de la contrainte sur la géogridle prend en compte cette surcharge liée aux remblais de la digue périphérique Nord dans la limite de l'effet voûte. Aucune autre surcharge n'a été intégrée (Ex : surcharge permanente, surcharge temporaire, etc.),
- Lors de l'affaissement localisé, il s'effectue un glissement de la géogridle lors de la mobilisation des efforts d'ancrage. Ce phénomène, non négligeable, a été pris en compte dans nos calculs sous la forme d'un calcul itératif à partir de la raideur résiduelle de la géogridle pour la durée de service. La raideur de la géogridle est ainsi augmentée pour compenser son déplacement au niveau des ancrages afin de respecter les critères de déformation maximale pour la structure à préserver,
- La valeur de U_0 , qui correspond au déplacement relatif de la géogridle dans la zone de lestage nécessaire pour assurer une mobilisation complète de la résistance au cisaillement, a été fixée à 5 mm, valeur couramment admise dans les publications récentes du CFG,
- Les caractéristiques mécaniques des déchets des futurs casiers ISDND ont été reprises de l'étude [1].

7.3.3 Méthodologie de calcul

7.3.3.1 Calcul de la contrainte verticale sur la géogridle

Le dimensionnement consiste à calculer la raideur résiduelle (à long terme) nécessaire de la géogridle à mettre en place afin de garantir une déformation maximale de 3 % de la géomembrane de couverture.

La valeur de la contrainte moyenne (q) agissant sur la géogridle est obtenue en considérant un mécanisme d'effondrement cylindrique sur la hauteur effective de déchets.

Conformément au guide BRGM [13], et par dérogation à la norme XP G38-065 [9], dans la mesure où les contraintes sont verticales et uniformes, la méthode de calcul selon Terzaghi (1943) n'est pas applicable.

La valeur de (q) est calculée comme suit :

$$q = \gamma_{GSup} \cdot (\gamma_{déchets} \cdot H_e + \gamma_{ba} \cdot H_{ba} + \gamma_{bp} \cdot H_{pb} + \gamma_{cdf} \cdot H_{cdf} + G) + \gamma_{QSup} * Q$$

Avec :

$\gamma_{déchets}$: poids volumique du déchet

$H_e = n \cdot xD$ = hauteur effective du déchet

γ_{ba} : poids volumique de la barrière active

H_{ba} : épaisseur de la barrière active

γ_{bp} : poids volumique de la barrière passive

H_{bp} : épaisseur de la barrière passive

γ_{cdf} : poids volumique de la couche de forme / d'égalisation

H_{cdf} : épaisseur de la couche de forme / d'égalisation

G : surcharges permanentes

Q : surcharges temporaires

γ_G : coefficient partiel aux ELU sur les surcharges permanentes (Cf. 7.3.3.4)

γ_Q : coefficient partiel aux ELU sur les surcharges variables (Cf. 7.3.3.4)

7.3.3.2 Prise en compte du déplacement de la géogridde lors de la mobilisation des efforts d'ancrage

Le calcul de la raideur nécessaire de la géogridde s'obtient en résolvant de manière itérative le système de deux équations, pour les deux inconnus U_A et β , établie par Briançon et Villard, 2008 :

$$\begin{cases} \frac{D}{4\beta} \left(\beta \sqrt{1 + \beta^2} + \text{ArgSh } \beta \right) - \frac{D}{2} = U_A + qD^2 \frac{3 + \beta^2}{12\beta J} \\ U_A = T_A / Jr \text{ (si } U_A \leq U_0) \text{ ou } U_A = U_0 + (T_A^2 - T_B^2) / 2J\tau_0 \text{ (si } U_A > U_0) \end{cases}$$

$$T_A = \left[qD \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{2\beta} \right] / [e^{\alpha \text{Atan}\beta \tan \delta_i}]$$

$$T_B = U_0 Jr$$

$$r = \sqrt{q_0(\tan \delta_i + \tan \delta_s) / JU_0}$$

$$\alpha = U_A / U_0 \text{ (si } U_A \leq U_0) \text{ et } \alpha = 1 \text{ (si } U_A > U_0)$$

Avec :

β : constante égale à la tangente de l'angle entre la géogridde et l'horizontal au bord de l'affaissement

U_A : glissement ou déplacement de la géogridde en bord de l'affaissement

U_0 : déplacement minimal nécessaire à l'obtention du frottement maximal à l'interface sol/géosynthétique

7.3.3.3 Détermination de la résistance en traction à la déformation maximale admissible à long terme

Cette détermination de U_A et β permet de calculer la résistance en traction (T_{max}) requise dans la géogridde à la déformation maximale admissible (ici 3%),

$$T_{max} = \frac{qD}{2\beta} \sqrt{1 + \beta^2}$$

Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Résistance en traction et raideur pour le cas de figure étudié

$T_{\max}$ (kN/m)	Raideur (kN/m)
95.91	3196.85

Le calcul nous permet ainsi de conclure que, pour assurer la non-rupture de la structure à préserver (géomembrane de couverture) par déformation excessive ($\epsilon_{\max} = 3 \%$), la géogrille doit présenter une résistance en traction à long terme ($T_{\max} = R_{t,d}$) pour une déformation de 3 % supérieure à 95.91 kN/m, donc une raideur de 3 196.85 kN/m.

Ces valeurs correspondent à une résistance en traction et à une raideur à long terme, c'est-à-dire la résistance en traction et la raideur que doit conserver le produit à long terme (au-delà de 50 ans), pour ne pas dépasser les 3 % de déformation. Comme le produit sera soumis à des dégradations (installation, vieillissement, chimie du milieu etc.), le produit tel qu'il est posé lors de son installation doit logiquement être surdimensionné, afin de compenser ces phénomènes. Il convient donc de prendre en compte les différents coefficients réducteurs qui sont à appliquer à cette valeur long terme (à t+50 ans au moins) pour obtenir les valeurs à court terme selon la norme NF EN ISO 10319 (à date d'installation t).

En aucun cas ces valeurs long terme ne correspondent aux valeurs indiquées sur une fiche technique d'un fournisseur. En effet, les valeurs indiquées sur une fiche technique (ex : « géogrille de XX kN/m ») correspondent habituellement à une résistance à la rupture du produit, c'est-à-dire à la déformation maximale du produit et à court terme, en prenant en compte les coefficients réducteurs spécifiques au produit.

A une déformation donnée (ici 3 %), une géogrille ne mobilise qu'une petite partie de sa résistance en traction maximale (à la rupture). Autrement dit, une géogrille proposée pour les casiers ISDND à 95.91 kN/m à la rupture ne présentera qu'un pourcentage de cette valeur à une déformation donnée. Ce qui implique qu'en fixant 95.91 kN/m à 3% de déformation, la valeur de résistance en traction à la rupture apparaissant sur la fiche technique devra être supérieure à 95.91 kN/m. (le principe est le même pour la géogrille à prévoir pour le casier amiante en rehausse).

Ainsi, cette valeur de 95.91 kN/m qui correspond à la résistance en traction maximale admissible du produit à 3 % de déformation, à long terme (au-delà de 50 ans), doit servir de base de calcul au fournisseur de la géogrille pour établir son calcul à court terme, basé sur les coefficients réducteurs et sur des isochrones qui sont spécifiques à son produit.

Il appartiendra au fournisseur de justifier des coefficients réducteurs de son produit sous la forme d'une note technique, avec dans l'idéal une justification des valeurs dans une fiche d'agrément du British Board of Agrement (BBA).

