

Digues de barranques et de lagunes d'exploitations minières en Guyane : Guide de bonnes pratiques

Rapport final

BRGM/RP- 61065 -FR
Avril 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011 et le soutien de la DEAL
Guyane

P. Bourbon, Ch. Mathon

Vérificateur :

Nom : Grandjean Gilles

Date : 17/04/2012

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Blum

Date : 24/04/12

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : digues, mine, orpaillage, bonnes pratiques, Guyane

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : BRGM/RP-61065-FR. Bourbon P., Mathon D., 2012. Dignes de barranques et de lagunes d'exploitations minières en Guyane : Guide de bonnes pratiques, 80 p.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le département de la Guyane est largement confronté aux problèmes environnementaux liés à l'exploitation de ses ressources minières. Une expertise réalisée en 2010 par le BRGM et pour le compte de la DRIRE (rapport BRGM RP-58778-FR), a mis en évidence les difficultés rencontrées par les professionnels de la filière aurifère pour la réalisation de leurs digues d'exploitations et pour les maintenir en bon état de fonctionnement. Pour ces ouvrages en terre, il a été constaté que certaines règles faisant appel à la pratique de la géotechnique n'étaient pas toujours bien prises en considération. Dans ce contexte, la création d'un guide technique à destination des exploitants miniers a été proposée dans le but d'apporter des conseils pour la réalisation des digues selon les règles de l'art, et de promouvoir l'amélioration des pratiques de construction et de maintenance de ces digues.

De manière générale, la réalisation des digues d'exploitations minières nécessite une réflexion globale faisant appel à de nombreuses compétences techniques. Dans le contexte guyanais, certaines spécificités locales amènent à considérer la réalité des moyens accessibles aux exploitants (ressources locales en matériaux de constructions, moyens techniques et humains, etc.), mais doivent cependant permettre la réalisation d'ouvrages de qualité pour une exploitation pérenne, conduite dans de bonnes conditions et respectueuse aussi bien pour l'Homme que pour l'environnement.

Après un aperçu succinct de la réglementation existante concernant les digues d'exploitations minières, le présent guide propose une certaine sensibilisation aux risques encourus lors du dysfonctionnement d'ouvrages et expose des principes généraux en termes de conception et de réalisation des digues d'exploitations minières dans le contexte guyanais. Les différences notables entre certaines exploitations, qu'elles soient de types primaires ou secondaires, imposent d'établir une distinction entre les ouvrages. Les différentes étapes qui mènent à la réalisation de ce type d'ouvrage, depuis le choix de son implantation, jusqu'à la détermination des conditions de son exécution, sont envisagées dans le but de conserver les caractéristiques nécessaires à leur maintien en bon état sur le long terme. Pour cela, la réalisation d'études géologiques et de reconnaissances géotechniques spécifiques apparaît comme une nécessité incontournable. En outre, au vu des conditions météorologiques locales, les exploitants miniers ne peuvent s'affranchir de mettre en place un dispositif de surveillance périodique pour permettre la meilleure réactivité possible pour la maintenance de ces ouvrages.

Les impacts économiques engendrés par des études spécifiques et par la mise en place d'une surveillance adaptée - périodicité accrue lors de précipitations ou de crues exceptionnelles - apparaissent comme négligeables en regard des pertes éventuelles en cas de ruine partielle voire de rupture des ouvrages.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Réglementation sur les digues d'exploitations minières en Guyane	11
2.1. CONTEXTE MINIER ET LEGISLATION.....	11
2.1.1.Rejets miniers et impacts environnementaux dans le milieu naturel	11
2.1.2.Digues d'exploitations minières	12
2.2. RECOMMANDATIONS POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES OU ASSIMILES EN REMBLAIS.....	15
2.2.1.Stabilité des ouvrages en remblais.....	15
2.2.2.Risques d'instabilités et responsabilités des exploitants	15
3. Dysfonctionnements et ruptures de digues	17
3.1. INSTABILITES GENERALES	17
3.1.1.Glisement de coteau	17
3.1.2.Poinçonnement du sol support	17
3.2. RUPTURES INTERNES	18
3.2.1.Mauvais dimensionnement géométrique et/ou matériaux de constitution inadaptés	18
3.2.2.Érosion interne	19
3.3. EROSION EXTERNE	19
3.3.1.Ruissellement des eaux pluviales	19
3.3.2.Submersion	20
3.4. BILAN DES PRINCIPALES CAUSES D'INSTABILITÉ DES DIGUES	20
4. Conception des bassins et ouvrages hydrauliques d'exploitations minières ..	23
4.1. ELEMENTS GENERAUX	23
4.2. PRINCIPES DE CONCEPTION DES BASSINS.....	23
4.2.1.Les bassins d'exploitations primaires	25
4.2.2.Les bassins d'exploitations secondaires	28
4.2.3.Généralités sur le dimensionnement hydraulique des bassins	29
4.3. LES DISPOSITIFS DE VIDANGES DE FOND	30
4.4. LES SURVERSEES	31

4.5. LES CANAUX DE DERIVATION.....	32
5. Etudes et constructions des digues d'exploitations minières	35
5.1. PRINCIPES GENERAUX POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES DIGUES.....	35
5.1.1. Justification des ouvrages et états limites	35
5.2. ETUDES DE RECONNAISSANCES DES SITES D'EXPLOITATION	37
5.2.1. Implantations des bassins.....	37
5.2.2. La reconnaissance géotechnique du site.....	39
5.2.3. Les matériaux d'emprunt.....	42
5.3. PRINCIPES DE BONNE PRATIQUE D'EXECUTION DES DIGUES	44
5.3.1. Les fondations.....	45
5.3.2. Les corps de digues.....	46
6. Gestion, surveillance et maintenance des ouvrages.....	59
6.1. GENERALITES	59
6.2. ENTRETIEN ET SUIVI DES OUVRAGES	59
6.2.1. Examen visuel.....	60
6.2.2. Suivi piézométrique.....	60
6.2.3. Mesure des déformations.....	60
6.3. ENTRETIEN ET TRAITEMENTS DES DESORDRES.....	61
6.3.1. Entretien périodique	61
6.3.2. Le traitement des désordres	61
6.4. CAS PARTICULIERS DES DIGUES D'EXPLOITATIONS SECONDAIRES.....	62
7. Conclusion.....	63
8. Bibliographie	65

Liste des illustrations

Figure 1 : tableau de classification des digues.	13
Figure 2 : tableau de présentation des prescriptions obligatoires à réaliser suivant les classes des digues.	14
Figure 3 : coupe schématique d'une surface de glissement au niveau d'un remblai réalisé sur sol mou (G. Philipponnat, B. Hubert, 2008).	18
Figure 4 : Tableau récapitulatif des différents types d'instabilités et de leurs principales causes associées.	21
Figure 5 : représentation schématique des trois types de configuration des bassins (C. Bernhard, G. Degoutte).	24
Figure 6 : exemples types d'évolution d'une digue de stockage de résidus (a - méthode amont ; b - méthode centrale ; c - méthode aval).	26
Figure 7 : photo illustrant la coupe type du terrain au niveau d'une barranque (en cours d'exploitation avec double table).	28
Figure 8 : Coupe schématique d'un bassin de type parc à résidus, équipé d'un dispositif de vidange de fond (illustration tirée du rapport IDM TETHYS, 2012).	31
Figure 9 : Coupe schématique d'une digue au niveau d'une surverse.	32
Figure 10 : Photo d'un canal de dérivation creusé dans le terrain naturel et encadré par des « levées de terre ».	33
Figure 11 : schémas types de barrages homogènes en terre, avec différents systèmes de drainage.	49
Figure 12 : schéma de rupture dans la méthode amont (a) et coupe TALREN (b).	52
Figure 13 : Schéma de réalisation des digues successives dans la méthode amont pour les parcs à résidus.	53
Figure 14 : Schéma de la méthode d'utilisation de matériaux graveleux dans le corps de digue.	56
Figure 15 : Coupe schématique du système de captage des eaux de ruissellement dans le cas d'un bassin situé le long d'une pente (C. Bernhard, G. Degoutte).	58

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau récapitulatif des actions à mener pour l'élaboration et la surveillance des digues d'exploitations minières.	67
Annexe 2 Classification et enchainement des missions géotechniques (NF P94-500)	71

1. Introduction

Le département de la Guyane est largement confronté aux problèmes environnementaux liés à l'exploitation de ses ressources minières. Une expertise réalisée en 2010 par le BRGM et pour le compte de la DRIRE (rapport BRGM RP-58778-FR), a mis en évidence les difficultés rencontrées par les professionnels de la filière aurifère pour la réalisation de leurs digues d'exploitations et pour les maintenir en bon état de fonctionnement. Pour ces ouvrages en terre, il a été constaté que certaines règles faisant appel à la pratique de la géotechnique n'étaient pas toujours bien prises en considération. Dans ce contexte, la création d'un guide technique à destination des exploitants miniers a été proposée dans le but d'apporter des conseils pour la réalisation des digues selon les règles de l'art, et de promouvoir l'amélioration des pratiques de construction et de maintenance de ces digues.

Dans le cadre de sa mission de service public, à la demande du Ministère de l'écologie, du développement durable, du transport et du logement (MEDDTL), représenté par la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL), le BRGM s'est engagé à élaborer un « guide de bonnes pratiques » permettant aux opérateurs miniers de disposer d'un document regroupant les principales règles techniques à respecter, en distinguant le cas des exploitations de type primaire de celui des exploitations de type alluvionnaire.

Le présent guide est constitué de plusieurs parties comprenant :

- un rappel sur la réglementation en vigueur en matière de construction et de maintenance des digues d'exploitations minières ;
- une description des différentes causes de dysfonctionnements des digues en terre ;
- une présentation des différents types d'ouvrages hydrauliques d'exploitations minières ainsi que les principes généraux pour le dimensionnement des bassins ;
- des éléments de conception et d'exécution des ouvrages avec une formalisation des principales règles de l'art à respecter, en adaptant les préconisations techniques générales au contexte local ;
- des éléments sur le dispositif de surveillance à adopter et quelques exemples de mesures de confortement en cas de dysfonctionnement.

2. Réglementation sur les digues d'exploitations minières en Guyane

2.1. CONTEXTE MINIER ET LEGISLATION

2.1.1. Rejets miniers et impacts environnementaux dans le milieu naturel

L'exploitation aurifère est le deuxième secteur économique en Guyane, après l'industrie spatiale. Cependant, sans mesures de précautions adaptées, elle peut poser certains problèmes environnementaux, notamment par le rejet parfois incontrôlé des eaux de process¹ qui ont pour conséquence de polluer les milieux aquatiques.

Pour faciliter la séparation du minerai et des grains, les matériaux exploités sont pulvérisés ou lavés à l'eau, entraînant ainsi une mise en suspension des particules les plus fines. Les eaux turbides ainsi recueillies en sortie de process doivent par conséquent être traitées avant leur évacuation dans le milieu naturel. Pour tenter de remédier à cet état de fait et dans le but d'abaisser la concentration des MES², les exploitants doivent mettre en place des bassins de décantation pour les eaux de process avant leur rejet dans le milieu naturel.

Le code de l'environnement définit le règlement applicable concernant l'eau et les milieux aquatiques. Il a pour objet de garantir la gestion équilibrée et durables des ressources en eau, notamment dans le souci du respect des intérêts mentionnés à l'article L. 211-1 et des prescriptions édictées dans les articles L. 211-2 et L. 211-3.

Concernant les rejets miniers, ce règlement fixe notamment à un seuil de 35 mg/l la valeur en concentration de MES au-delà duquel elle est considérée comme fortement nuisible au développement des organismes aquatiques, il stipule de plus que l'augmentation de MES entre l'amont et l'aval d'une exploitation ne doit pas dépasser 25 %.

De plus, afin de limiter les prélèvements d'eau dans le réseau hydrographique naturel, les arrêtés d'autorisation d'exploitation imposent aux professionnels d'établir un fonctionnement en circuit fermé, c'est-à-dire de mettre en place un dispositif de recyclage de l'eau dans le but d'être réutilisée vers les installations de traitement.

¹ Eau de process : appellation de l'eau utilisée lors des travaux d'exploitation.

² MES : matières en suspension.

Toutes ces prescriptions ont pour seul but de préserver au mieux le milieu aquatique du réseau hydrographique naturellement présent dans les sites d'exploitations.

2.1.2. Digues d'exploitations minières

Les digues d'exploitations minières sont des ouvrages considérés comme des installations de protection qui peuvent nuire à l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau.

Le décret 2002-202 du 13 février 2002 modifiant le décret 93-743 introduit à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration, la rubrique 2.5.4 "installations, ouvrages, digues ou remblais dans le lit majeur d'un cours d'eau", inscrivant ainsi le contrôle de la sécurité des digues dans le cadre de la police de l'eau.

Le code de l'environnement précise les objets et obligations en termes de gestions des ouvrages de protection, incluant les digues :

- Toute digue est soumise aux articles L. 214-1 et L. 214-2 du code de l'environnement, dont les textes réglementaires encadrent l'intervention des services chargés de la police de l'eau dans le domaine de la sécurité publique.
- L'article L 214-3 prévoit que les installations, ouvrages, travaux et activités susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publique, de nuire au libre écoulement des eaux, ou d'accroître notablement le risque d'inondation, sont soumis à autorisation de l'autorité administrative. Cette autorisation peut être retirée ou modifiée, sans indemnité de la part de l'Etat exerçant ses pouvoirs de police, pour prévenir ou faire cesser les inondations ou en cas de menace pour la sécurité publique ou lorsque les ouvrages ou installations sont abandonnés ou ne font plus l'objet d'un entretien régulier.
- L'article L. 214-3-1 prévoit, lorsque des installations, ouvrages, travaux ou activités sont définitivement arrêtés, d'imposer à l'exploitant ou au propriétaire de remettre le site dans un état tel qu'aucune atteinte ne puisse être portée à l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau.
- L'article L. 214-7 indique que les mesures individuelles et réglementaires prises en application du titre 1er du livre V fixent les règles applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), ayant un impact sur le milieu aquatique, notamment en ce qui concerne leurs rejets et prélèvements.

Le décret d'application n° 2007-1735 du 11 décembre 2007, porté sur la sécurité des ouvrages hydrauliques de type digue, définit les classes A, B, C, D, en fonction des caractéristiques de hauteur et de population protégée :

- L'article R. 214-113 précise la nomenclature des classes des digues de protection contre les inondations et submersions et des digues de rivières canalisées (ci-après désignées "digues"). Elles sont définies dans le tableau ci-dessous :

CLASSE	Caractéristiques de l'ouvrage et population protégée
A	$H \geq 1$ et $P \geq 50\ 000$
B	Ouvrage non classé en A et $H \geq 1$ et $1000 \leq P < 50000$
C	Ouvrage non classé en A ou B et $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1000$
D	$H < 1$ ou $P < 10$

Figure 1 : tableau de classification des digues.