7.3.3.4 Coefficients réducteurs permettant la transition vers une valeur court terme

► Sur les actions

Dans le cadre d'un renforcement d'ouvrage, la norme [10] précise qu'il convient de vérifier que, pour les situations de projet durables et transitoires les plus défavorables en cours de construction ou en cours d'exploitation, les états limites ultimes (ELU) ne sont pas atteints.

Le guide [13] précise également que les différents états-limites à considérer sont :

« 1) les états-limites d'instabilité par défaillance du renforcement, soit par insuffisance de résistance à la traction, soit par insuffisance de la résistance de l'interaction entre le renforcement et le sol,

2) les états-limites d'instabilité par déformation excessive, qui consiste à vérifier que la déformation maximale admissible dans la barrière active ne soit pas dépassée afin de garantir la poursuite du bon fonctionnement de l'ouvrage même après les affaissements globaux et localisés.

On doit vérifier qu'aucun de ces états-limites ne peut être atteint ni au cours de la construction, ni pendant sa durée d'utilisation prévue.

En conformité avec les normes existantes sur les ouvrages renforcés, on retiendra l'approche 2 pour la justification des renforcements par géogridle ».

Les coefficients partiels liés aux actions de surcharges permanente et variable aux ELU sont les suivants.

Tableau 6 : Coefficients partiels sur les actions (ELU, sources :[9][13])

Coefficient partiel	Valeur retenue
Sur les surcharges permanentes (γ_G)	1.35
Sur les surcharges variables (γ_Q)	1.50

► Sur la géogridle

Sans savoir à ce stade la nature du produit qui sera mis en œuvre, nous avons retenu les coefficients partiels suivants, issus de valeurs moyennes des normes [9][10][11] et de la norme ISO/TR 20432.

Tableau 7 : Coefficients partiels sur les propriétés de la géogridle (sources : [9][10][11])

Coefficient partiel	Valeur retenue	Commentaire
Résistance à la traction ($Y_{M,t}$)	1.25	Valeur imposée
Fluage (Γ_{flu})	5	Dépend de la matière de la géogridle
Dégradation chimique (Γ_{ch})	1.15	Dépend de la matière de la géogridle, du pH et de sa durée d'utilisation
Exposition aux UV (Γ_w)	1.3	Dépend de la durée d'exposition
Coefficient d'extrapolation (f_s)	1.3	Selon ISO/TR 20432 et sur la base de valeurs sur des produits existants sur le marché
Endommagement mécanique (Γ_{instal})	1.25	Dépend des conditions de mise en œuvre

7.3.3.5 Détermination de la résistance en traction à la déformation maximale admissible à court terme

La vérification à l'état limite ultime vis-à-vis de la rupture en traction de la géogridle tient compte du comportement long terme de la géogridle. Mais celle-ci n'est pas limitée par l'allongement.

Le dimensionnement de la géogridle doit prendre en compte les coefficients de sécurité partiels précités pour prévenir la diminution de la résistance de la géogridle au cours du temps.

La résistance ultime à long terme ($R_{t,d}$) est liée à la résistance à la traction à court terme ($R_{t,k0}$, mesurée selon la norme NF EN ISO 10319) par l'équation suivante :

$$R_{t,d} = \frac{\mu_{\varepsilon_{adm}} \times R_{t,k0}}{\Gamma_{instal} \times \Gamma_{ch} \times \Gamma_w \times f_s \times \gamma_{M,t}} \geq T_{max}$$

Avec :

$\mu_{\varepsilon_{adm}}$: taux de travail à la traction de la géogridde pour la déformation $\varepsilon_{max,adm}$ sur la période de service, en utilisant les courbes d'isochrones

Γ_{instal} : coefficient partiel lié à l'endommagement mécanique des géogrilles lors de leur mise en œuvre

Γ_{ch} : coefficient partiel lié au vieillissement chimique des géogrilles

Γ_w : coefficient réducteur lié au vieillissement des géogrilles par exposition aux UV

f_s : coefficient d'extrapolation, au sens du guide ISO/TR 20432, dépendant de la durée et de la nature des essais de caractérisation de la géogridde au laboratoire

$\gamma_{M,t}$: facteur partiel sur la résistance en traction des géogrilles, égal à 1.25 aux ELU.

La résistance en traction minimum calculée à long terme ($R_{t,d}$) est donc à multiplier par ces coefficients pour obtenir la résistance en traction minimum à court terme ($R_{t,k0}$) de la géogridde, mesurée selon la norme NF EN ISO 10319.

Sur la base des coefficients partiels précités, le calcul nous permet de conclure que, pour assurer la non-rupture de la structure à préserver (géomembrane) par déformation excessive ($\varepsilon_{max,adm} = 3\%$), la géogridde doit présenter une résistance en traction à court terme ($R_{t,k0} \geq R_{t,d}$ ou T_{max}) supérieure à 1 456.19 kN/m, donc une raideur de 48 540 kN/m.

Il convient de noter que cette valeur est élevée et correspond à des produits haut de gamme.

Comme indiqué au paragraphe 7.3.3.3, la résistance en traction maximale admissible du produit à 3 % de déformation, à long terme, doit servir de base de calcul au fournisseur de la géogridde pour établir son calcul à court terme, en se basant sur ses propres coefficients réducteurs et sur les isochrones qui sont spécifiques à son produit, et non sur les coefficients des normes pouvant être majorants et sécuritaires.

En effet, les coefficients réducteurs (Γ_{flu} , Γ_{ch} , Γ_w) sont spécifiques à chaque produit, sont déterminés en laboratoire selon des procédures normalisées et un coefficient de confiance et d'extrapolation (f_s), et sont validés par des experts indépendants (fiche d'agrément du British Board of Agreement (BBA) par exemple).

7.4 Justification de la capacité de lestage et de recouvrement

7.4.1 Prédimensionnement du lestage

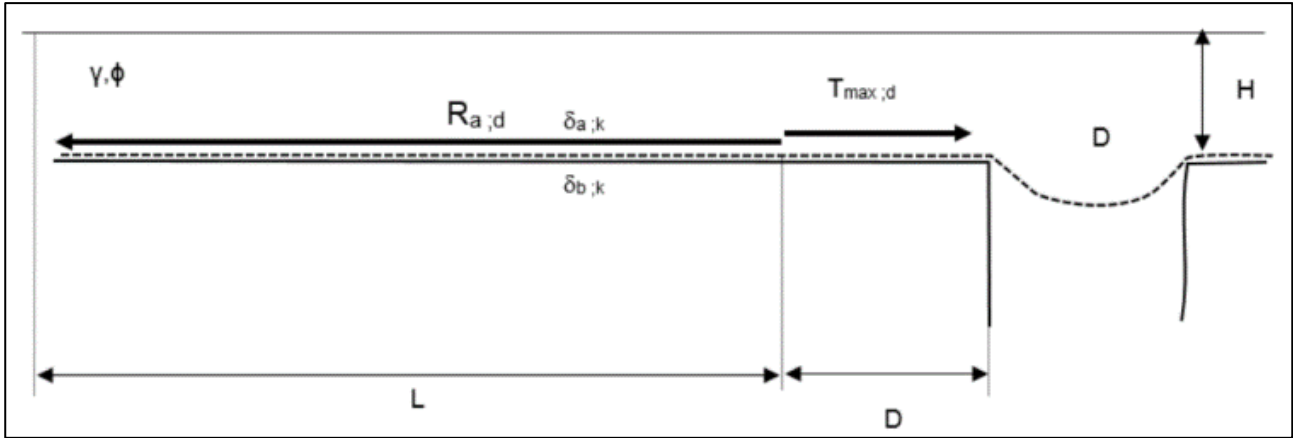
La méthode de calcul utilisée est basée sur l'hypothèse que les efforts au niveau de la zone de lestage sont repris uniquement par frottement sur les parties linéaires sans aucun effet d'angle (Cf. Figure 16). La capacité d'ancrage est directement liée aux actions d'origine pondérale : les poids des matériaux de lestage à plat constituent des actions favorables.

Les coefficients partiels suivants sur les actions ou résistance sont appliqués.

Tableau 8 : Coefficients partiels pour le prédimensionnement du lestage (ELU, source : [9])

Coefficient partiel	Valeur retenue
Sur la résistance de l'interface ($\gamma_{R,f}$)	1.35
Sur les actions favorables (γ_{Ginf})	1.00

Figure 16 : Décomposition des efforts résistants pour de faibles déformations en surface (source : [9])



La géométrie du lestage est calculée à la distance D du bord de la cavité, selon 2 cas de figures (forte ou faible déformation en surface).

Dans notre cas, la déformation en surface reste faible ($d_{s,max} \leq H/4$) et la force résistance de lestage par unité de largeur est égale à :

$$R_{a;d} = \frac{1}{\gamma_{R,f}} \gamma_{G \text{ inf}} \cdot \gamma \cdot H \cdot L (\tan \delta_{a;k} + \tan \delta_{b;k})$$

Avec :

$\delta_{a;k}$: angle de frottement de l'interface inférieure à la géogridde

$\delta_{b;k}$: angle de frottement de l'interface supérieure à la géogridde

Le Tableau 9 résume les dimensions de la zone de lestage et les angles de frottements considérés, permettant d'atteindre $R_{a;d} \geq T_{max}$.

Un seul matériau de lestage a été considéré par souci de simplification (déchets, matériau principal et sécuritaire dans le dimensionnement).

Tableau 9 : Dimensions de la zone de lestage et angles de frottement considérés

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur	Commentaire
Casiers ISDND				
Angle de frottement inférieur	$\delta_{a;k}$	°	30	Valeur moyenne bibliographique
Angle de frottement supérieur	$\delta_{b;k}$	°	30	Valeur moyenne norme [9]
Hauteur de lestage	H	m	7.0	Épaisseur de déchets moyenne minimale par alvéole / cf. Figure 5
Longueur de lestage	L	m	2.0	Longueur à partir des crêtes et pieds de talus

7.4.2 Recouvrements longitudinal et latéral des lés de géogriddes

Le recouvrement longitudinal des lés de géogriddes s'effectue dans le sens des efforts. La longueur nécessaire à la mobilisation des efforts de lestage est telle que :

$$L_{rL} \geq \frac{T_{\max}}{\frac{1}{\gamma_{R,f}} \gamma_{G \text{ inf}} \cdot \gamma \cdot H \cdot (\tan \delta_{i,k} + \tan \delta_{\text{geo;geo}})} + D$$

Avec :

D : portée du renforcement

$\delta_{i,k}$: angle de frottement de l'interface sol-géosynthétique le plus défavorable (min ($\delta_{a,k}$; $\delta_{b,k}$))

$\delta_{\text{geo;geo}}$: angle de frottement de l'interface entre les deux lés de géogridde – valeur de 14° proposée dans la norme [9]

Le recouvrement latéral des lés de géogridde s'effectue perpendiculairement aux efforts. Il doit assurer la continuité de la surface renforcée en évitant une ouverture entre deux lés de géogriddes superposée au droit d'une cavité.

$$L_{rl} > \text{Max} (2 \cdot \epsilon_d \cdot D ; 50\text{cm})$$

Le tableau suivant résume les recouvrements longitudinal et minimal à respecter.

Tableau 10 : Recouvrements longitudinal et latéral des lés de géogriddes

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Recouvrement longitudinal	L_{rL}	m	3
Recouvrement latéral	L_{rl}	m	0.5

Remarque : Dans l'éventualité où l'emprise disponible ne permettrait pas de satisfaire à la longueur d'ancrage à plat nécessaire pour la géogridde, un dispositif d'ancrage de type tranchée pourrait être adopté (cf. Norme XP G38-065 [9]).

8. Conclusion

La Société Anonyme d'Économie Mixte Ardennaise d'Amélioration du Cadre de Vie (SAEM ARCAVI) a exploité à partir de 1976 la décharge contrôlée d'Éteignières (08). Plus récemment, la SAEM ARCAVI a été autorisée par l'Arrêté Préfectoral (AP) n°4806 en date du 20/08/2008, et par ses Arrêtés complémentaires, à exploiter son Installation de Valorisation et d'Élimination des Déchets Ardennais (IVEDA) sur ce même site.

Compte tenu des perspectives d'évolution des quantités de déchets réceptionnés, ARCAVI souhaite étendre les capacités de stockage de ses installations.

Dans ce cadre, ARCAVI a missionné GINGER BURGEAP pour réaliser la Demande d'Autorisation Environnementale (DAE) associée à cette optimisation de l'activité.

Le scénario d'aménagement retenu est le suivant :

- Stockages ISDND et amiante en rehausse des casiers existants sur l'emprise actuelle ;
- Stockage inerte (ISDI+) sur la zone d'extension à l'est.

A noter également, après des échanges avec l'administration, ARCAVI a décidé de :

- Réduire la capacité maximale autorisée pour l'ISDND à 90 000 t/an pour les cinq premières années (de 2026 à 2030), puis à 80 000 t/an (de 2031 à 2038), au lieu des 110 000 t/an actuellement autorisés ;
- Substituer l'aménagement des casiers de stockage de déchets inertes autorisés et non utilisés sur le site actuel vers la nouvelle parcelle d'extension à l'est, qui est une zone humide ;
- Aménager les futurs casier amiante à l'intérieur du site actuel afin d'éviter de les placer dans la nouvelle parcelle.

Ce rapport constitue un prédimensionnement de la géogridde de reprise des affaissements localisés à mettre en place en prévision de l'aménagement et l'exploitation de casiers ISDND en rehausse du projet. Il sera à actualiser en phase de préparation de chantier par l'entreprise de travaux retenue, sur la base des études d'exécution validées par la MOE.

Le prédimensionnement réalisé met en évidence les caractéristiques suivantes de géogridde.

Tableau 11 : Caractéristiques requises pour la géogridde

Paramètre	Unité	Valeur
Casiers ISDND		
Déformation maximale admissible de la géomembrane	%	3.00
Résistance minimale en traction à long terme (+ de 50 ans)	kN/m	95.91
Résistance minimale en traction à court terme selon la NF EN ISO 10319	kN/m	1 456.19

Il appartiendra au fournisseur de la géogridle de repartir de la résistance minimale en traction admissible du produit pour une déformation maximal admissible de la géomembrane de 3 % et à long terme (au-delà de 50 ans), et de justifier du dimensionnement de sa géogridle à court terme, en se basant sur ses propres coefficients réducteurs et sur les isochrones qui sont spécifiques à son produit, déterminés en laboratoire selon des procédures normalisées et validés par des experts indépendants (fiche d'agrément du British Board of Agrement (BBA) par exemple).

Conformément aux recommandations du guide [13], le produit mis en œuvre devra être une géogridle. Il existe de nombreux géosynthétiques de renforcement sur le marché : les géogridles sont un type de géosynthétique de renforcement, mais leurs caractéristiques géométriques (en mailles) leur permettent de maximiser les reprises d'effort tout en minimisant la surface de contact et donc l'endommagement du produit.

Afin de garantir une parfaite imbrication de la géogridle dans le sol, les mailles devront présenter une dimension minimale d'au moins 20 x 20 mm.