- L'article R. 214-114 prévoit que, par décision motivée, le préfet peut modifier le classement d'un ouvrage s'il estime que le classement résultant de l'article R. 214-113 n'est pas de nature à assurer la prévention adéquate des risques qu'il crée pour la sécurité des personnes et des biens.
- Les articles R. 214-115 à R. 214-151 définissent certaines obligations en termes d'études et de surveillance. Ils prévoient de faire réaliser aux propriétaires des études de dangers dont le contenu est précisé dans l'arrêté du 12 juin 2008. De plus, ils énoncent les modalités pour le dossier de l'ouvrage, les visites techniques, rapports de surveillance et revues de sureté obligatoires à faire réaliser, ainsi que leurs fréquences selon les classes des digues. La définition et le contenu du dossier de l'ouvrage obligatoire est également précisé dans l'arrêté du 29 février 2008. Ce dossier doit recenser l'historique de la construction de l'ouvrage, ses caractéristiques et les événements survenus (désordres ou travaux). Ces prescriptions sont résumées dans le tableau page suivante :

Classe de la digue	A	B	C	D
Hauteur (m)	≥ 1 m	≥ 1 m	≥ 1 m	< 1 m
Population concernée (hab)	≥ 50000	1000 à 49999	10 à 999	< 10
Revue de sûreté	oui (10 ans)	oui (10 ans)	non	non
Dossier de l'ouvrage	oui	oui	oui	oui
Visite technique approfondie (VTA)	1 an	1 an	2 ans	5 ans
Rapport de surveillance	1 an	5 ans	5 ans	non
Consignes écrites	oui	oui	oui	oui
Etude de danger	oui	oui	oui	non

Figure 2 : tableau de présentation des prescriptions obligatoires à réaliser suivant les classes des digues.

Diverses circulaires précisent encore l'organisation des gestionnaires ou organismes de contrôle, et définissent certaines obligations à respecter par les propriétaires, notamment :

- La circulaire du 8 juillet 2008 du ministère en charge de l'Écologie annule et remplace les circulaires 70-15 du 14 août 1970, elle rappelle et précise le rôle des préfets et des services déconcentrés de l'État en matière de contrôle de la sécurité des digues et barrages au titre du décret du 11 décembre 2007.
- Une Circulaire du 31 juillet 2009 précise encore l'organisation du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques.

NB : La liste des articles et texte énoncés ici est donnée à titre indicatif et n'est pas complète. Compte tenu de la législation en vigueur, nous conseillons aux différents

intervenants d'aller consulter ces textes dans leur intégralité ainsi que d'autres textes complémentaires concernant les digues³.

2.2. RECOMMANDATIONS POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES OU ASSIMILES EN REMBLAIS

2.2.1. Stabilité des ouvrages en remblais

Dans les exploitations minières en Guyane, les digues des bassins de décantation et de stockage sont généralement constituées en remblais. Les pratiques françaises ainsi que les publications professionnelles disponibles en matière de justification des ouvrages hydrauliques en remblai sont peu nombreuses et relativement hétérogènes.

Les « Eurocodes » sont un ensemble de normes destinées à proposer un cadre commun pour la conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Concernant les calculs géotechniques, l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1), reste peu précis pour ce qui relève du domaine des ouvrages hydrauliques en remblai et ne constitue donc pas un cadre intégré de justification pour les ouvrages qui nous concerne.

Néanmoins, le CFBR⁴ a récemment publié un texte de recommandation⁵ visant à harmoniser les pratiques de justification qui étaient jusqu'alors sensiblement variables d'un document à l'autre. Ces recommandations concernent tous les types de barrages et de digues réalisés en remblai. Ce document définit, de manière assez détaillée et complète, les propriétés mécaniques des matériaux, l'importance des paramètres hydrauliques et les mécanismes d'interactions sol-ouvrages. En termes d'exécution, quelques recommandations y sont incluses ; il convient tout de même d'y apporter certaines adaptations liées au contexte amazonien.

2.2.2. Risques d'instabilités et responsabilités des exploitants

Les propriétaires des digues de protection ont une certaine responsabilité, tant civile que pénale, en cas de dommages occasionnés par l'ouvrage (cf. articles 1382 à 1384 et 1386 du code civil).

La responsabilisation de chaque intervenant dans la construction des digues de protection constituent des éléments majeurs en termes de qualité et de sécurité des

³ Textes en lignes sur <http://www.legifrance.gouv.fr>.

⁴ CFBR : Comité Français des Barrages et des Réservoirs.

⁵ Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai (juin 2010).

ouvrages. Un même coefficient de sécurité appliqué pour deux ouvrages distincts peut entraîner des degrés de sécurité réels bien différents. Ceci tient au caractère approximatif et fortement variable des données géotechniques pouvant être prises en compte.

D'une manière générale, afin de réduire au maximum le risque de rupture ou de dysfonctionnement, pouvant entraîner la réalisation de travaux importants voire même l'arrêt momentané de la production, il apparaît nécessaire de s'assurer de la qualité des hypothèses de départ en récoltant soigneusement les données géologiques, géotechniques et hydrologiques d'un site, et de considérer correctement les conditions d'exécution. Il est donc essentiel de rappeler la nécessité de se prémunir des services d'ingénieurs qualifiés et expérimentés pour garantir la stabilité des ouvrages et dans tous les cas limiter au maximum les risques encourus.

Ces études doivent être raisonnablement proportionnées à l'échelle du projet ainsi qu'à son contexte.

3. Dysfonctionnements et ruptures de digues

Le dysfonctionnement ou la rupture d'une digue au sein d'une exploitation minière sont des problèmes majeurs pour la sécurité des personnes, la rentabilité de l'exploitation mais également pour l'environnement. Dans de nombreux cas, les dysfonctionnements que l'on peut observer sont susceptibles de s'aggraver avec le temps et d'engendrer des dommages pouvant aller jusqu'à la rupture partielle, voire la ruine complète des ouvrages concernés.

Deux principales causes peuvent être à l'origine de l'instabilité d'une digue : cela peut être lié à un mauvais dimensionnement géométrique, mais également à des malfaçons en termes d'exécution des travaux.

Les différentes pathologies qui peuvent affecter ces ouvrages sont les suivantes :

- rupture due à l'instabilité générale des terrains (sol-support ou terrains environnants immédiats) ;
- rupture par défaut de construction (écoulements à travers le corps de la digue ou à travers le sol de fondation) ;
- rupture par submersion lors d'évènements occasionnels ou exceptionnels.

3.1. INSTABILITES GENERALES

3.1.1. Glissement de coteau

Les bassins d'exploitations minières sont parfois réalisés à flanc de coteau, ce qui conduit à un meilleur rapport volume stocké/volume de la digue (cf. §.5.2.1.a). Dans ce cas, la gestion du ruissellement est plus complexe, et un apport plus important d'eau de ruissellement est inévitable. En outre, de sérieux problèmes de stabilité à grande échelle peuvent se poser si le flanc du coteau se met à glisser en raison des nouvelles conditions hydrauliques et de chargement créées par l'exécution de la digue et du stockage.

3.1.2. Poinçonnement du sol support

Il n'est pas rare de constater la présence d'instabilités au niveau des fondations des digues d'exploitations minières. Celles-ci sont provoquées par une mauvaise adaptation de l'ouvrage au terrain (sols impropres, remaniés, etc.).

Pour une digue fondée sans adaptations particulières sur sol argileux mou, vasard, ou présentant des caractéristiques mécaniques très médiocres, la surcharge apportée par le poids de la digue peut provoquer le poinçonnement de la couche molle et conduire à la déstabilisation de l'ensemble digue/sol de fondation :

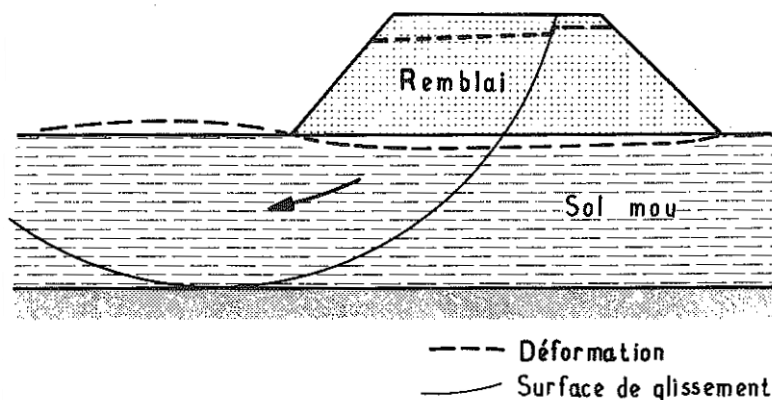


Figure 3 : coupe schématique d'une surface de glissement au niveau d'un remblai réalisé sur sol mou (G. Philipponnat, B. Hubert, 2008).

Etablir un remblai sur un sol argileux peu consolidé peut tout de même être envisagé, par exemple en adaptant la vitesse de construction de la digue au temps de consolidation de la couche argileuse, mais c'est très peu compatible avec les impératifs miniers guyanais.

Les tassements différentiels sont un autre phénomène préjudiciable à la stabilité des digues. Ils sont dus à l'hétérogénéité des sols de fondation en termes de consolidation et de portance et peuvent provoquer des fissures dans les corps de digues qui, par contraste de perméabilité, favoriseront les phénomènes d'érosion régressive (renard) par les eaux retenues par la digue ou/et contenues dans les stériles non essorés, et *in fine* leur rupture.

3.2. RUPTURES INTERNES

3.2.1. Mauvais dimensionnement géométrique et/ou matériaux de constitution inadaptés

L'état de stabilité d'une digue s'apprécie dans le cas général par la valeur de son « facteur de sécurité » vis-à-vis des glissements (cf. § 5.1.1). Il est fonction de la géométrie de la digue – hauteur, largeur en crête, pentes de ses parements amont et

aval – et des caractéristiques mécaniques intrinsèques de ses matériaux constitutifs, lesquelles sont fonction de la nature de ces matériaux et de la qualité de leur mise en œuvre. Lorsque la digue est en « fonctionnement », qu'il s'agisse d'une digue à stériles ou d'une digue finale de rétention d'eau claire de process, elle est le siège d'écoulements d'eau qui modifient ses caractéristiques mécaniques et pondérales, avec pour premier effet d'abaisser le « facteur de sécurité » vis-à-vis d'un glissement vers l'aval. Il faut donc maîtriser à la fois la géométrie de la digue, les caractéristiques de ses matériaux constitutifs et la géométrie de la ligne de saturation associée aux infiltrations des eaux retenues, pour que la sécurité vis-à-vis des glissements soit assurée.

3.2.2. Érosion interne

L'érosion interne, ou régressive, plus communément connue sous l'appellation « renard hydraulique », a pour origine la non imperméabilisation du parement amont des digues et/ou la perméabilité relative de l'encaissant de la digue. Les gradients hydrauliques créés par les circulations d'eau dans le corps de digue et son sous-bassement peuvent provoquer une déstabilisation des particules de sol les plus fines et leur migration vers l'aval. Il s'agit là d'un phénomène d'entraînement régressif pouvant conduire à des fuites brutales, et *in fine* à la ruine partielle ou totale de la digue. Les augmentations locales de perméabilité, qu'elles soient dues à des hétérogénéités dans la qualité/mise en place des matériaux ou à des fissures de traction résultant de déformations (tassements différentiels), peuvent favoriser et accélérer ce type de phénomène.

Plusieurs cas de ruptures de digue dues à l'érosion régressive à travers les digues et leurs fondations ont été répertoriés (Foster et al., 2000). Pour les digues de retenue de résidus miniers, un cas souvent cité est celui survenu en 1995 sur le site Omai au Guyana (Vick, 1996; 1997).

Afin de réduire les risques d'érosion régressive, des dispositions doivent être prises pour diminuer le gradient hydraulique. La mise en place de drains et filtres adéquatement dimensionnés et situés constitue un moyen efficace pour contrer le risque d'érosion régressive.

3.3. EROSION EXTERNE

3.3.1. Ruissellement des eaux pluviales

Le ruissellement des eaux pluviales sur les parements et leurs banquettes peut initier le développement de ravines qui, si elles ne sont pas stabilisées, peuvent provoquer la formation de brèches génératrices de glissements voire de fuites très destructrices dans les digues. La prévision du développement d'une brèche reste délicate. Un

système de drainage adapté permettant de canaliser les eaux de ruissellement et de les rejeter à distance des pieds de la digue est de nature à limiter cette érosion qu'il demeure difficile de contenir totalement au vu des conditions météorologiques en Guyane. Des travaux additionnels en cours d'exploitation peuvent s'avérer nécessaires pour assurer aux ouvrages leur stabilité à court et moyen terme.

La végétalisation ou/et la mise en place d'un géotextile sont généralement considérées comme des moyens efficaces pour prévenir l'érosion de surface. La réussite de leurs mises en œuvre n'est cependant pas assurée dans un contexte d'exploitation minière aurifère en Guyane (l'herbe s'installe mal sur les matériaux utilisés en remblai et les géotextiles sont rapidement dégradés par le rayonnement U.V. s'ils ne sont pas protégés).

3.3.2. Submersion

L'érosion du parement aval par surverse au-dessus de la crête de la digue conduit en général rapidement à une brèche. Saturé d'eau, le parement est soumis à des glissements régressifs susceptibles de conduire rapidement à la ruine complète de l'ouvrage.

L'hétérogénéité dans la compacité du remblai est un facteur aggravant. Un profil en long irrégulier peut également induire des effets de surverse accrus aux niveaux des points bas de la crête. Il est donc nécessaire de prévoir des systèmes d'évacuateurs d'eau suffisants pour éviter dans tous les cas un déversement des eaux ou des boues par-dessus la digue.

3.4. BILAN DES PRINCIPALES CAUSES D'INSTABILITÉ DES DIGUES

Les différentes instabilités que l'on peut rencontrer dans les digues d'exploitations minières peuvent être la conséquence de plusieurs paramètres. A titre indicatif, le tableau suivant présente les principales causes des instabilités majeures rencontrées :

Types d'instabilités	Causes
Débordement en crête	Mauvaise conception hydrologique ou hydraulique Tassement de la crête
Instabilité des talus	Contraintes excessives dans le sol de fondation Contraintes excessives dans le remblai de la digue Contrôle inadéquat des pressions d'eau

Erosion régressive	Mauvais contrôle des débits de percolation Mauvaise conception du filtre et du drain Mauvaise conception ou contrôle insuffisant des travaux de mise en place, conduisant à des fissures ou à des chemins de percolation (p.ex. à proximité des conduites de fond)
Erosion externe	Mauvaise protection des talus, du pied et de la digue de retenue

Figure 4 : Tableau récapitulatif des différents types d'instabilités et de leurs principales causes associées

4. Conception des bassins et ouvrages hydrauliques d'exploitations minières

4.1. ELEMENTS GENERAUX

Les bassins sont des ouvrages nécessaires au fonctionnement des exploitations minières, y compris en Guyane. Ils ont pour but non seulement de contenir le stockage des résidus solides issus des matériaux traités, après extraction de la fraction minérale, mais également de permettre la constitution de réserves en eaux claires nécessaires au procédé d'exploitation (laverie des matériaux). De plus, pour pouvoir fonctionner en circuit fermé, les eaux de procédés doivent nécessairement être traitées pour être recyclées lors du traitement des matériaux.

Ainsi, les bassins de stockage des résidus fonctionnent comme premiers bassins de décantation pour ces eaux de procédés qui vont ensuite s'écouler vers d'autres bassins pour une décantation secondaire. L'eau ainsi clarifiée pourra donc être ensuite redirigée par pompage vers les usines de traitement des matériaux.

4.2. PRINCIPES DE CONCEPTION DES BASSINS

Pour des raisons économiques, les bassins d'exploitations destinés à recevoir les rejets d'exploitations doivent être situés au plus proche des usines de traitement (sites primaires) ou des « sluices⁶ » (sites secondaires).