Enfin, s'agissant d'un ouvrage créé au droit d'anciens casiers de stockage de déchets, nous recommandons de mettre en place un suivi topographique régulier pour repérer d'éventuels tassements anormaux générés par l'ouvrage sur les anciens casiers.

9. Incertitudes et limites de l'étude

Le dimensionnement de la géogrille sera à valider en phase de préparation de chantier par l'entreprise de travaux retenue, sur la base des études d'exécution validées par la MOE. Dans ce cadre, la réalisation d'essais de cisaillement sur les matériaux naturels, d'essais de cisaillement aux interfaces des géosynthétiques et/ou d'essais en traction pourra être imposée dans le Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP).

L'angle de frottement entre la géogrille et les matériaux de couche de forme (δ_s) sera à justifier/confirmer par l'entreprise de travaux. De même, les caractéristiques de la géogrille et les coefficients partiels pris en compte seront à justifier par l'entreprise.

Cette étude n'est pas destinée à étudier la stabilité d'une éventuelle couche de terre végétale qui serait mise en œuvre sur les matériaux de remblais de digue dans le cadre de sa végétalisation.

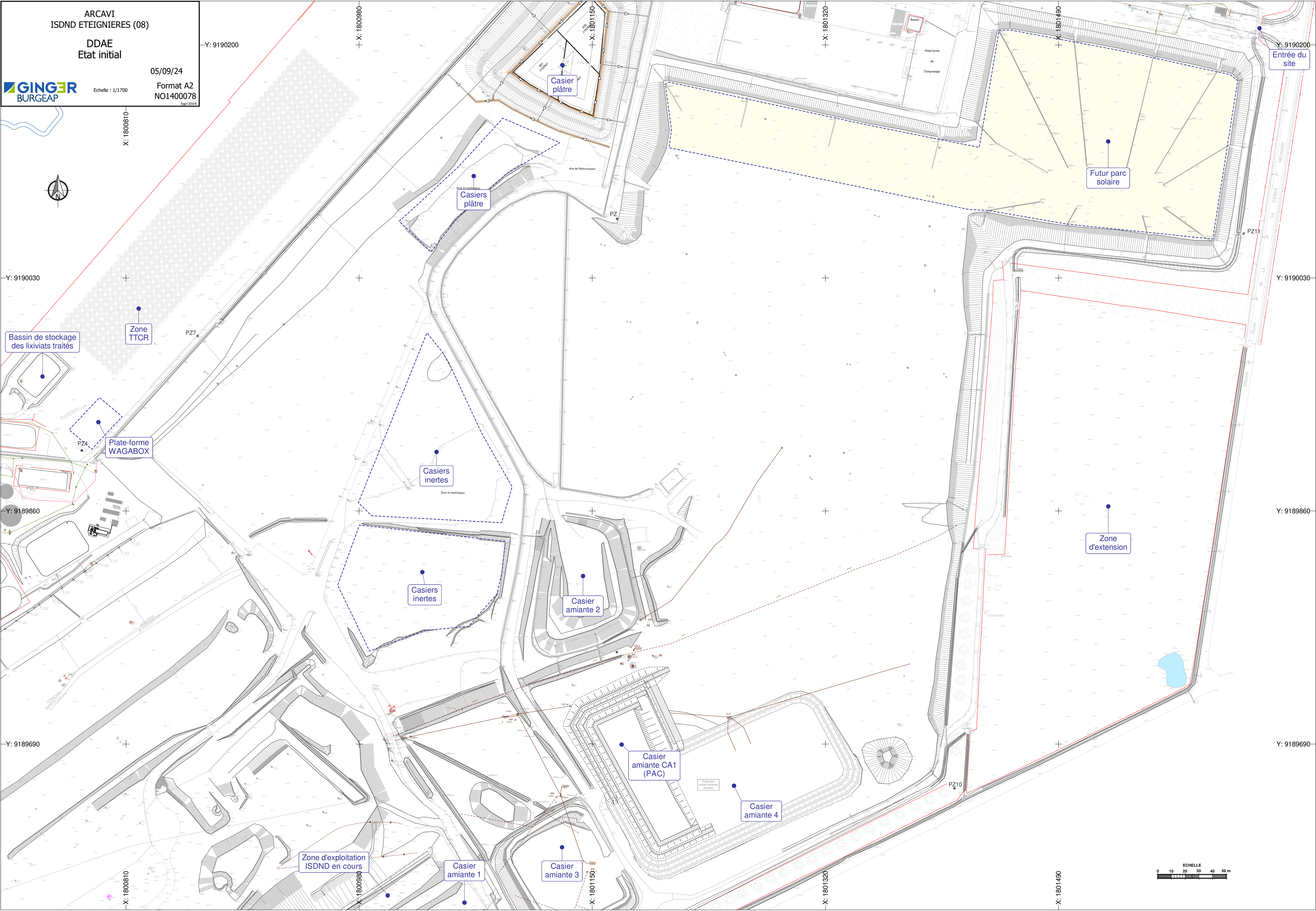
Les risques de tassement, de poinçonnement du sol d'assise ou des déchets sous-jacents ne sont pas intégrés dans cette mission.

ANNEXES



Annexe 1. Dossier de plans

Cette annexe contient 6 pages.



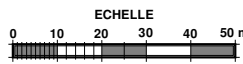
ARCAVI
ISDND ETEIGNIERES (08)

DDAE
Etat initial

05/09/24

Echelle : 1/1700

Format A2
NO1400078





ARCAVI
ISDND ETEIGNIERES (08)

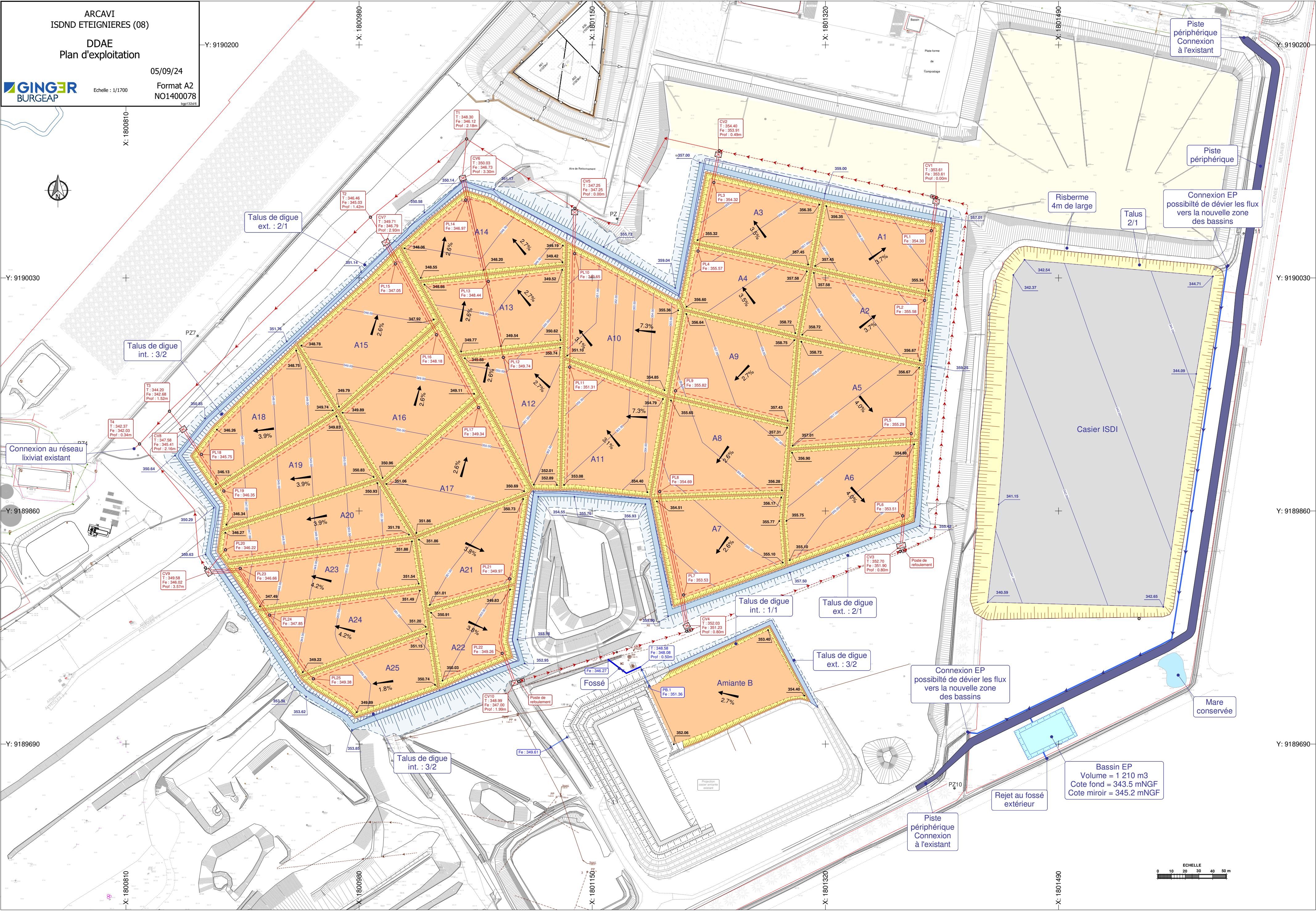
DDAE - Arase des zones d'exploitations
Plan de reprofilage (déblais-remblais)

05/09/24

ECHelle : 1/1700

Format A2
NO1400078

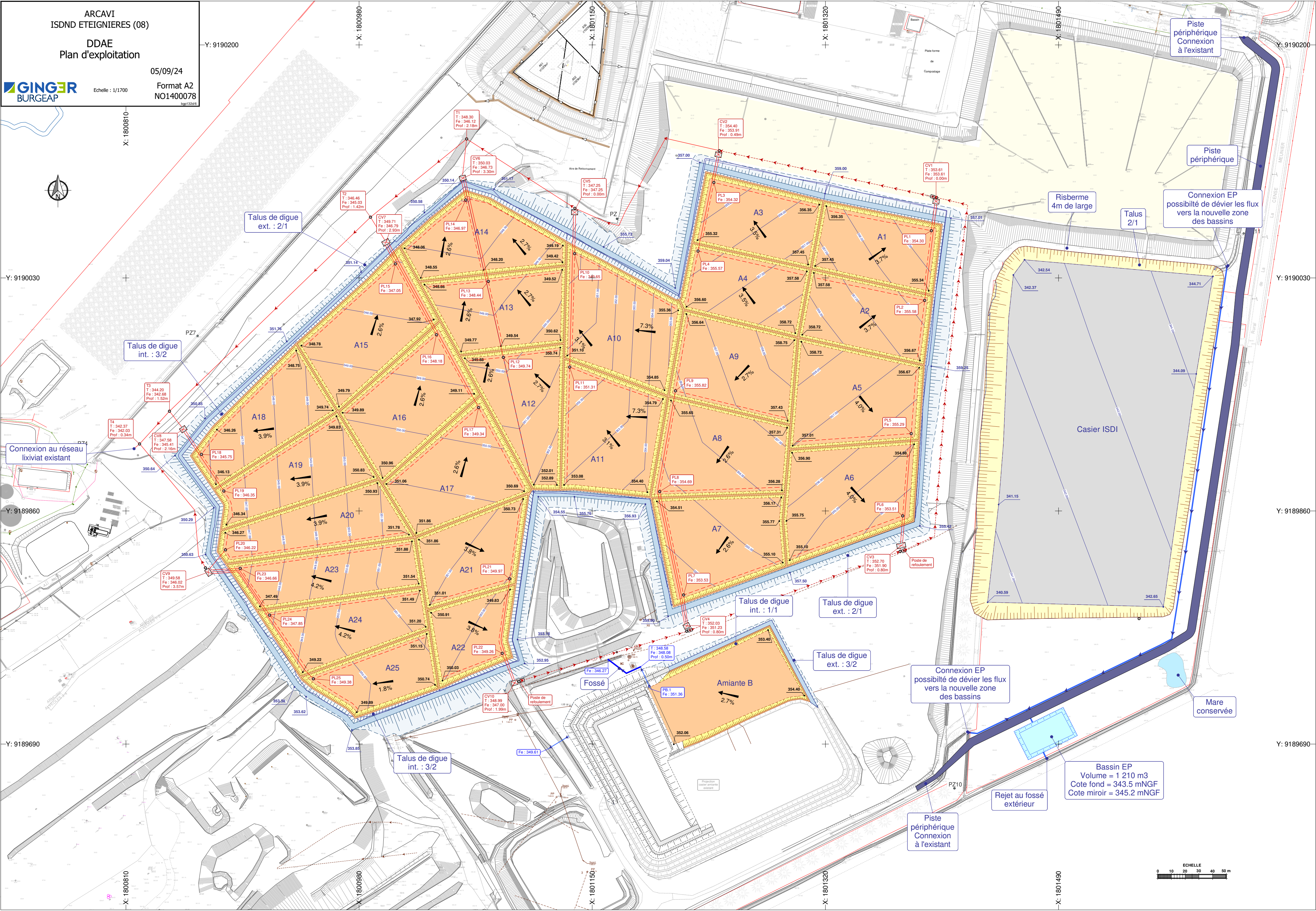
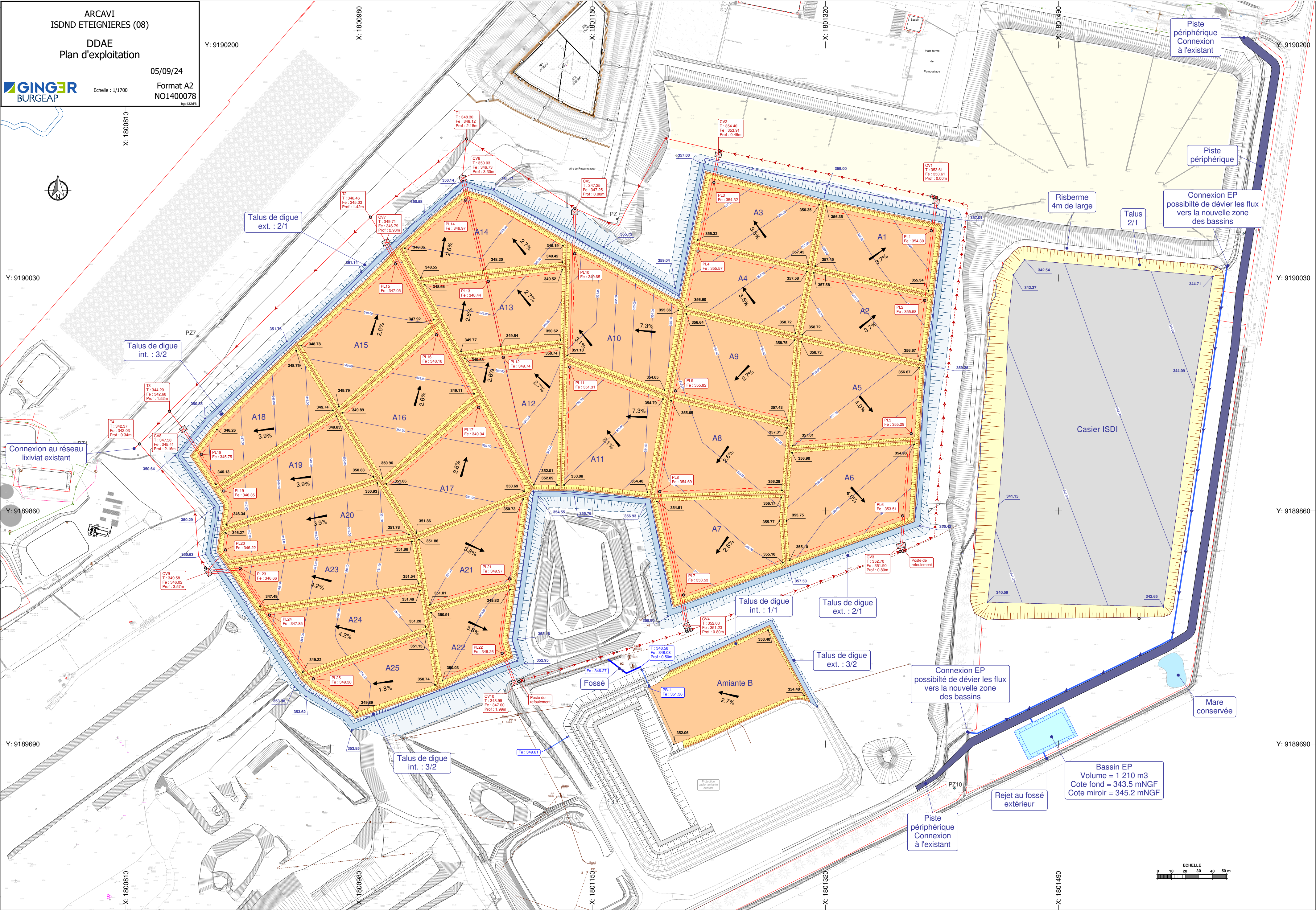
Légende	
■	Remblais 1.00 - 1.54
■	Remblais 0.00 - 1.00
■	Déblais 0.00 - 1.00
■	Déblais 1.00 - 2.00
■	Déblais 2.00 - 3.00
■	Déblais 3.00 - 4.00
■	Déblais 4.00 - 5.00
■	Déblais 5.00 - 6.00
■	Déblais 6.00 - 7.00
■	Déblais 7.00 - 7.23