La réalisation de ces bassins peut être envisagée de trois différentes manières :

- par creusement et évacuation des déblais ;
- par creusement et endiguement ;
- par création de digues ceinturant le bassin.

⁶ Sluice : tables de lavage qui travaillent avec la force hydraulique pour évacuer les stériles et concentrer les minéraux lourds piégés par des moquettes, tasseaux ou rainures

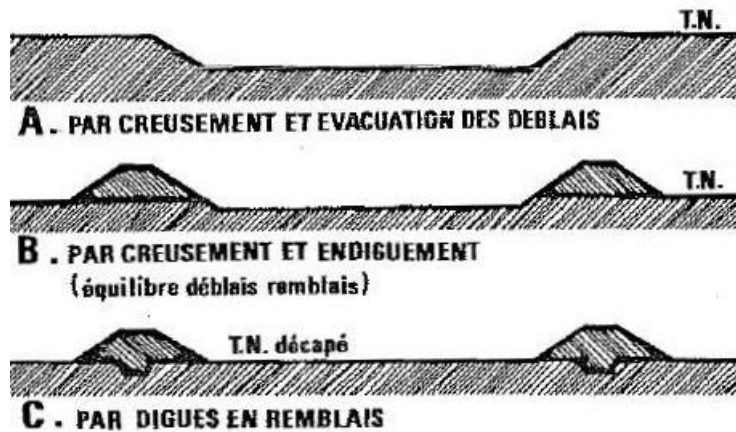


Figure 5 : représentation schématique des trois types de configuration des bassins (C. Bernhard, G. Degoutte).

L'orientation vers l'une ou l'autre de ces configurations est liée en grande partie à la morphologie du site d'implantation et au volume nécessaire pour l'exploitation. Des considérations géologiques et hydrologiques doivent également être prises en compte pour optimiser les conditions d'exécution des ouvrages (cf. § 5.2).

Les différentes méthodes d'exploitations (primaires / secondaires) vont présenter des spécificités qui entraînent une utilisation de l'espace ou des techniques d'exécution bien différentes. Ainsi, les bassins des sites miniers primaires, conçus pour une utilisation sur le long terme, vont de par leur taille pouvoir s'adapter plus facilement la morphologie naturelle des reliefs. Dans les sites secondaires, ce sont les barranques⁷ qui, à court terme, sont utilisées pour constituer les bassins de décantation. Dans ces exploitations, des « tas de terre » sont déposés sur le pourtour des bassins de décantation en guise d'endiguement de protection.

⁷ Barranque : terme employé pour désigner les fosses d'extraction où sont prélevés les matériaux aurifères.

4.2.1. Les bassins d'exploitations primaires

a- Les parcs à résidus

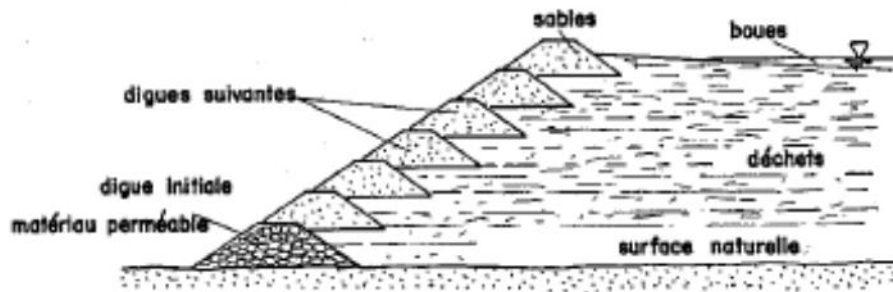
Les résidus d'exploitations minières sont généralement évacués sous forme d'une pulpe⁸ contenant de 10 à 30 % en poids de matériaux solides, et dont la granulométrie varie des sables aux argiles.

Après extraction et lavage des matériaux, ces déchets miniers stériles sont envoyés dans des bassins en vue de leur stockage. Un cône de déjection très étalé va se former immédiatement en aval du rejet dans le bassin, en général à l'opposé de la digue de fermeture. Dans ces résidus, le granoclassement est d'autant plus prononcé que le point de rejet se trouve éloigné des digues du bassin. Les distances de sédimentation des particules dépendent pour l'essentiel de leur diamètre, mais également du débit du rejet. Toute chose étant égale par ailleurs, les particules les plus grossières se déposeront plus rapidement que les fines. Il s'ensuit que le parement amont des digues – si elles sont suffisamment éloignées du point de rejet - sera en général recouvert par des sédiments plus fins, ce qui favorise leur imperméabilisation (ce qui est particulièrement le cas pour les premières levées).

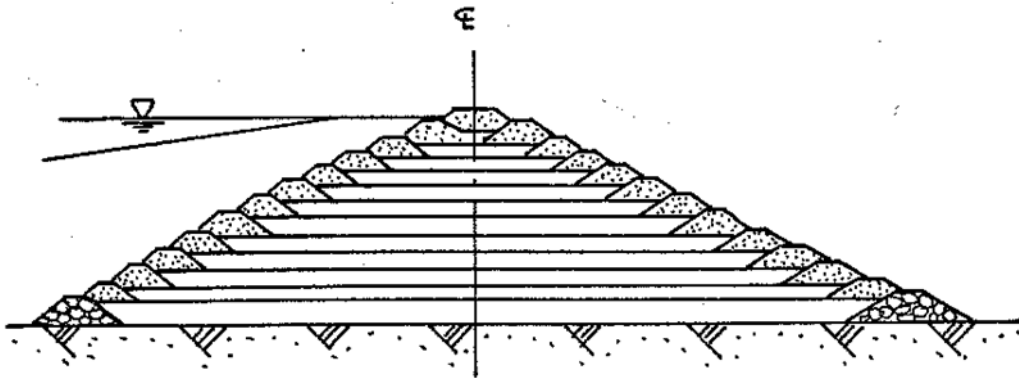
La principale caractéristique de ces bassins est donc la répartition non homogène des dépôts stockés.

L'augmentation du volume de résidus d'exploitation, au fur et à mesure des apports de l'usine de traitement d'une mine primaire, nécessite une augmentation de la capacité des bassins de stockage. Cela implique généralement une construction par étapes avec des rehaussements successifs, pouvant être exécutés selon trois méthodes distinctes :

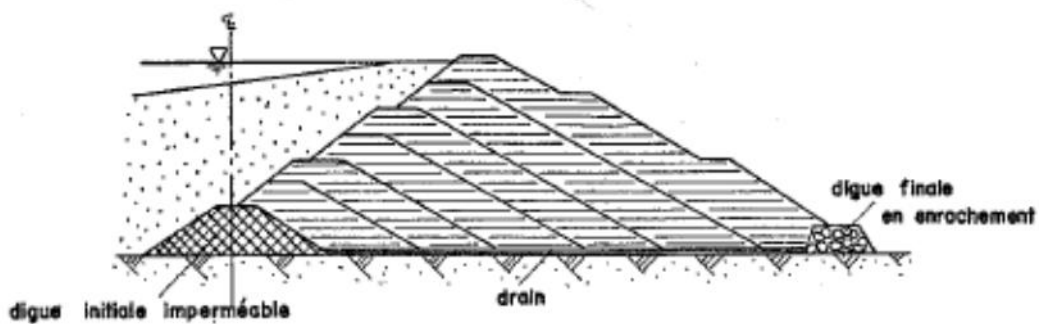
⁸ Pulpe : boue de lavage composée d'eau mélangée avec les résidus miniers, de tailles variables.



6-a : méthode amont



6-b : méthode centrale



6-c : méthode aval

Figure 6 : exemples types d'évolution d'une digue de stockage de résidus (a - méthode amont ; b - méthode centrale ; c - méthode aval).

b- Bassins de décantation secondaire

Situés au niveau des sorties de parcs à résidus, les dispositifs de traitement (décantation secondaire) et de stockage des eaux, peuvent être composés d'un ou plusieurs bassins successifs. En augmentant le temps de résidence des eaux de procédés, ces bassins permettent une meilleure clarification des eaux en favorisant le dépôt des particules les plus fines (colloïdes⁹).

Le bassin situé le plus en aval permet le stockage des eaux claires qui, conformément à la réglementation, seront utilisées pour le fonctionnement en circuit fermé de l'exploitation.

Ces bassins de décantation secondaire et de stockage sont liés hydrauliquement entre eux, soit par l'intermédiaire de dispositifs de vidange de fond¹⁰, soit de surverse¹¹. Ces équipements permettent de réguler le niveau des eaux (cf.4.2.1 & 4.2.3). Le bassin de stockage des eaux claires doit être équipé d'un évacuateur de crues¹² pour conserver une hauteur minimale à la revanche¹³ du bassin.

Pour des raisons techniques, la réalisation de rehaussements successifs pour les bassins de décantation secondaire et de stockage est très délicate en appliquant la méthode amont. Les méthodes centrale et avale sont quant à elles fortement contraignantes économiquement.

Afin d'éviter toutes modifications après démarrage de l'exploitation, il convient donc de définir une géométrie définitive de ces bassins dès leur conception. La capacité nécessaire pouvant être elle-même évolutive, des prévisions sur le long terme doivent être envisagées. Il apparaîtra certainement plus économique d'envisager la création d'un autre bassin si d'importantes évolutions non prévues en termes de capacités étaient nécessaires au cours de l'exploitation de la mine.

⁹ Colloïde : dispersion homogène de particules dans un fluide dont les dimensions vont de 2 à 2000 nanomètres.

¹⁰ Vidange de fond : équipement permettant de récolter les eaux de surface du bassin et de les canaliser vers l'extérieur du bassin. Ce dispositif doit être réglable pour permettre l'abaissement du niveau pour l'entretien ou en cas de situation d'urgence.

¹¹ Surverse : sorte de brèche située au niveau du corps d'une digue, qui régule le niveau de l'eau dans une retenue en permettant au surnageant d'un bassin d'être évacué.

¹² Evacuateur de crues : chenal ouvert dans le terrain naturel en marge de la digue, qui permet notamment de gérer l'augmentation du niveau des eaux en cas d'événement pluvieux exceptionnel.

¹³ Revanche : hauteur entre le niveau d'eau d'un bassin et de la crête de la digue de protection.

4.2.2. Les bassins d'exploitations secondaires

En Guyane, les exploitations secondaires sont généralement de type alluvionnaire. Dans ces exploitations, les matériaux minéralisés sont extraits du flat¹⁴ après détournement du cours d'eau, décapage de la terre végétale et excavation de l'horizon stérile. Une fois que les matériaux comprenant la fraction aurifère ont été extraits, les barranques sont ensuite utilisées comme bassins de décantation des eaux de procédés et de stockage des résidus miniers.

Autour des barranques, les stériles sont – en partie ou en totalité – déposés sous forme de levées de terres sur une hauteur de quelques mètres maximum (3 à 4 m - cf. figure 7). Ces dispositifs peuvent permettre de séparer par exemple deux bassins de décantation adjacents (augmentation du cheminement de l'eau permettant la clarification), ou d'assurer une certaine protection contre les crues et les débordements d'eau, afin d'éviter la contamination du réseau hydrographique naturel par libération d'eaux turbides provenant de l'exploitation.

Au fur et à mesure de la progression des travaux d'extraction, d'autres barranques sont de nouveau creusées puis exploitées. Le temps d'exploitation d'une barranque peut durer de une à plusieurs semaines, soit une durée de vie très courte des ouvrages dans ce type d'exploitation.



Figure 7 : photo illustrant la coupe type du terrain au niveau d'une barranque (en cours d'exploitation avec double table).

¹⁴ Flat : volume sédimentaire d'une plaine alluviale (terrasses + lit d'un cours d'eau).

4.2.3. Généralités sur le dimensionnement hydraulique des bassins

NB : *Ce paragraphe expose de manière générale certains éléments relatifs au dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Chaque site d'exploitation étant un cas d'espèce, des études spécifiques doivent être réalisées afin de déterminer les caractéristiques devant être associées à chaque ouvrage (crue de référence, débits, sections, superficie, volume, etc.).*

Le dimensionnement des bassins d'exploitations nécessite de définir les volumes nécessaires pour :

- le stockage des stériles (cas des parcs à résidus) ;
- obtenir un temps de résidence suffisant pour une clarification suffisante des eaux (décantation secondaire).
- le stockage de la quantité d'eau nécessaire au fonctionnement de la mine (cas des bassins d'eaux claires) ;

D'une manière générale, pour le stockage de l'eau ou des résidus, les quantités nécessaires et donc les volumes considérés sont généralement établis par l'exploitant. En revanche, les bassins de décantation sont tributaires de l'objectif d'abattement des MES (cf. § 2.1).

Le dimensionnement hydraulique des bassins d'exploitation doit être adapté à chaque site (nature des terrains, conditions hydrologiques, topographie, ...), ainsi qu'aux outils d'exploitation (pompes, etc.). Les conditions hydrologiques des sites, dépendantes en particulier de leur morphologie, doivent être étudiées pour optimiser l'efficacité des bassins. Pour cela, le bilan hydrique des bassins doit être défini en tenant compte des apports d'eau (précipitation, ruissellement, décharge d'autres bassins, eau résiduelle dans la pulpe, etc.), des pertes (évaporation, percolation dans le sol et écoulement dans les digues, débit de l'effluent final, eau re-circulée, etc.), et du volume emmagasiné.

Ainsi, les paramètres à considérer pour établir ce dimensionnement sont :

- le ruissellement ;
- le débit d'entrée des boues de laverie et le débit de pompage en sortie ;
- le temps de décantation des eaux de process (fonction des caractéristiques des matériaux traités) ;
- le régime hydrologique local ;
- la hauteur des précipitations ;
- la cote atteinte par la crue de référence au droit du site considéré.

Certains de ces paramètres doivent être définis lors de l'établissement des dossiers réglementaires d'exploitation.

L'ouvrage existant sur l'« évaluation des débits caractéristiques sur les bassins versants non jaugés en Guyane » établi par la DIREN (Brochard F., Montfort M., 2008), est un outil permettant l'évaluation des conditions hydrologiques de manière spécifique. Une étude réalisée en 2010 par le bureau d'étude H2E sur le dimensionnement des bassins de décantation peut également être un outil permettant d'aider les exploitants à définir les dimensions de leurs bassins d'exploitation. Par ailleurs, le projet FINE (en cours de réalisation par le BRGM), devrait permettre d'optimiser les temps de clarification des eaux de process et donc la taille des bassins de décantation, notamment lorsque celle-ci s'avère problématique (ajout de coagulants et/ou de floculants pour accélérer la décantation des colloïdes).

4.3. LES DISPOSITIFS DE VIDANGES DE FOND

Le dispositif de vidange de fond d'un bassin permet la collecte de l'eau dans un bassin pour pouvoir abaisser le niveau de l'eau dans le cas d'un entretien ou d'une situation d'urgence (cf. figure 8).

Les équipements de ce type doivent être nécessairement mis en place lors de l'édification de la digue. La partie verticale, réglée à l'affleurement du fil d'eau, permet d'optimiser la qualité de l'eau évacuée (eau plus clarifiée en surface).

Cependant, les risques d'écoulements préférentiels de l'eau au niveau du contact tuyau-corps de digue impliquent une mise en œuvre délicate. La réalisation de collerettes autour du tuyau à intervalles réguliers permet de limiter ces écoulements. De plus, au vu des risques en cas de colmatage du tuyau dans le corps de digue, une vigilance doit être observée au niveau de sa sortie côté aval.

Les sections seront à définir suivant les conditions d'exploitation, et selon les considérations de site.

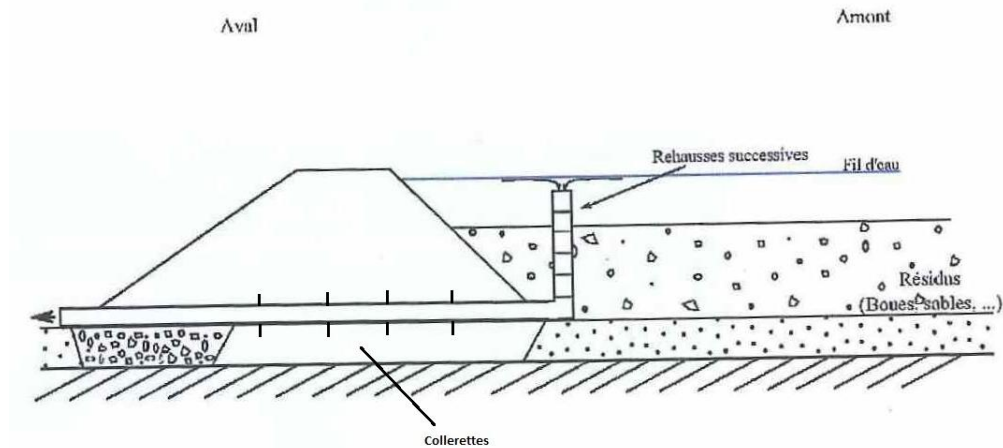


Figure 8 : Coupe schématique d'un bassin de type parc à résidus, équipé d'un dispositif de vidange de fond (illustration tirée du rapport IDM TETHYS, 2012).

4.4. LES SURVERSES

Un dispositif de surverse permet notamment à une retenue d'éviter une montée trop importante de son niveau d'eau. La hauteur de la revanche doit être définie pour conserver son intégrité à la crête de la digue (cf. figure 9).

Au même titre qu'un dispositif de vidange de fond, une surverse permet de prélever la tranche d'eau supérieure d'un bassin, qui présente *de facto* une turbidité plus faible que l'eau située plus en profondeur. Cette sélection permet donc d'obtenir une certaine clarification vers le bassin situé directement à l'aval. La cote de cette surverse peut être ajustée en cours d'exploitation.

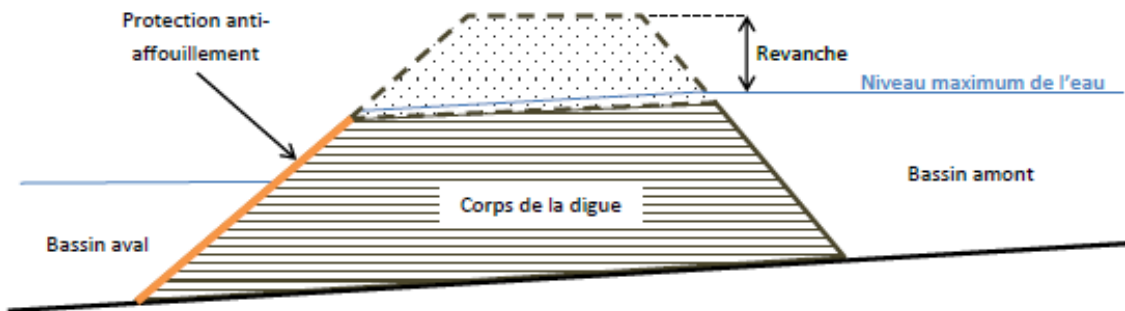


Figure 9 : Coupe schématique d'une digue au niveau d'une surverse.

En aval de la surverse, la mise en œuvre d'une protection anti-affouillement permet de limiter l'érosion et le départ des fines (blocs et graviers, géomembrane, ...).

4.5. LES CANAUX DE DERIVATION

Dans les exploitations alluvionnaires, situées la plupart du temps au droit du lit mineur d'un cours d'eau, les canaux de dérivation sont des ouvrages indispensables pour permettre un fonctionnement en circuit fermé. Ils doivent être impérativement creusés dans le terrain naturel, et suffisamment dimensionnés pour permettre de gérer les phénomènes de crues lors d'évènements pluvieux exceptionnels.



Figure 10 :Photo d'un canal de dérivation creusé dans le terrain naturel et encadré par des « levées de terre ».

Le canal de dérivation est un point clé pour la protection du réseau hydrographique, notamment en période de crue. Sa section doit être suffisamment grande pour permettre le transit sans débordement d'un débit caractéristique de référence de crue, préalablement défini. Pour se faire, une digue doit être solidement mise en œuvre et creusée dans le terrain naturel pour protéger le réseau hydrographique naturel des eaux présentes dans les bassins de décantation au niveau de l'exploitation. Par ailleurs, pour protéger la zone d'exploitation d'une éventuelle crue, une digue doit également être édifiée en amont de la zone d'exploitation.

Pour définir la géométrie des canaux de dérivation (notamment leur section), les caractéristiques hydrologiques du bassin versant en amont mais aussi en aval du cours d'eau exploité doivent faire l'objet d'une étude spécifique. L'ouvrage sur l'«évaluation des débits caractéristiques sur les bassins versants non jaugés en Guyane» établi par la DIREN (Brochard F., Montfort M., 2008), peut également être utilisé pour ce dimensionnement.

5. Etudes et constructions des digues d'exploitations minières

De manière générale, toutes les digues de protection doivent remplir au minimum les deux conditions suivantes :

- stabilité pendant et après l'exploitation (résistance aux diverses sollicitations extérieures) ;
- interférence minimale avec les écoulements hydrauliques de surface ou souterrains (étanchéité, résistance à l'érosion, aux crues, etc.) ;

Si la première de ces conditions impose d'établir par le calcul une justification des ouvrages à construire, après reconnaissance géologique et géotechnique du site, la seconde condition nécessite quant à elle une bonne connaissance des règles de l'art en termes d'exécution des travaux d'édification et de protection des digues (surveillance et maintenance).

De manière générale, pour mener à bien un projet de réalisation d'un bassin d'exploitation et satisfaire *a minima* ces deux conditions, l'intervention de spécialistes est impérative.

5.1. PRINCIPES GENERAUX POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES DIGUES

5.1.1. Justification des ouvrages et états limites

Afin de s'assurer de la stabilité d'une digue, on doit se prémunir d'un certain nombre de phénomènes préjudiciables. Les états-limites correspondent à des situations au-delà desquelles l'ouvrage ne satisfait plus aux critères de dimensionnement. Il y a deux catégories d'états limites :

- Les états-limites de services ou ELS (fonctionnement en utilisation normale d'exploitation) ;
- Les états-limites ultimes ou ELU (état de rupture d'ouvrage).

La vérification de la stabilité doit prendre en considération les différentes phases de la vie de l'ouvrage, notamment les phases de construction et d'exploitation.

La justification de l'ouvrage consistera à vérifier que la sécurité vis-à-vis d'un état-limite est suffisante pour chaque situation de projet et phase de vie étudiée. Ainsi, Les états limites à considérer sont les suivants

- stabilité d'ensemble de l'ouvrage et des terrains environnants ;
- portance du sol-support ;

Ceci conduit à introduire la notion de coefficients de sécurité dans la justification des ouvrages. Cette justification est réalisée en comparant les effets des sollicitations avec la résistance que le sol est capable d'opposer. Elle est considérée comme valide lorsque la résistance dégage un niveau de sécurité acceptable vis-à-vis de la sollicitation considérée.

A titre d'exemple, on peut définir un coefficient de sécurité global F_s en appliquant la relation suivante :

$$F_s = \frac{\text{résistance à la rupture}}{\text{sollicitation (majorée ou non)}}$$

L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture, tels que ceux énoncés au § 3, est délicate. Elle nécessite la connaissance du comportement du terrain et de l'ouvrage de la manière la plus juste possible. Ceci n'est possible qu'en identifiant certains paramètres géotechniques qui requièrent la réalisation de reconnaissances spécifiques sur le terrain et en laboratoire (cf. § 5.2.2).

L'étude de la stabilité des talus amont et aval est la partie essentielle de la conception des ouvrages en remblai de type digue. Cette stabilité doit être vérifiée en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue, qui par ailleurs ont une influence sur l'angle de frottement interne et la cohésion des matériaux constitutifs de l'ouvrage, d'où la nécessité de réaliser les essais de cisaillement en laboratoire sur des échantillons saturés. La diminution de la valeur de ces caractéristiques mécaniques intrinsèques perturbe la stabilité des pentes, et ce quelle que soit la taille de l'ouvrage.

Une digue de bassin d'exploitation primaire doit nécessairement faire l'objet d'une étude de stabilité afin de justifier sa géométrie vis-à-vis du risque de rupture à long terme (forme, hauteur, pentes, etc...). Les valeurs utilisées dans les calculs (angles de frottements, cohésion, ...) devront être déterminées à partir d'essais en laboratoire.

A titre indicatif, si les calculs ne sont pas conduits selon le protocole des Etats Limites, on pourra retenir les valeurs suivantes pour coefficients de sécurité au glissement :

- $F \geq 1,5$ pour le talus aval à long terme ;
- $F \geq 1,3$ pour le talus amont en vidange rapide (rupture moins dommageable que celle du talus aval).

Concernant les parcs à résidus, la justification de la stabilité doit l'être non seulement pour la première digue réalisée, mais également à chaque étape de rehaussement successif de la retenue, où la qualité de la couche de résidus servant de support ainsi que les caractéristiques des matériaux constituant les digues successives devront être déterminées.

5.2. ETUDES DE RECONNAISSANCES DES SITES D'EXPLOITATION

Un examen détaillé de l'occupation d'un site permet une optimisation de la géométrie des bassins, des digues qui leur sont associées, ainsi que des techniques de réalisation et donc de leurs coûts.

5.2.1. Implantations des bassins

Pour des raisons économiques évidentes, les bassins doivent être implantés à proximité de l'usine de traitement, elle-même située pour les mêmes raisons près de la/des fosses d'extraction. L'emplacement de cette/ces dernières est déterminé par des études géologiques d'exploration. En revanche, l'implantation des installations (usine de traitement, parc à résidus, bassins de décantation, etc.), devra optimiser impacts économiques, difficultés techniques et sécurité des fosses et des éléments logistiques pérennes vis-à-vis d'une éventuelle rupture de digue.

a- Considérations géométriques

Pour limiter les difficultés techniques et les coûts de réalisation lorsque l'on envisage la création d'un bassin d'exploitation, un des objectifs doit être d'obtenir un rapport VS (volume stocké) / VD (volume de la digue) le plus élevé possible. De ce point de vue, les digues peuvent être classées en trois catégories :

- Digues fermées sur elles-mêmes.

Avec un rapport VS / VD assez faible, cette structure est la plus coûteuse. En revanche, la gestion des eaux de ruissellement et de précipitations est réduite au minimum.

- Digues à flanc de coteau

Le rapport VS / VD est plus élevé mais des problèmes d'instabilité au niveau du coteau sont à craindre (glissement d'ensemble), notamment en raison des perturbations de charges et de circulation d'eau engendrées par la réalisation de la digue.

- Digues en travers d'une vallée (sous forme de barrage).

Il s'agit du meilleur rapport VS / VD. En revanche, la taille du bassin dépend de la topographie aux abords de l'ouvrage, ce qui peut ne pas être satisfaisant. De plus, une bonne gestion des eaux est nécessaire afin de pallier aux problèmes éventuels de crues.

b- Considérations géologiques et morphologiques

Dans un premier temps, pour définir l'implantation des bassins, une étude morphologique doit être réalisée en utilisant les documents existants : cartes topographiques, cartes géologiques, etc. (les cartes topographiques au 1/50 000^e et certaines cartes géologiques au 1/100 000^e sont disponibles dans les bases de données du BRGM). Ceci permet d'établir une première évaluation des caractéristiques géométriques des futures digues selon les différentes configurations possibles et de déterminer la consistance des travaux qui devront être réalisés pour chacune d'elles.

Dans une seconde phase d'étude, les conditions de terrains doivent être étudiées plus précisément (études *in situ*) et on s'efforcera de déceler les risques qui pourront se présenter pour le projet (nature des terrains, stabilité, etc.). Pour cela, des études géologiques et géotechniques de sites seront à réaliser (cf. § 5.2.2). Elles permettront de déceler les principales difficultés et donc d'optimiser le choix de l'implantation des ouvrages. Ces études devront comporter impérativement une recherche de matériaux d'emprunt aptes à la mise en œuvre en corps de digues, et en quantité suffisante pour le projet.

5.2.2. La reconnaissance géotechnique du site

La facilité d'exécution des travaux, donc leur coût final, la qualité de la /des digues construites, donc leur sûreté, dépendent de la connaissance des caractéristiques de leurs sols-supports (fondations) et de celles des matériaux disponibles pour les ériger.

Généralement, la consistance des travaux de reconnaissance pour aboutir à une caractérisation géologique et géotechnique suffisante du site, est proportionnelle à la taille de la digue à construire. En revanche, suivant la structure géologique dans laquelle ils s'inscrivent, les ouvrages de tailles modestes peuvent également nécessiter des études consistantes.

Les études géologiques et géotechniques ne doivent pas être minimisées mais doivent être réalisés de manière raisonnablement proportionnées aux contextes, aux ouvrages à réaliser et éventuellement aux difficultés rencontrées. Les différents types de missions géotechniques répondant à la norme NF P-94 500 (révisé en décembre 2006), sont spécifiés et détaillés en annexes 2.

Lorsque l'on projette la construction d'une digue, l'objectif premier est d'obtenir les informations géologiques et géotechniques nécessaires pour caractériser la qualité de son sol-support sous son emprise et de part et d'autre, et des matériaux qui seront employés pour la construire.

Les principaux éléments à reconnaître sont les suivants :

- stabilité d'ensemble du site (concerne les sites en pente) ;
- capacité portante du sol sous l'ouvrage et perméabilité des terrains sous l'emprise de la retenue (eau ou remblai hydraulique), la digue, et en aval;
- tassements absolus et différentiels prévisibles ;
- nature, comportement mécanique et hydraulique des matériaux d'emprunt devant constituer la digue.

Les hétérogénéités du sol support devront être étudiées avec soin car elles peuvent induire des tassements différentiels fortement dommageables pour l'ouvrage.

Les travaux de reconnaissances *in situ* servent à obtenir un modèle géologique de la zone d'implantation de l'ouvrage. L'étude des matériaux d'emprunt qui constitueront le corps de digue est impérative afin de s'assurer de leur aptitude à être mis en œuvre, avec le matériel disponible sur le site ou facilement mobilisable, mais également à présenter, une fois mis en œuvre, des caractéristiques mécaniques compatibles avec leur destination. Pour cela, des prélèvements destinés à être analysés en laboratoire sont nécessaires.

NB : *Les méthodes de reconnaissances et types d'essais exposés dans ce chapitre ne sont pas exhaustifs. Le bureau d'études qui sera chargé de réaliser les études géotechniques pourra proposer d'autres moyens d'investigations pour déterminer les caractéristiques géotechniques des sites ou des ouvrages. De plus, le programme de reconnaissance doit être adapté à l'hétérogénéité du site et à l'envergure du projet (fréquence des essais, etc.).*

a- Reconnaissance in situ

- sondages par ouverture de puits à la pelle mécanique :

Ils permettent d'effectuer des coupes géologiques et donc de vérifier les épaisseurs des différentes couches aux caractéristiques variées. Ils permettent également de prélever des échantillons pour analyses en laboratoire.