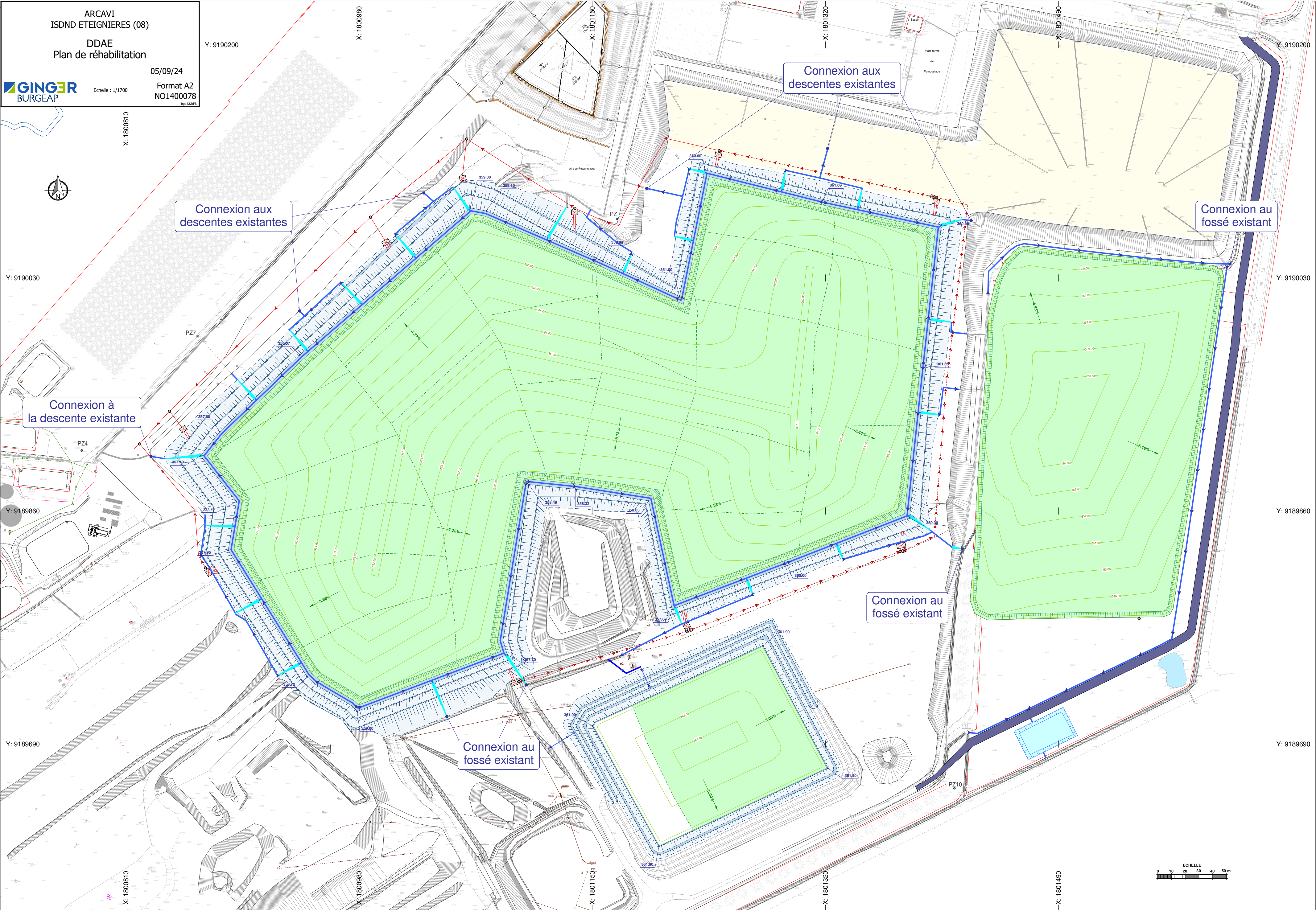


ARCAVI
ISDND ETEIGNIERES (08)