- sondages au pénétromètre dynamique :

Ces essais normalisés (NF P 94-114 et NF P 94-115) permettent de mesurer la réaction qu'oppose le sol à l'enfoncement d'une tige. Ils donnent une idée des variations de consistance des sols avec la profondeur mais sont très sensibles aux refus. Dans le cas des mines guyanaises ils seront surtout utilisés pour apprécier l'homogénéité des digues et de leurs sols-supports.

- sondages électriques (méthodes géophysiques) :

Ils permettent de déterminer la résistivité des sols, et de visualiser par exemple des zones saturées en eau. Ces investigations rapides et pouvant être réalisées en zone d'accès difficile peuvent être utilisées afin de déterminer des zones de fuites au sein d'une digue (étude de diagnostic), mais également pour rechercher des gisements de matériaux aptes à la confection de digues.

- essais scissométriques :

Ces essais normalisés (NF P 94-112) sont adaptés pour les sols fins cohérents et saturés de faible résistance. Ils mesurent les caractéristiques de cisaillement du sol en place (cohésion non drainée c_u). La cohésion mesurée doit être corrigée en fonction de l'indice de plasticité (cf. analyses en laboratoire). Ces essais vont permettre de calculer la stabilité au glissement mais également au poinçonnement.

- essais de perméabilité en place :

Des essais de perméabilité peuvent être facilement réalisés en sondages (de type pulse-test, Nasberg, etc.), en surface (de type « double anneau »), ou en tranchées. Ils permettent de connaître les coefficients de perméabilité K des sols (exprimés généralement en m/s).

b- Les analyses en laboratoire

- Essais d'identification :
 - granulométrie (normes NF P 94-056), indique la proportion des grains de différentes tailles dans un sol ;
 - teneur en eau naturelle (norme NF P 94-050), indique l'état hydrique d'un sol au moment du prélèvement en sac étanche ;
 - limites d'Atterberg (norme NF P 94-051 et NF P 94-052-1), indiquent les différents comportements des sols en fonction de leurs teneurs en eau (limites des comportements solide, plastique ou liquide des sols) ;
 - valeur au bleu (norme NF P 94-622-9), indique la « propreté » d'un sol ou permet de caractériser sa fraction argileuse.

- Essais de comportement mécanique et hydraulique :
 - essai de compression triaxiale (norme NF P 94-070 - non consolidé, non drainé = UU - non consolidé, drainé = Cuu = court terme – consolidé, non drainé = Cu+u = long terme) pour les sols cohérents;
 - essais de cisaillement rectiligne (norme NF P 94-071-1 - boîte de Casagrande) ;
 - essai de consolidation à l'oedomètre (norme NF P 94-090), permet d'évaluer l'amplitude des tassements des ouvrages ainsi que leur évolution.
 - Essais Proctor Normal ou modifié selon la granulométrie du matériau (norme NF P 94-093). Ils permettent de déterminer les références de compactage des matériaux constitutifs des digues, en précisant l'« optimum Proctor » qui donne ainsi la teneur en eau optimale pour une compacité maximale. Ils sont accompagnés par des essais de détermination de l'indice de portance immédiat (IPI, norme NF P 94-078), et de comportement au poinçonnement (CBR) pour préciser les conditions de mise en œuvre des matériaux.

5.2.3. Les matériaux d'emprunt

Pour des raisons économiques évidentes au vu des conditions d'accès des exploitations guyanaises, les matériaux d'emprunt sont systématiquement prélevés à proximité des ouvrages à construire.

La disponibilité des matériaux argileux dans la plupart des sites en Guyane, est favorable à l'obtention de remblais suffisamment imperméables. En revanche, les conditions de mise en œuvre sont variables suivant les types de matériaux. Pour optimiser le compactage et éviter les malfaçons conduisant aux fuites d'eau, les matériaux employés doivent être réutilisables en remblai dans des conditions satisfaisantes (on peut pour cela se référer à la classification du GTR¹⁵ 92, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992, et à la norme qui en découle NF- P 11-300, septembre 1992). Des analyses en laboratoire sont donc requises pour déterminer leur classification ainsi que leur aptitude à la mise en œuvre en remblai. Les plus pertinents seront les essais d'identification et les essais Proctor avec IPI et CBR (cf. § 5.2.2.b)

Dans un récent rapport, le bureau d'études **IDM TETHYS** fournit un descriptif de certains sols rencontrés dans les exploitations guyanaises. Ce descriptif, donné ici à titre indicatif, ne dispense pas des analyses qui doivent être réalisées, mais précise certaines caractéristiques générales :

➤ Les saprolites

Les saprolites sableuses issues de l'altération des diorites représentent de bons matériaux de remblai imperméables, en général de catégorie GTR A1 et B1, mais très sensibles à l'eau et notamment sensibles aux conditions météorologiques de mise en œuvre et leur mise en place sous l'eau n'est pas envisageable.

En effet, d'une façon générale, il convient d'insister sur le fait que les matériaux sont très sensibles à l'eau et voient leurs caractéristiques mécaniques se dégrader rapidement avec leur saturation ; de plus, certains produits argileux issus de la décomposition de schistes et volcanites des formations du Paramacca sont apparus fortement gonflants, à l'inverse des produits issus de l'altération des granites et des gneiss qui sont nettement moins sensibles à l'eau et présentent généralement une fraction sableuse développée.

Il s'agit de sols difficiles à mettre en œuvre pour des teneurs en eau élevées (faible portance, matelassage) ce qui conduit à éviter a priori la saison des pluies pour la construction des digues.

¹⁵ GTR : Guide des Terrassements Routiers.

Dans les conditions tropicales (forte évaporation), on retiendra la mise en place en couches peu épaisses (0,40 m au plus à la mise en œuvre) avec un compactage moyen à intense.

L'utilisation en remblais de sols de catégorie A est adaptée pour des hauteurs de digues jusqu'à 10 m environ et doit faire l'objet de beaucoup de soin et d'attention au-delà, avec des adaptations de la géométrie du corps de digue (redans, ...) ou des renforcements du matériau ; ils nécessitent, une étude géotechnique spécifique pour chaque cas particulier de digues de fortes hauteurs afin d'en justifier la stabilité et l'adaptation aux conditions géologiques locales.

Les saprolites moins évoluées, tendant vers le terme «saprock», représenteront également évidemment des matériaux bien adaptés à la construction des digues mais doivent faire l'objet d'une attention particulière car l'apparition d'éléments graveleux tend à leur enlever leur caractère imperméable.

Attention, les saprolites les plus dégradées, situées dans les premiers termes près de la surface ou sous la couverture latérisée, sont souvent des matériaux de caractéristiques mécaniques plus médiocres que les termes plus profonds.

➤ **Le saprock**

En général issu du marinage des zones profondes des fosses et carrières, ces matériaux perméables (catégorie GTR R6) et peu sensibles à l'eau ne peuvent participer à l'étanchéité des corps de digue mais constituent un remblai frottant de bonnes caractéristiques mécaniques qui peut venir en renforts et épaulements sur le côté extérieur des ouvrages, (notamment dans des zones inondées ou submersibles), en couverture anti-érosion, en remblai drainant, etc ...

➤ **Les formations latéritiques**

Ces matériaux sont inaptes à la construction des corps de digues car trop perméables, mais il s'agit dans tous les cas de matériaux précieux qu'il convient de stocker lors de décapages car leurs utilisations possibles sont multiples en raison de leurs bonnes caractéristiques mécaniques. Il est également nécessaire de distinguer les différents types de matériaux avec les différents faciès des latérites, depuis les argiles graveleuses latéritiques meubles jusqu'aux cuirasses susceptibles de fournir des blocs d'enrochement. On pourra utiliser ces formations comme couverture anti-érosion, remblai drainant (masques, éperons, ...) après vérification de leur perméabilité (pas de fraction fine développée), corps de remblais frottants.

➤ **Les alluvions graveleuses lavées par l'orpillage**

Les alluvions anciennes des criques, la plupart du temps débarrassées de leur fraction fine par leurs lavages successifs sont abondantes sur les sites miniers et représentent un matériau graveleux perméable précieux, utilisables comme semelle drainante en sous face des remblais des corps de digues, en protection des talus et des voies contre l'érosion, et, etc...

➤ Les quartz filoniens

Ces matériaux sont quelquefois disponibles sur les sites miniers, toujours en petites quantités et ils représentent cependant la plupart du temps du minerai; ces matériaux graveleux, grossiers et crus, sont utilisables en enrochements, en comblement d'éperons drainants, en masques drainants, ...

➤ Les résidus de la laverie

Ces matériaux le plus souvent à dominante sableuse ont des caractéristiques mécaniques moyennes et ne sont pas imperméables une fois mis en remblais, Il s'agit de sols de portance faible, souvent à tendance thixotropique et sensibles à leur teneur en eau, à l'érosion et aux conditions météorologiques de mise en œuvre; ils sont le siège de tassements sous charge de forte amplitude mais très rapidement achevés après chargement.

Nous déconseillons ici leur mise en œuvre dans les corps de digue, bien qu'ils apparaissent quelquefois dans les bassins de résidus, et aucun ouvrage ne sera donc construit ici avec ces matériaux.

Une fois mis en place, les matériaux constituant le corps de digue doivent permettre d'obtenir les caractéristiques suivantes :

- homogénéité sur l'ensemble de la digue ;
- perméabilité faible ($K \leq 1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$) ;
- bonne résistance au cisaillement ;
- plasticité moyenne, autorisant des déformations sans fissuration.

Dans le but de disposer d'une quantité suffisante de matériaux, plusieurs zones d'emprunt peuvent être à prévoir. Dans ce cas, on veillera bien à ce que les caractéristiques des matériaux soient identiques. On pourra envisager des mélanges entre des matériaux aux caractéristiques relativement proches pour obtenir une masse plus homogène.

5.3. PRINCIPES DE BONNE PRATIQUE D'EXECUTION DES DIGUES

Une digue en remblai peut être réalisée de différentes manières (digue homogène, zonée, à noyau central, ...). Dans les exploitations en Guyane, les digues homogènes sont les plus communément employées par les mineurs en raison de leur mise en œuvre plus adaptée au contexte. Par conséquent, les recommandations de ce chapitre ont été établies pour ce type de digue.

Le respect des pratiques d'exécution en suivant les règles de l'art, permettent de limiter les circulations d'eau dans le corps du remblai, mais également d'éviter les fuites d'eau par contournement latéral au contact remblai-terrain naturel ou sous la digue à travers le terrain naturel, favorisant ainsi la résistance à l'érosion interne. De plus, la mise en place d'une protection adéquate en surface, va accroître la résistance à l'affouillement et limiter au maximum l'apparition de ravines.

NB : *Nous attirons l'attention sur la nécessité de réaliser les travaux en période climatique favorable (saison sèche).*

5.3.1. Les fondations

D'un point de vue mécanique, les études de justification doivent permettre de s'assurer que les contraintes dues au poids de la digue et aux poussées hydrauliques ne dépasseront pas celles admissibles par les terrains de fondation, de prévoir les tassements de ces terrains et de définir éventuellement le rythme de construction de la digue.

Pour l'aspect hydraulique, les études devront déterminer la perméabilité des couches de fondation et prévoir les mesures à envisager pour assurer une étanchéité suffisante dans la partie amont de la digue et leur drainage dans la partie aval.

Les études de reconnaissance doivent être adaptées aux moyens techniques disponibles. La reconnaissance géologique peut se faire par l'intermédiaire d'ouverture de puits à la pelle mécanique, celle des caractéristiques mécaniques des sols *in situ*, à partir d'essais en laboratoire sur des prélèvements réalisés dans les puits à la pelle à la pelle mécanique, d'essais scissométriques *in situ* (sols meubles), de sondages au pénétromètre dynamique pour apprécier l'homogénéité d'une couche, et celle des caractéristiques hydrauliques par des essais de perméabilité en sondages de type pulse-test, Nasberg, etc., en surface de type « double anneau » ou en tranchées.

Les essais en laboratoire comporteront des essais d'identification, des essais œdométriques (calcul des tassements) et tous essais permettant de déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques des matériaux en place (essais de cisaillement drainés et non-drainés).

Ces investigations peuvent être complétées par d'autres types de reconnaissances.

5.3.2. Les corps de digues

a- Les digues de bassins d'exploitations primaires

Les données suivantes sont inspirées de l'ouvrage « Techniques des barrages en aménagement rural ».

A titre indicatif, concernant les pentes des talus on adoptera les valeurs maximales suivantes :

- 2H / 1V pour le talus amont (côté retenue) ;
- 3H / 2V pour le talus aval (côté externe), avec redans tout les 4 à 5 m de hauteur environ ;

Dans le but de garantir l'accessibilité pour l'éventuelle maintenance ultérieure des digues, la largeur de la crête (L) devra suivre les préconisations suivantes :

- - H < 10 m L ≥ 3 m à 4 m ;
- - H = 10 m à 20 m L ≥ 4 m à 6 m

Sachant que la largeur en crête est déterminante puisque que c'est d'elle que dépendra la largeur de la base de l'ouvrage. Dans ces cas une pré-évaluation du facteur de sécurité peut-être faite à l'aide d'abaques (Hoek, etc.).

La revanche¹⁶ (R) doit donc être calculée par rapport au niveau maximal atteint par la retenue, après prise en considération des tassements de l'ouvrage.

On pourra retenir ensuite les valeurs suivantes :

- - H < 10 m R = 1,20 m à 1,50 m ;
- - H = 10 m à 20 m R ≥ 1,50 m à 2 m.

1- Préparation du fond de fouille.

¹⁶ Revanche : différence de hauteur entre la crête de digue et le niveau d'eau de la retenue.

La terre végétale doit être décapée sur l'ensemble de l'emprise de la digue. Elle pourra être stockée en faible épaisseur en bordure des terrains en vue d'être reprise pour recouvrir les talus hors d'eau de façon à faciliter le développement du tapis végétal après construction.

La cote minimale à atteindre pour le fond de fouille, ainsi que la largeur de la fondation devront suivre les recommandations définies dans l'étude géotechnique.

Tout matériau impropre découvert lors de l'ouverture des fouilles devra être purgé (débris végétaux, matériaux remaniés ou impropres, etc.). On veillera à la conformité du sol en fond de fouille (cf. étude), et qu'il soit homogène au minimum sous l'emprise des fondations. En cas de découverte d'un matériau non-conforme à ce qui a été reconnu, le fond de fouille devra être adapté après concertation et/ou intervention du/des spécialistes ayant participé au projet.

Les recommandations minimales pour la réalisation d'un fond de fouille sont les suivantes :

- décapage de la terre végétale et purge – selon résultats études - des sols sous la fondation de la digue ;
- scarification pour assurer un bon contact terrain/remblai ;
- interception et captage des éventuelles venues d'eau ;
- éviter les variations brutales de forme et de tracé de la tranchée d'ancrage ;
- purge des sols mous ou impropres (matières organiques, ...) ;

2- terrassements et compactage des couches

- prélèvement des matériaux

Les matériaux d'emprunt doivent être contrôlés avant leur mise en œuvre. Toute utilisation de matériaux impropres ou organiques, racines, bois, etc. doit être exclue.

La teneur en eau des matériaux doit être portée ou maintenue aux conditions optimales déterminées lors des essais en laboratoire (cf. essai Proctor, § 5.2.2.b). Au besoin, les matériaux pourront être arrosés pour faciliter leur mise en œuvre.