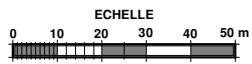
DDAE
Plan d'exploitation

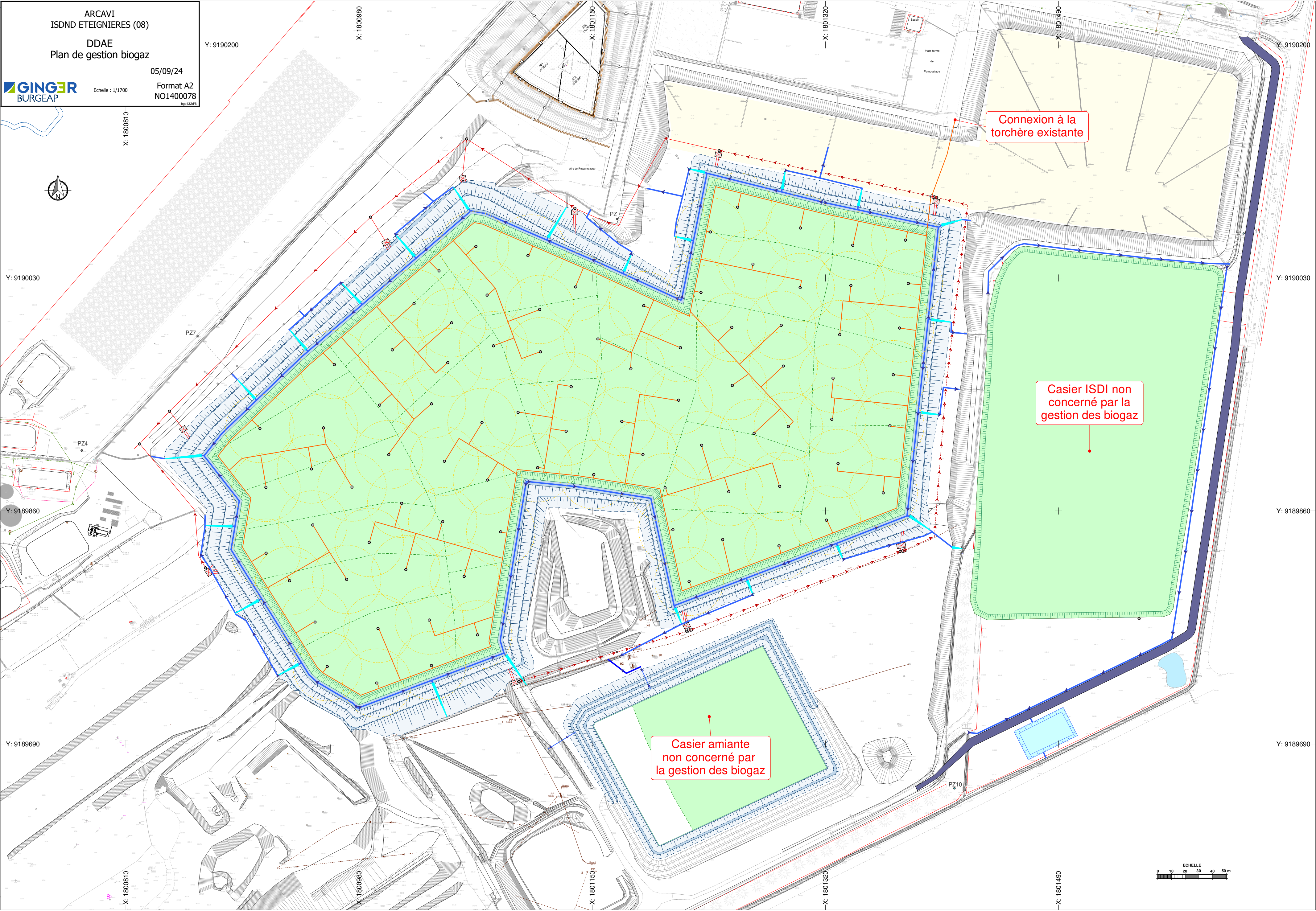
05/09/24
Format A2
NO1400078





ARCAVI
ISDND ETEIGNIERES (08)
DDAE
Plan de réhabilitation
05/09/24
Format A2
NO1400078
Echelle : 1/1700
ginger
BURGEAP





ARCAVI

ISDND ETEIGNIERES (08)

DDAE

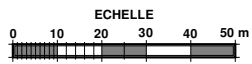
Plan de gestion biogaz

05/09/24

Format A2

NO1400078

Echelle : 1/1700



Annexe 2. Fiche de calcul du prédimensionnement de la géogridde

Cette annexe contient 1 page.

Prédimensionnement d'une géogridde de reprise d'affaissements localisés

Projet : NO1400067

Site : ARCAVI - ISDND d'Eteignères (08)

Profil : AA'

Hypothèses et données d'entrée	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Diamètre de la cavité :	D	1.0	m	Valeur basse du guide BRGM/RP-69455-FR
Hauteur de déchets ou de remblais (Ex : remblais de digue) :	H _{matériaux}	17.0	m	Hauteur maximale au droit des alvéoles A1 à A25
Facteur d'effet voûte :	n	3	-	
Hauteur de déchets ou de remblais à prendre en compte en incluant l'effet voûte (H= n x D) :	H _{matériaux retenue}	3.00	m	Valeur max. du guide BRGM/RP-69455-FR, H/D < 3 d'après norme XP G38-065
Poids volumique des déchets ou des remblais (Ex : remblais de digue) :	γ _{matériaux}	10.0	kN/m ³	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Hauteur de la Barrière de Sécurité Passive (BSP) :	H _{BSP}	0.5	m	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Poids volumique de la Barrière de Sécurité Passive (BSP) :	γ _{BSP}	19.0	kN/m ³	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Hauteur de la couche de drainage des lixiviats :	H _{couche drainante}	0.3	m	
Poids volumique de la couche de drainage des lixiviats :	γ _{couche drainante}	16.0	kN/m ³	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Angle de frottement interne des déchets ou des remblais (Ex : remblais de digue) :	φ	23	°	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Cohésion des déchets ou des remblais (Ex : remblais de digue) :	C	5	kPa	Valeur rapport GINGER BURGEAP APS Arcavi
Coefficient d'expansion (foisonnement) :	C _e	1.00	-	Valeur guide BRGM/RP-69455-FR
Hauteur de la couche de forme ou d'égalisation <u>sur</u> la géogridde :	H _{cdf}	0.25	m	
Poids volumique de la couche de forme ou d'égalisation <u>sur</u> la géogridde :	γ _{cdf}	17.0	kN/m ³	
Surcharge permanente de surface agissant en tête de déchets ou de remblais (Ex : ballast, voirie, couverture) :	G _s	17.0	kN/m ² (= kPa)	Couverture végétale 80cm + 20 cm couche reprofilage
Coefficient partiel à FELLU pour une surcharge permanente :	γ _s	1.35		Valeur norme XP G38-065
Surcharge variable de surface agissant en tête de déchets ou de remblais (Ex : train, engin) :	Q _i	0.0	kN/m ² (= kPa)	Pas de surcharge variable identifiée
Coefficient partiel à FELLU pour une surcharge variable :	γ _q	1.50		Valeur norme XP G38-065
Angle de diffusion (ouverture du cône d'affaissement) :	θ	90.00	°	Valeur norme XP G38-065
Déformation maximale admissible pour la structure à préserver (Ex : BSP ou DEG) - déformation maximale admissible dans la géogridde pour ne pas l'affecter :	ε _{adm}	3.00%	%	Valeur guide BRGM/RP-69455-FR pour une géomembrane PEHD 2 mm
Valeur de 3 % à considérer pour une BSA incluant une GMB PEHD 2 mm et 1 à 2 % pour une couche d'argile d'après le guide BRGM/RP-69455-FR, pour la durée de service de l'ouvrage et dans les conditions du site				
Coefficient donnant le ratio entre les contraintes horizontales et verticales dans la formule de Terzaghi :	K	1.00	-	Valeur norme XP G38-065
Durée de service <u>minimale</u> au terme de laquelle la géogridde doit maintenir la déformation maximale admissible :	-	classe 4/5	-	

Dimensions de la zone d'affaissement	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Largeur de la zone d'affaissement en surface :	D _s	1.0	m	D _s = D pour θ = 90° d'après guide BRGM/RP-69455 FR et norme XP G38-065
Affaissement admissible en surface :	d _{s,adm} /D _s	13.00%	%	Equivalent parc/zone piétonne selon norme XP G38-065
Déflexion maximale admissible en surface :	d _{s,max}	0.13	m	
Prise en compte du déplacement en bord de cavité	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Angle de frottement entre la géogridde et la couche inférieure :	δ _{sol/géo inférieure} (δ _{sk,i})	30.0	°	Valeur basse guide BRGM/RP-69455-FR
Angle de frottement entre la géogridde et la couche supérieure :	δ _{sol/géo supérieure} (δ _{sk,s})	30.0	°	Valeur basse guide BRGM/RP-69455-FR
Déplacement minimal nécessaire à l'obtention du frottement maximal à l'interface sol/géosynthétique (loi élasto-plastique du frottement à l'interface sol/géosynthétique) :	U ₀	0.005	m	Valeur norme XP G38-065
Contrainte verticale de part et d'autre de la cavité sur la zone de lestage ou ancrage :	q ₀	277.63	kN/m ² (= kPa)	
Résistance au cisaillement de la géogridde :	τ ₀	320.58	kN/m ² (= kPa)	
Angle formé entre l'horizontale et la géogridde au droit du point A (point d'inflexion en bordure de l'affaissement) :	β	0.52	°	
Sollicitations de la géogridde	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Contrainte uniforme et verticale max. appliquée sur la géogridde en cas d'affaissement d'un tronçon cylindrique de sol :	q (ou σ _v)	88.49	kN/m ² (= kPa)	Méthode guide BRGM/RP-69455-FR
Déflexion (flèche) maximale de la géogridde :	d _{g,max}	0.13	m	
T _{max} au bord de l'affaissement localisé :	T _{max}	95.91	kN/m	
Géogridde de renforcement requise pour la structure à préserver	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Choix du polymère :	A Justifier par le fournisseur, matériau résistant à d'éventuelles fuites de lixiviats à proposer			
Pour une déformation maximale :	ε _{max}	3.00%	%	Valeur contrainte par le DEG sus-jacent
Résistance minimale en traction requise à <u>long terme</u> (T _{req} ≥ T _{ult} / (Y _{M2} x Γ _{du} x Γ _{ch} x Γ _w x Γ _{instal} x fs) selon la norme ISO/TR 20432 :	T _{req}	95.91	kN/m	
Raideur résiduelle de la géogridde pour la durée de service de l'ouvrage et dans les conditions du site :	J _{min}	3196.85	kN/m	
Prise en compte des coefficients partiels de réduction selon les normes NF G38-064, NF G38-065 et NF G38-067	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Résistance en traction caractéristique :	Y _{M2}	1.25	-	
Vieillessement chimique du produit dans son environnement (hydrolyse, oxydation) :	Γ _{ch}	1.15	-	
Vieillessement dû à l'exposition aux rayons UV :	Γ _w	1.30	-	
Endommagement mécanique lors de la pose du géosynthétique et de la mise en oeuvre des remblais :	Γ _{instal}	1.25	-	Valeurs moyennes bibliographiques à justifier par le fournisseur via des essais certifiés (Ex : certificat BBA)
Fluage, taux de travail (évolution dans le temps du géosynthétique), à 50 ans minimum, pour une déformation égale à ε _{max} :	Γ _{du}	5.00	-	
Coefficient d'extrapolation :	f _s	1.30	-	
Résistance minimale en traction requise à <u>court terme</u> selon la norme NF EN ISO 10319 après application des coefficients partiels :	R _{k,0}	1456.19	kN/m	
Dimensionnement du lestage à plat	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Cas d'une faible déformation en surface (d _{s,max} ≤ H/4)				
Facteur partiel pour la résistance au glissement d'interface :	γ _{RI,I}	1.35	-	Valeur norme XP G38-065
Action permanente favorable :	γ _{Genf}	1.00	-	Valeur norme XP G38-065
Hauteur de la couche de lestage :	H	7	m	
Longueur de la couche de lestage :	L	2.0	m	
Résistance ultime d'interaction du géosynthétique dans la zone de lestage :	R _{k,cd}	119.7	kN/m	
Vérification R _{k,cd} ≥ T _{max,ELS}	-	Oui	-	
Cas d'une grande déformation en surface (d _{s,max} > H/4)				
Facteur partiel pour la résistance au glissement d'interface :	γ _{RI,I}	1.35	-	Valeur norme XP G38-065
Action permanente favorable :	γ _{Genf}	1.00	-	Valeur norme XP G38-065
Hauteur de la couche de lestage :	H	7.0	m	
Longueur de la couche de lestage :	L	2.0	m	
Résistance ultime d'interaction du géosynthétique dans la zone de lestage :	R _{k,cd}	59.9	kN/m	
Vérification R _{k,cd} ≥ T _{max,ELS}	-	Non	-	
Recouvrements longitudinal et latéral des lés	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire
Portée du renforcement :	D	1	m	
Angle de frottement de l'interface sol-géosynthétique le plus défavorable :	δ _{sk}	30	°	
Angle de frottement de l'interface entre les deux lés de géosynthétique :	δ _{geo/geo}	14	°	Valeur norme XP G38-065
Longueur minimale nécessaire à la mobilisation des efforts d'ancrage (recouvrement longitudinal) :	L _{IL}	3	m	
Recouvrement latéral minimal :	L _{LI}	0.5	m	

Annexe 3. Fiche de calculs de l'étude de tassement

Cette annexe contient 2 pages.

PROFIL A (Zone 1)			Tassement grande échelle au droit de la zone 1 OM-OM
Hauteur compressible de déchets	$H_n(t_c)$	m	6
Coefficient de compression secondaire intrinsèque	$C_{\alpha\epsilon}$		0.12
Durée d'exploitation	t_c	ans	10
Date de fermeture		ans	1986
Hauteur virtuelle hors tassement	nh_0	m	6.4
Date de construction de l'ouvrage sur compressible	t	ans	2026
Facteur temps à la date de construction	t/t_c		5.00
Tassement relatif	$\epsilon(t)=w(t)/H_n(t_c)$	%	12.8%
Tassement secondaire réalisé à la date de constuction	$\epsilon(t)$	m	0.77
Date de fin de tassement		ans	2016
Facteur temps à la date de fin	t_f/t_c		4.00
Tassement relatif	$\epsilon(t_f)=w(t_f)/H_n(t_c)$	%	12.0%
Tassement secondaire final	$\epsilon(t_f)$	m	0.72
Tassement secondaire résiduel		m	0.00
Hauteur de surcharge en déchets		m	17.01
Surcharge totale (déchets + couverture)	$\Delta\sigma'$	kN/m ²	191.90
Module d'élasticité des déchets	E_i	Kpa	1500
Tassement primaire complémentaire lié à la surcharge		m	0.77
Tassement futur total		m	0.77

PROFIL B (Zone 2)			Tassement grande échelle au droit de la zone 2 OM-OM
Hauteur compressible de déchets	$H_n(t_c)$	m	8
Coefficient de compression secondaire intrinsèque	$C_{\alpha\epsilon}$		0.12
Durée d'exploitation	t_c	ans	14
Date de fermeture		ans	2000
Hauteur virtuelle hors tassement	nh_0	m	8.8
Date de construction de l'ouvrage sur compressible	t	ans	2026
Facteur temps à la date de construction	t/t_c		2.86
Tassement relatif	$\epsilon(t)=w(t)/H_n(t_c)$	%	9.5%
Tassement secondaire réalisé à la date de constuction	$\epsilon(t)$	m	0.76
Date de fin de tassement		ans	2030
Facteur temps à la date de fin	t_f/t_c		3.14
Tassement relatif	$\epsilon(t_f)=w(t_f)/H_n(t_c)$	%	10.0%
Tassement secondaire final	$\epsilon(t_f)$	m	0.80
Tassement secondaire résiduel		m	0.04
Hauteur de surcharge en déchets		m	16.26
Surcharge totale (déchets + couverture)	$\Delta\sigma'$	kN/m ²	184.40
Module d'élasticité des déchets	E_i	Kpa	1500
Tassement primaire complémentaire lié à la surcharge		m	0.98
Tassement futur total		m	1.02