Compte tenu des conditions météorologiques de la Guyane, les matériaux d'emprunt ne doivent pas être stockés avant leur emploi.

Le mode de prélèvement doit être organisé de façon à homogénéiser le matériau en excluant les blocs de plus de 20 cm, qui sont réutilisables par ailleurs.

- Mise en œuvre du remblai

De manière générale, la mise en œuvre des remblais s'effectue par couches successives compactées sur de faibles épaisseurs. Les modalités de cette mise en œuvre doivent relever, d'une part des résultats des essais Proctor, d'autre part de planche(s) d'essais réalisées avec le matériel de compactage disponible sur le site. Le guide GTR (réalisation des remblais et des couches de formes), édité par le LCPC, restant le document de référence en la matière.

En cas d'arrêt prolongé, on scarifiera et on recompressera la dernière couche. Si cette dernière présente une teneur en eau trop élevée, on devra alors l'évacuer.

Une surépaisseur latérale est à prévoir de façon à retoucher le talus dans le matériau compacté (compactage difficile en bordure).

3- drainage interne de la digue

- débit de fuite et pressions interstitielles

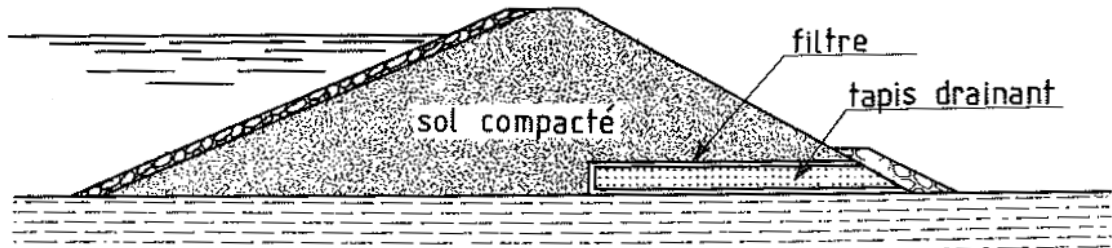
L'objectif du drainage interne des digues est d'éviter l'augmentation excessive des pressions interstitielles et de réduire les forces motrices déstabilisantes.

Il existe plusieurs dispositions pour mettre en œuvre un drainage interne dans une digue, dont les plus recommandables, dans notre contexte, sont :

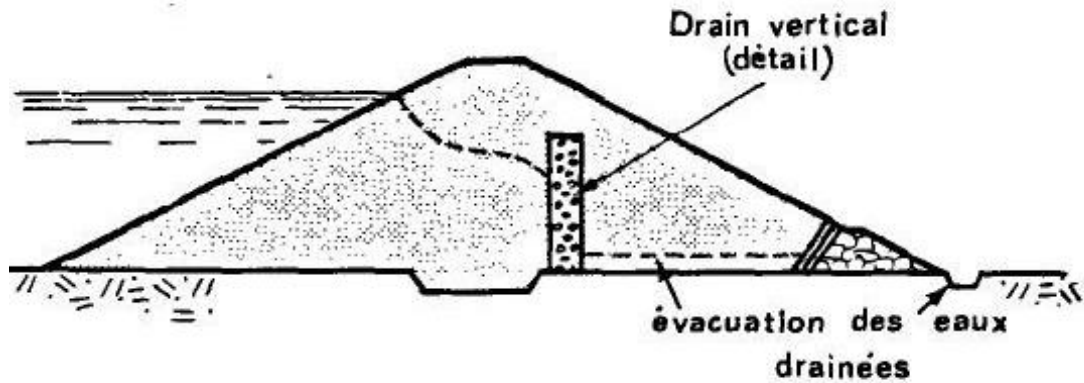
- drainages horizontaux ou tapis drainant ;
- drainage verticaux ou drain central.

Pour les digues de taille inférieure à 8 m, un simple drainage horizontal peut suffire. Au-delà, il est fortement conseillé d'y ajouter un drain central (cf. figure 11).

BARRAGE HOMOGENE



11-a : schéma type d'un barrage homogène en terre, équipé d'un système de drainage horizontal (G. Philipponnat, 2008).



1-b : schéma type d'un barrage homogène en terre, équipé d'un drain vertical et d'un système d'évacuation (M. Agriculture, 1977).

Figure 11 : schémas types de barrages homogènes en terre, avec différents systèmes de drainage

La mise en place d'un drain-filtre adéquatement dimensionné constitue un moyen efficace pour contrer le risque d'érosion régressive.

Les critères de filtres entre deux matériaux généralement utilisés pour évaluer la possibilité d'apparition du « phénomène de renard » impliquent le rapport D_{15f}/D_{85b} (où D_{15f} est le diamètre correspondant à 15 % de passant sur la courbe granulométrique du filtre et D_{85b} est le diamètre correspondant à 85 % de passant sur la courbe granulométrique du matériau à protéger). Les résultats obtenus par Tomlinson et Vaid (2000) indiquent qu'un filtre est généralement efficace lorsque

$D15f/D85b < 8$, et inefficace lorsque $D15f/D85b > 12$. Dans le cas où $8 < D15f/D85b < 12$, le filtre ne serait efficace que si le gradient hydraulique ne dépasse pas une valeur critique.

L'épaisseur des drains ne doit en aucun cas être inférieure à 0,5 m.

- Vidange de fond

Il s'agit d'une conduite permettant d'abaisser le niveau de la retenue en cas de situation critique. Ce dispositif doit répondre aux critères suivants :

- résistance aux sollicitations et agressions physiques, chimiques et mécaniques ;
- étanchéité absolue, notamment le long du contact avec le remblai (la pose de collerettes améliore sensiblement l'étanchéité au contact canalisation/remblai) ;
- capacité suffisante avec des diamètres minimaux de 300 mm pour un ouvrage retenant jusqu'à 6 m d'eau et 800 mm au-delà ;
- systèmes de vannes de réglages/fermeture aussi bien en amont qu'en aval.

4- drainage externe de la digue

Pour limiter l'érosion des parements de la digue et afin d'éviter tout ruissellement, notamment sur le talus externe, on prévoira les dispositifs suivants :

- contre-pente d'environ 3 % vers l'intérieur de la retenue (cf. §5-3-1-b), aussi bien en crête qu'au niveau de chaque risberme lorsque la digue en comporte ;
- système de captage et d'évacuation des eaux de ruissellement, notamment par l'intermédiaire de fossés. Des descentes seront également à prévoir tous les 25 m linéaires de digue environ (à adapter selon le contexte). Ces descentes devront être protégées de l'érosion par l'intermédiaire d'un béton projeté (cas favorable), ou d'un géotextile recouvert de blocaille.

b- Cas particuliers des digues de parcs à résidus

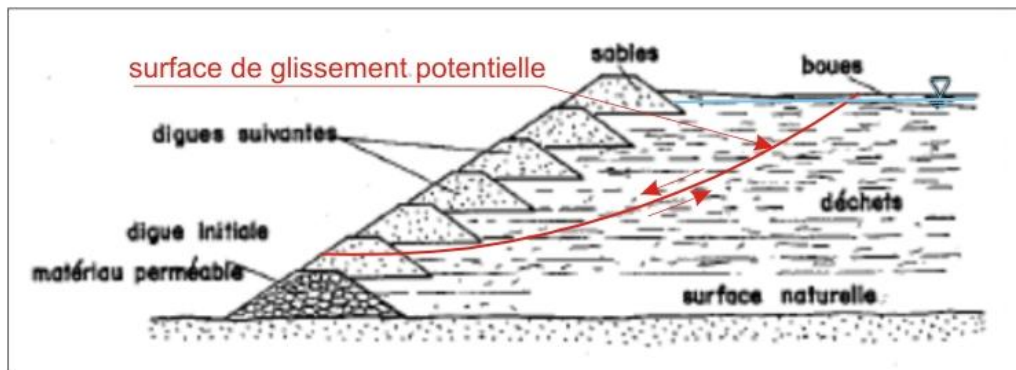
Au vu du caractère évolutif des digues de bassins de stockage des résidus, des considérations complémentaires sont à prendre en compte (cf. § 4.2.1).

Pour ce type de retenues, lors de la surélévation des digues, les méthodes « centrale » et « aval » sont plus coûteuses que la méthode « amont » en termes de mise en œuvre. Cependant, elles apportent plus de garanties en termes de stabilité. En effet, la digue est entièrement constituée de matériaux d'apport dont la mise en œuvre et les compactages sont mieux maîtrisables.

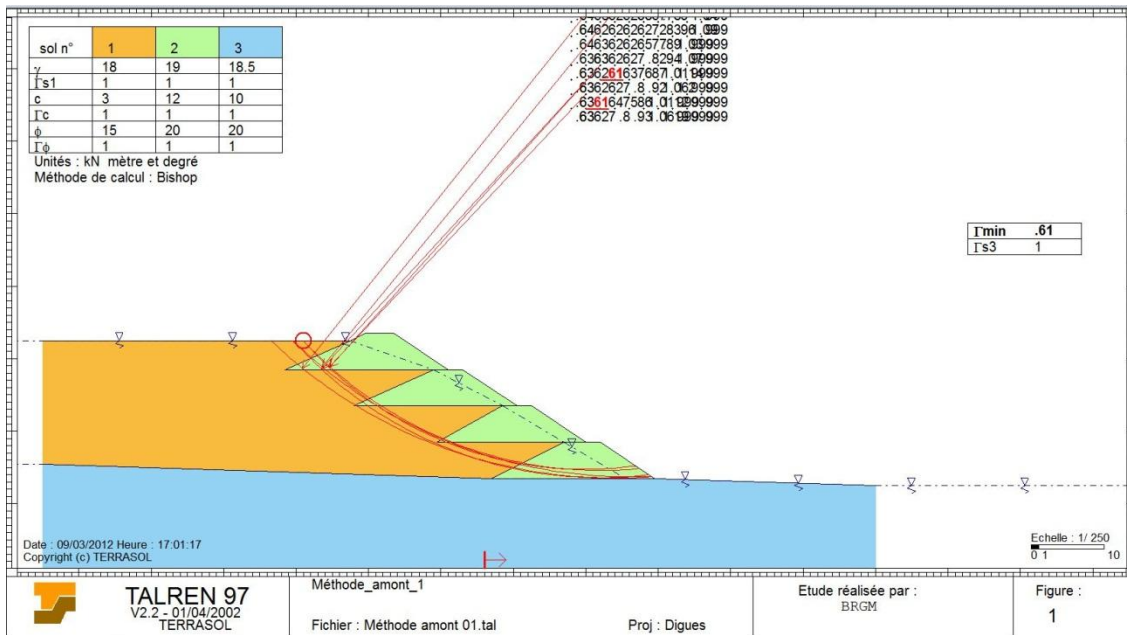
La méthode amont est la plus utilisée par les mineurs, y compris en Guyane, car elle est la plus simple à mettre en œuvre. Dans cette méthode, une première digue en terre de 4 à 8 m de hauteur est construite. Quand les dépôts de boues ont presque complètement rempli le bassin ainsi formé, la digue est surélevée (cf. figure 6). Il s'en suit que les digues, à l'exception de la première, reposent en partie sur la digue inférieure et en partie sur les déchets. La coupe de l'ouvrage est alors celle donnée figure 12.

Cette méthode de construction (amont) présente cependant quelques inconvénients :

- 1) Les digues successives reposent en partie sur des matériaux non compactés.
- 2) Quand la hauteur de la digue augmente, la surface de glissement potentielle, est située de plus en plus dans les fines de la retenue et de moins en moins dans les digues. Il en résulte que le facteur de sécurité diminue très rapidement quand la hauteur de la retenue croît (cf. figure 12 et § 5-2).
- 3) Le niveau de saturation dans la digue et le réseau d'écoulement ne sont pas contrôlés, du moins dans les digues construites comme indiqué figure 12.



12 a : surface de glissement potentiel dans la méthode amont.



12 b : exemple d'une feuille de calcul établie sous le logiciel TALREN

Figure 12 : schéma de rupture dans la méthode amont (a) et coupe TALREN (b).

Une spécification importante doit donc être signalée : la digue initiale devrait être suffisamment perméable pour permettre le rabattement du niveau de l'eau jusqu'au pied de la digue, à moins qu'un tapis drainant ne soit mis en place sous celle-ci. Pour des raisons bien compréhensibles de fonctionnement en circuit fermé des eaux de process, mais également de logistique et de coût de l'énergie, ce n'est pas le cas en Guyane. Le dimensionnement des digues les plus en aval doit donc intégrer le problème du temps de désaturation des déchets.

Un mode de séparation des stériles entre leurs composantes grossières et fines permettrait de limiter les hétérogénéités de la digue. Ces dernières étant favorables à la circulation d'eau et donc à l'augmentation du gradient hydraulique peuvent provoquer, à terme, des risques élevés d'instabilités.

De plus, les dispositifs de drainage devront être conçus avec une grande marge de sécurité de manière à limiter ces mêmes instabilités.

La disposition des digues successives les unes sur les autres sera réalisée de manière à exclure les circulations d'eau au niveau de leurs contacts (recouvrement).

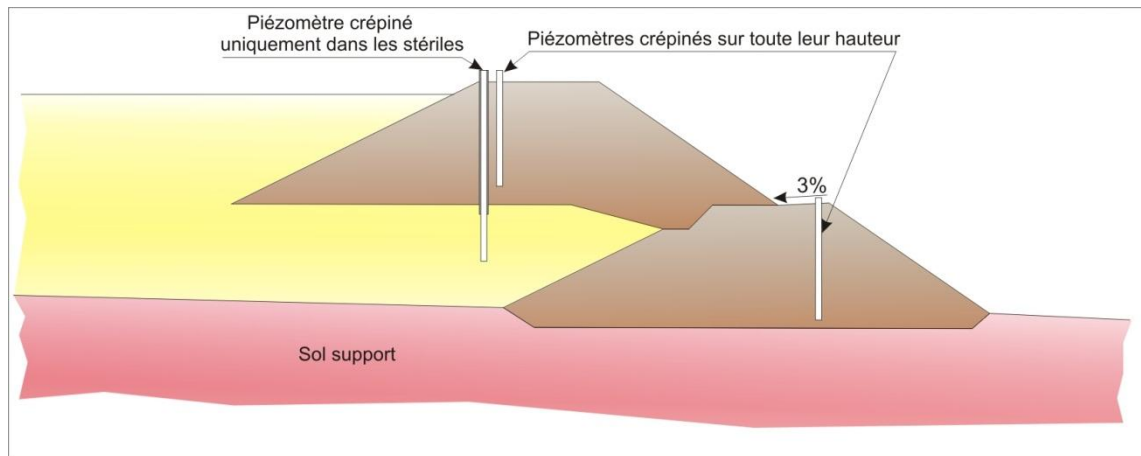


Figure 13 : Schéma de réalisation des digues successives dans la méthode amont pour les parcs à résidus.

Des contrôles de la saturation des corps de digues par l'intermédiaire de piézomètres est impérative dans cette méthode de réalisation (cf. § 6).

Quoiqu'il en soit, pour la réalisation des digues de ce type de bassin évolutif, les conseils d'un spécialiste en géotechnique et en risques géologiques s'appuyant sur des études spécifiques sont nécessaires.

c- Les digues d'exploitations secondaires

Les exploitations secondaires ont un caractère évolutif. En effet, les zones exploitées (extraction, lavage, etc.), se déplacent constamment au grès des travaux réalisés sur la surface du flat, mais sont définies lors de la demande d'AEX¹⁷. Cela implique que les « digues » de barranques sont constamment construites et détruites au grès de l'exploitation (extraction / réhabilitation).

Dans ces mines secondaires, il existe deux principaux types de digues qui vont se différencier par leur localisation au sein de l'exploitation. Il est donc nécessaire d'introduire les notions de digue « interne » ou « externe », en raison des rôles différents qu'elles vont avoir vis-à-vis de leurs impacts sur le milieu naturel lors de leurs éventuelles ruptures :

- les digues « internes », constitutives des barranques ou des canaux d'approvisionnement;

¹⁷ AEX : Autorisation d'exploitation sur une surface donnée

- les digues « externes », servant à protéger le milieu naturel des eaux de procédés (p.ex. les canaux de dérivation).

En effet, la rupture d'une digue située entre deux barranques en cours d'exploitation, présente moins de risques pour le milieu naturel que celle d'une digue protégeant le canal de dérivation. L'importance de ces dommages affecte aussi bien l'écosystème du milieu naturel aquatique local que l'exploitation minière (arrêt de la production).

Ainsi, dans le cadre de la protection du milieu naturel, la vigilance en termes de maintien de la stabilité des digues doit être largement focalisée sur les digues externes.

Contrairement aux digues internes, les digues externes sont érigées au démarrage des travaux et sont conservées pendant toute la durée de l'exploitation de la surface autorisée (voir au-delà si l'exploitant réclame et obtient une autorisation d'exploitation pour la zone située dans le prolongement de la première AEX). Il est ainsi impératif de devoir maîtriser le comportement de ces digues, au minimum à moyen terme, et donc d'adapter leurs conditions d'exécution en suivant notamment certaines règles de bonnes pratiques.

A titre indicatif, on pourra suivre les recommandations minimales suivantes :

- Les talus pourront, dans la plupart des cas (sauf indication contraire après étude), être taillés à 2H / 1V (on constate souvent des pentes de 1H / 1V pouvant facilement engendrer des problèmes de tenue et de glissement pouvant être dommageables) ;
- Dans le cas où des essais en laboratoire sont réalisés, on pourra optimiser la géométrie de la digue par des études de stabilité. On retiendra dans ce cas un coefficient de sécurité au glissement $F \geq 1,5$;
- La digue devra atteindre une hauteur suffisante pour conserver une sécurité vis-à-vis d'une montée exceptionnelle du niveau d'eau dans le bassin, par exemple lors de fortes précipitations ou de crues exceptionnelles ;
- La revanche devra être au minimum de 1,2 m ;
- Dans le but de garantir l'accessibilité pour l'éventuelle maintenance ultérieure des digues, on prévoira une largeur en crête de digue au minimum égale à 2,5 m.

Nous recommandons vivement la réalisation de reconnaissances géotechniques avant l'édification de ces digues dites « externes ». Au même titre que pour les digues d'exploitations primaires, elles permettront de définir les conditions de site (sols support, contraintes topographiques, ...), de déterminer et d'optimiser leur géométrie (forme, hauteur, pentes, etc...). De plus, les matériaux à utiliser ainsi que les conditions de leurs mises en œuvre devront également être étudiées (cf. § 5.1.2).

Compte tenu de la durée de vie plus courte des digues d'exploitation secondaires et des contextes hydriques dans lesquels elles sont réalisées, les règles de base en termes de dimensionnement (pente, propriétés des matériaux, gestion du ruissellement, ...), et d'exécution (épaisseurs des couches, compactage, ...) ne sont actuellement que peu ou pas prises en considération par les exploitants. Pour limiter les risques, ces derniers devront évoluer dans le sens d'une meilleure application des règles de l'art et être sensibilisés aux problèmes de rupture de digues engendrés par les malfaçons dans ce type d'exploitation.

Les procédés de mise en œuvre des matériaux pour la réalisation de ces ouvrages, bien que de taille plus modeste, vont demeurer identiques à ceux des digues d'exploitations primaires. Les principaux éléments qui vont être modifiés sont notamment la consistance des moyens à mettre en œuvre pour assurer la protection contre l'érosion interne et externe des digues.

1- nature des matériaux utilisés pour l'édification de la digue.

Dans ce type d'exploitation, ce sont les matériaux stériles extraits qui vont être utilisés. Ces matériaux sont susceptibles d'être hétérogènes en nature et en perméabilité. On veillera lors des travaux d'excavation à séparer les matériaux fins des matériaux graveleux et grossiers. Le matériau employé devra être exempt de tout bloc de plus de 20 cm.

L'utilisation des matériaux suivants est impérativement à proscrire :

- argile plastique présentant une teneur en eau trop importante pour permettre une mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes ;
- matériaux à dominance sableuse et/ou graveleuse, trop perméables ;
- matériaux vaseux, tourbes, et plus généralement tout matériaux contenant de la matière organique (y compris l'utilisation d'andains).

Pour remédier à l'absence de matériaux réutilisables en remblai, on pourra définir un plan de gestion du site et, selon les conditions, procéder des différentes manières suivantes :

- envisager l'apport de matériaux extérieurs (zone d'emprunt à définir) ;
- limiter au maximum le volume des digues par utilisation des pentes des versants alentours ;

- utilisation des matériaux graveleux exploités en remblai, en ajoutant une couche externe de matériaux fins (un géotextile devra dans ce cas être ajouté à l'interface matériaux graveleux / fins).

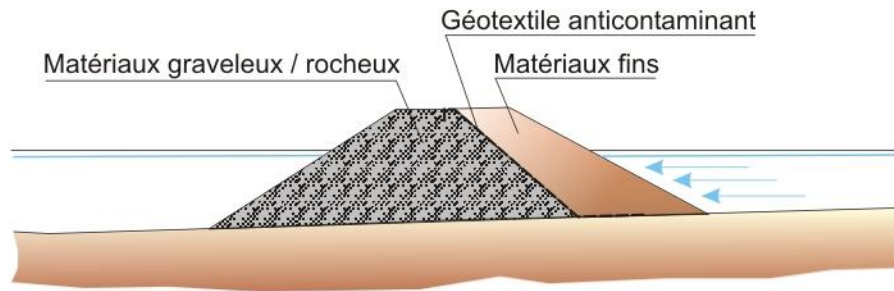


Figure 14 : Schéma de la méthode d'utilisation de matériaux graveleux dans le corps de digue.

La gestion intégrée des paramètres géotechniques est primordiale pour assurer la sécurité et la stabilité des digues. Tout matériau impropre utilisé dans l'édification des digues est l'assurance d'aboutir à de graves dommages en cas de précipitations exceptionnelles ou de crues.

2- mise en œuvre du remblai

De manière générale, la mise en œuvre de remblais s'effectue par couches successivement compactées sur de faibles épaisseurs.

En cas d'absence de matériel de compactage adapté, on pourra utiliser le passage d'un engin à chenilles, en veillant à bien homogénéiser les passages sur toute la largeur. Si un tel dispositif est employé, l'épaisseur maximale des couches est ramenée à 20 cm maximum.

Si les matériaux ont été identifiés en laboratoire, on pourra affiner ces valeurs (épaisseur et nombre de passes) en se référant au guide GTR, édité par le LCPC.

En cas d'arrêt prolongé, on scarifiera et on recompectera la dernière couche. Si cette dernière présente une teneur en eau trop élevée, on devra alors l'évacuer.

Une surépaisseur latérale est à prévoir de façon à retailer le talus dans le matériau compacté (compactage difficile en bordure).

3- préparation de la plateforme ou fond de fouille.

La terre végétale doit être décapée sur l'ensemble de l'emprise de la digue. Elle pourra être stockée en bordure des terrains en vue d'être reprise lors de la phase de réhabilitation du site.

On procédera à l'identification du sol support de la digue, en veillant à ce qu'il soit homogène et exempt de matériaux impropres (sols organiques, ...). Tout matériau impropre découvert lors de l'ouverture des fouilles devra être purgé. Une attention particulière devra être apportée à l'étanchéité au contact terrain naturel/digue. Pour cela, la plateforme sera scarifiée avant mise en œuvre de la première couche de remblai.

4- drainage interne de la digue

L'objectif du drainage interne des digues est d'éviter l'augmentation excessive de la pression interstitielle ainsi que les problèmes de renard. Le gradient hydraulique ainsi modifié permet d'assurer la stabilité globale de l'ouvrage.

Pour les digues de bassins en déblai-remblai de taille modeste (hauteur < 2 m), on pourra s'affranchir de la mise en place d'un système de drainage interne. En revanche, une très bonne étanchéité est requise pour le corps de digue ainsi qu'au niveau du contact sol/digue. Pour cela, la qualité de la mise en œuvre ne doit pas être négligée.

Pour les digues de hauteur > 2 m et/ou édifiées en remblai toute hauteur, on prévoira au minimum la réalisation d'un drain de pied, voire même d'un tapis drainant sous la base du remblai, côté externe.

5- Drainage externe et protection contre l'érosion

Pour limiter l'érosion de la digue en surface et afin d'éviter tout ruissellement, notamment sur le talus externe, on prévoira les dispositifs suivants :

- contre-pente d'environ 3 % en crête vers l'intérieur de la retenue ;
- système de captage et d'évacuation des eaux de ruissellement provenant de l'amont, dans le cas de bassins disposés contre un versant ;

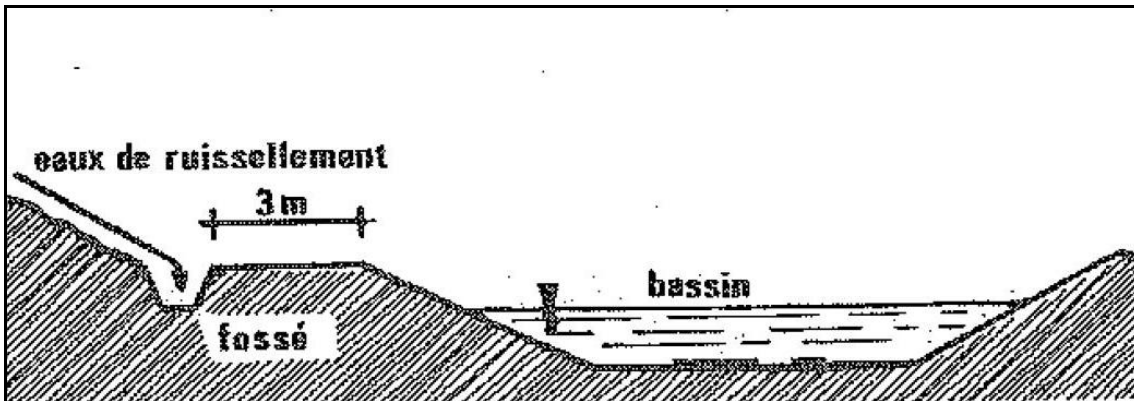


Figure 15 : Coupe schématique du système de captage des eaux de ruissellement dans le cas d'un bassin situé le long d'une pente (C. Bernhard, G. Degoutte).

Pour permettre l'entretien des ouvrages et pour ne pas risquer de mettre en cause la stabilité de la digue (glissement, érosion), on veillera à laisser une bande suffisante de 4 m au minimum entre les digues et le canal de dérivation (ou le lit de la crique le cas échéant). Le maintien d'un cordon boisé entre le cours d'eau (dévié ou non) et les ouvrages d'exploitation est requis pour la protection des berges, mais également pour contenir l'eau en cas de crue.

6. Gestion, surveillance et maintenance des ouvrages

6.1. GENERALITES

La surveillance des installations géotechniques des sites d'exploitations minières a pour but de détecter toute évolution des ouvrages ou des terrains environnants, de manière à déclencher un plan de maintenance de la manière la plus réactive possible. En effet, un problème décelé rapidement sera généralement plus facile et moins coûteux à traiter.

Différents moyens peuvent être mis en place pour assurer cette surveillance, cependant, elle ne peut être efficace que par l'intermédiaire d'une application rigoureuse et régulière de la part des exploitants.

Les ruptures de barrages sont rarement dues à des glissements en masse du parement aval, elles sont le plus souvent liées à l'action de l'eau :

- soit par érosion interne (percolations, drainage défaillant, etc.) ;
- soit par érosion externe (ravinement, débordement, affouillement, etc.).

Ceci implique que, outre la qualité de sa conception et de sa construction, la stabilité à long terme d'une digue dépend de la qualité de l'entretien de ses divers constituants.

La qualité de l'entretien est liée à la compétence des agents chargés des visites périodiques.

6.2. ENTRETIEN ET SUIVI DES OUVRAGES

Les tâches fondamentales de la surveillance des digues et bassins sont les suivantes :

- examen visuel détaillé de la digue et de ses abords, effectué à intervalles réguliers, à des saisons adaptées et par du personnel compétent ;

Pour les sites d'exploitations primaires, on peut ajouter :

- suivi piézométrique (niveau de la nappe dans le corps de la digue), et mesure du débit des drains ;

- mesures des déformations de la digue et du tassement des résidus (usages de repères topographiques).

6.2.1. Examen visuel

Concernant les inspections visuelles, on peut distinguer quatre catégories de visites pour le suivi des digues :

- 1- tournées « de routine », effectuées tous les mois environ par les techniciens en charges de l'entretien courant ;
- 2- tournées particulières immédiatement après des pluies ou crues exceptionnelles ;
- 3- visites d'experts, de fréquence annuelle ou bisannuelle ;
- 4- inspections approfondies, où tous les organes sont contrôlés (tous les 3 ans par exemple).

Le rapport de visite doit consigner le niveau d'eau dans la retenue, la présence de fuites, de fissures, de tassements (points bas, stagnations, ...) sur les crêtes de digue et les risbermes, d'érosion pluviale, etc.

En cas de découverte de zones de fuites avérées, de zones de suintements ou de zones humides, leur évolution en termes qualitatif - quantitatif quand c'est possible - doit être étroitement suivie.

6.2.2. Suivi piézométrique

La mise en place de piézomètres dans les corps de digues permettra d'y mesurer la hauteur d'eau (niveau statique/dynamique), de détecter ses éventuelles variations et d'apprécier aussitôt toute évolution suspecte, en particulier pour les bassins d'eau claire.

Les équipements devront être protégés des infiltrations d'eau et ne doivent pas atteindre le tapis drainant situé à la base du remblai, sous peine de provoquer des venues d'eau indésirables.

6.2.3. Mesure des déformations

Un suivi topographique pourra être mis en place par l'intermédiaire de repères disposés dans l'axe de la digue. Ce dispositif devra permettre de s'affranchir des mouvements parasites de surface (p.ex. ancrage de tiges scellées dans le remblai).

6.3. ENTRETIEN ET TRAITEMENTS DES DESORDRES

6.3.1. Entretien périodique

La tenue d'un registre permet de consigner l'ensemble des observations et résultats de tous les suivis périodiques mis en place dans la procédure de surveillance.

Un entretien régulier des surfaces des ouvrages permet de s'affranchir de l'apparition rapide de désordres :

- colmatages systématiques des ravines d'érosion et des éventuelles fissures de traction pouvant apparaître en crête des digues ou au niveau des risbermes pour éviter les infiltrations susceptibles de déstabiliser le remblai.
- entretiens réguliers des ouvrages hydrauliques accessibles pouvant facilement être obstrués (évacuateurs de crue, récupérateurs d'eau, etc.).

6.3.2. Le traitement des désordres

L'apparition de circulations indésirables et de fuites avérées dans le corps de digue nécessite l'intervention d'un spécialiste pour réaliser un diagnostic géotechnique.

Les dispositions curatives à mettre en œuvre pour ce type de désordre doivent conduire à l'interruption des circulations d'eau qui en sont la cause.

Suivant les possibilités de captage des circulations d'eau, plusieurs types de traitements peuvent être mis en place. Pour des circulations d'eau trop profondes pour être interceptées et n'affectant pas la stabilité d'ensemble, une simple maîtrise des résurgences en surface par des dispositifs drainants (masques ou éperons drainants en matériaux graveleux) permettant de les évacuer peut suffire.

Si les circulations d'eau sont peu profondes (quelques mètres) et affectent la digue dans son ensemble, la reconstruction partielle de la digue ou la mise en œuvre d'une clé d'étanchéité (en matériaux argileux soigneusement compactés) sont des exemples de confortement qui peuvent être efficaces. Le renforcement de l'ouvrage par la constitution d'une risberme en pied de digue (aval) ne peut-être que tout à fait exceptionnel compte-tenu de la rapidité avec laquelle il doit être réalisé et des risques encourus par le personnel chargé de sa mise en œuvre.

6.4. CAS PARTICULIERS DES DIGUES D'EXPLOITATIONS SECONDAIRES

La surveillance des digues externes dans les exploitations secondaires (cf. 5.1.2), bien que de tailles plus modestes que celles des exploitations primaires, doit être réalisée de manière aussi rigoureuse que pour ces dernières compte-tenu de l'impact immédiat d'une rupture sur le milieu aquatique. Par contre il s'agira essentiellement d'une surveillance visuelle, renforcée en périodes de crues et/ou de fortes précipitations, s'attachant à situer et décrire – avec photos dans la mesure du possible - les désordres susceptibles de se manifester sur les 2 flancs, tels que affaissement de la crête, crevasses, loupes de glissement, suintements, renards. Comme pour les digues d'exploitations primaires, ces observations devront être consignées dans un dossier de suivi des ouvrages au même titre que les éventuelles mesures de réparation mises en œuvre. Concernant celles-ci, le contexte fait qu'il s'agira principalement de rechargement en matériaux, ce qui suppose d'en disposer facilement sur le site. A cet effet, nous conseillons vivement de constituer des stocks de matériaux grossiers (graves et blocaille) qui permettent de réduire plus facilement les grosses brèches sous eau que les matériaux fins. Là encore le recours à un avis de spécialiste doit être systématisé. Notons par ailleurs que dans ce type d'exploitation, il est nécessaire d'anticiper les phases de réhabilitations pendant que se déroule les phases d'exploitation.

7. Conclusion

La réalisation des digues d'exploitations minières, aussi bien dans un cadre géographique général que dans le contexte particulier de la Guyane, nécessite une réflexion globale faisant appel à de nombreuses compétences techniques. Cependant, les spécificités locales imposent de considérer la réalité des moyens accessibles aux exploitants (ressources locales en matériaux de remblais, moyens techniques et humains, etc.), tout en conservant des objectifs de réalisation d'ouvrages de qualité pour une exploitation pérenne, conduite dans de bonnes conditions et respectueuse aussi bien pour l'Homme que pour l'environnement.

Les différentes étapes qui mènent à la réalisation de ce type d'ouvrage, depuis le choix de son implantation, jusqu'à la détermination des conditions de son exécution, sont envisagées dans le but de conserver les caractéristiques nécessaires à leur maintien en bon état sur le long terme. Pour cela, la réalisation d'études géologiques et de reconnaissances géotechniques spécifiques est impérative.

En outre, au vu des conditions météorologiques locales, les exploitants miniers ne peuvent s'affranchir de mettre en place des protocoles de surveillance périodique pour permettre la plus grande réactivité possible en termes de maintenance de ces ouvrages.

Les impacts économiques engendrés par des études spécifiques et par la mise en place d'une surveillance adaptée - périodicité accrue lors de précipitations ou de crues exceptionnelles - apparaissent comme négligeables en regard des pertes éventuelles en cas de ruine partielle voire de rupture des ouvrages.

Outre l'aperçu des considérations réglementaires existantes relatives aux digues d'exploitations minières, le présent guide de bonnes pratiques propose une certaine sensibilisation aux risques encourus lors du dysfonctionnement d'ouvrages et fournis les principes généraux en termes de conception et de réalisation des digues d'exploitations minières dans le contexte guyanais.

8. Bibliographie

ATLAN Y., DESURMONT M., VAGNERON J.M. (1978). Stériles et déchets miniers : les digues à stériles. Rapport BRGM/78 SGN 570 GEG.

AUBERTIN M. et al. Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers : problèmes persistants et méthodes de contrôle.

BARTHELEMY F., MARTIN X. et NICOLAZO J.L., (2004). La réglementation en matière de sécurité des barrages et des digues.

BATES J. (2002). Barragens de rejeitos. 1^a ed. - São Paulo: Signus Editora.

BERNHARD C., DEGOUTTE G. (1990). Le génie civil des bassins de lagunage naturel. Documentation technique FNDAE, CEMAGREF, septembre 1990.

BROCHARD F., MONTFORT M. Evaluation des débits caractéristiques sur les bassins versants non jaugés en Guyane. (Brochard F., Montfort M.,

CFBR (2010). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai.

DDAF de l'ALLIER (2007). Les plans d'eau et la loi sur l'eau : guide de constitution des dossiers de déclaration et d'autorisation.

FOSTER et al., (2000). A method for assessing the relative likelihood of failures of embankment dams by piping, revue canadienne de géotechnique, 38(4): 695-706.

H2E, (2010). Dimensionnement des bassins de décantation en Guyane : 24 simulations sur 4 sites. Paramétrage de la modélisation obtention de dimensions économiquement et écologiquement acceptable

KOCH-MATHIAN J.Y. (2001). Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues à sites uranifères. Application à deux sites pilotes. BRGM/RP-51068-FR, 99p., 6 fig., 2 tabl., 3 ann.

LCPC – SETRA (1980). Recommandation pour la réalisation des remblais et des couches de formes.

MERIAUX P. , ROYET P., FOLTON C. (2004). Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. Cemagref édition, 199p.

MICHALSKI E.R., CLERDOUET D. (1988). La sécurité des petits barrages, analyse des risques potentiels, propositions de mesures techniques préventives. Rapport BRGM/88 SGN 968 GEG, décembre 1988.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Techniques des barrages en aménagement rural.
(groupe

PHILIPPONNAT G., HUBERT B. (2008). Fondations et ouvrages en terre.

POST G., GUEBER P. (1973). Conception du drainage dans les barrages en terre.

VICK, (1996). Failure of the Omai dam. Geotechnical news, pp. 34-39.

VICK, (1997). Failure of the Omai dam : Closure. Geotechnical news, pp. 49-55.

Annexe 1

Tableau récapitulatif des actions à mener pour l'élaboration et la surveillance des digues d'exploitations minières

Élaboration

1. Étude géologique du site (1/1000)

- levé topographique (lidar, stéréo-photogrammétrie aérienne, levés au sol) ;
- morphologie ;
- lithologie ;
- structurologie (orientation des couches, système de discontinuité et failles) ;
- altération ;
- hydrogéologie ;
- construction de coupes géologiques.

2. Etude hydrologique

- bilan du bassin versant de surface : étude des précipitations, détermination des débits de ruissellement (débits moyens et des hautes eaux pour les exploitations alluvionnaires) en vue des prévisions de crues et du dimensionnement de l'évacuateur de crue et des ouvrages annexes ;
- pertes par infiltration (essais de perméabilité *in situ*).

3. Recherche et étude des matériaux disponibles pour la construction

- zones d'emprunt (reconnaisances géophysiques et sondages à la pelle mécanique) ;
- qualité et volume des matériaux disponibles (essais en laboratoire, planches de compactage *in situ* pour détermination du mode de compactage : épaisseur des couches et nombre de passes du compacteur disponible) ;
- caractérisation mécanique des matériaux compactés (essais de cisaillement) ;
- caractérisation hydraulique des matériaux compactés (mesures de perméabilité *in situ* sur planches d'essais de compactage).

4. Étude géotechnique

- caractéristiques mécaniques (essais de cisaillement en laboratoire) du sol-support de la digue si trop forte épaisseur de sols compressibles pour être curée, et homogénéité longitudinale et transversale (géophysique et/ou essais de pénétration dynamique) ;

- essais d'infiltration *in situ* au droit de la digue si doute sur quant à la faible perméabilité du sol-support ;
- étude de stabilité de la digue vis-à-vis du poinçonnement (en cas de sol-support médiocre) ;
- étude de stabilité de la digue vis-à-vis des glissements à l'aide d'un logiciel adapté (intégration de la composante hydraulique interne à la digue) ;
- dans le cas d'une retenue dans un talweg très marqué étude de la stabilité des versants sous eau.

Suivi des travaux

Des contrôles géologiques doivent être effectués lors de l'excavation des fouilles de fondation des digues car ils peuvent faire apparaître des anomalies, par rapport aux prospections antérieures, demandant une adaptation du projet.

Des contrôles de qualité des matériaux mis en œuvre doivent également être systématiquement menés. Il s'agit de contrôler :

- le compactage des remblais constituant le corps de digue (visuel, pénétromètre dynamique, mesures de densité) ;
- la granulométrie des matériaux utilisés pour les filtres, ainsi que leur mise en place.

Surveillance

Elle portera sur :

- la profondeur de la ligne de saturation dans la/les digues (piézomètres) ;
- l'apparition de suintements, écoulements diffus, renards, sur le parement aval de la digue, à l'interface digue-encaissant, aux interfaces entre levées (cas des digues à stérile) ;
- la formation de loupes de glissements ;
- l'apparition de fissures, crevasses, en crête et sur les parements ;
- l'apparition de déformations topographiques sans ruptures marquées (affaissements, courbure de la crête et/ou des parements).

Une attention toute particulière doit être portée sur le délai d'interprétation des faits observés car il conditionne la rapidité des éventuelles décisions d'intervention.

Annexe 2

Classification et enchainement des missions géotechniques (NF P94-500)

Tableau 1 — Schéma d'enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique

Étape	Phase d'avancement du projet	Missions d'ingénierie géotechnique	Objectifs en termes de gestion des risques liés aux aléas géologiques	Prestations d'investigations géotechniques *
1	Étude préliminaire Étude d'esquisse	Étude géotechnique préliminaire de site (G11)	Première identification des risques	Fonction des données existantes
	Avant projet	Étude géotechnique d'avant-projet (G12)	Identification des aléas majeurs et principes généraux pour en limiter les conséquences	Fonction des données existantes et de l'avant-projet
2	Projet Assistance aux Contrats de Travaux (ACT)	Étude géotechnique de projet (G2)	Identification des aléas importants et dispositions pour en réduire les conséquences	Fonction des choix constructifs
3	Exécution	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3)	Identification des aléas résiduels et dispositions pour en limiter les conséquences	Fonction des méthodes de construction mises en œuvre
		Supervision géotechnique d'exécution (G4)		Fonction des conditions rencontrées à l'exécution
Cas particulier	Étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques	Diagnostic géotechnique (G5)	Analyse des risques liés à ces éléments géotechniques	Fonction de la spécificité des éléments étudiés
* NOTE À définir par l'ingénierie géotechnique chargée de la mission correspondante.				

Tableau 2 — Classification des missions types d'ingénierie géotechnique

<p>L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique doit suivre les étapes d'élaboration et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géologiques. Chaque mission s'appuie sur des investigations géotechniques spécifiques.</p> <p>Il appartient au maître d'ouvrage ou à son mandataire de veiller à la réalisation successive de toutes ces missions par une ingénierie géotechnique.</p>
<p>ÉTAPE 1 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES PRELABLES (G1)</p> <p>Ces missions excluent toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre d'une mission d'étude géotechnique de projet (étape 2). Elles sont normalement à la charge du maître d'ouvrage.</p> <p>ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉLIMINAIRE DE SITE (G11)</p> <p>Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire ou d'esquisse et permet une première identification des risques géologiques d'un site :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours. — Définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir un rapport avec un modèle géologique préliminaire, certains principes généraux d'adaptation du projet au site et une première identification des risques. <p>ÉTUDE GÉOTECHNIQUE D'AVANT PROJET (G12)</p> <p>Elle est réalisée au stade de l'avant projet et permet de réduire les conséquences des risques géologiques majeurs identifiés :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, certains principes généraux de construction (notamment terrassements, soutènements, fondations, risques de déformation des terrains, dispositions générales vis-à-vis des nappes et avoisinants). <p>Cette étude sera obligatoirement complétée lors de l'étude géotechnique de projet (étape 2).</p>
<p>ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE PROJET (G2)</p> <p>Elle est réalisée pour définir le projet des ouvrages géotechniques et permet de réduire les conséquences des risques géologiques importants identifiés. Elle est normalement à la charge du maître d'ouvrage et peut être intégrée à la mission de maîtrise d'œuvre générale.</p> <p>Phase Projet</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir une synthèse actualisée du site et les notes techniques donnant les méthodes d'exécution proposées pour les ouvrages géotechniques (notamment terrassements, soutènements, fondations, dispositions vis-à-vis des nappes et avoisinants) et les valeurs seuils associées, certaines notes de calcul de dimensionnement niveau projet. — Fournir une approche des quantités/délais/coûts d'exécution de ces ouvrages géotechniques et une identification des conséquences des risques géologiques résiduels. <p>Phase Assistance aux Contrats de Travaux</p> <ul style="list-style-type: none"> — Établir les documents nécessaires à la consultation des entreprises pour l'exécution des ouvrages géotechniques (plans, notices techniques, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel). — Assister le client pour la sélection des entreprises et l'analyse technique des offres.
<p>ÉTAPE 3 : EXÉCUTION DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES (G3 et G 4, distinctes et simultanées)</p> <p>ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXÉCUTION (G3)</p> <p>Se déroulant en 2 phases interactives et indissociables, elle permet de réduire les risques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures d'adaptation ou d'optimisation. Elle est normalement confiée à l'entrepreneur.</p> <p>Phase Étude</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment validation des hypothèses géotechniques, définition et dimensionnement (calculs justificatifs), méthodes et conditions d'exécution (phasages, suivis, contrôles, auscultations en fonction des valeurs seuils associées, dispositions constructives complémentaires éventuelles), élaborer le dossier géotechnique d'exécution. <p>Phase Suivi</p> <ul style="list-style-type: none"> — Suivre le programme d'auscultation et l'exécution des ouvrages géotechniques, déclencher si nécessaire les dispositions constructives prédéfinies en phase Étude. — Vérifier les données géotechniques par relevés lors des excavations et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats). — Participer à l'établissement du dossier de fin de travaux et des recommandations de maintenance des ouvrages géotechniques. <p>SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION (G4)</p> <p>Elle permet de vérifier la conformité aux objectifs du projet, de l'étude et du suivi géotechniques d'exécution. Elle est normalement à la charge du maître d'ouvrage.</p> <p>Phase Supervision de l'étude d'exécution</p> <ul style="list-style-type: none"> — Avis sur l'étude géotechnique d'exécution, sur les adaptations ou optimisations potentielles des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, sur le programme d'auscultation et les valeurs seuils associées. <p>Phase Supervision du suivi d'exécution</p> <ul style="list-style-type: none"> — Avis, par interventions ponctuelles sur le chantier, sur le contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur, sur le comportement observé de l'ouvrage et des avoisinants concernés et sur l'adaptation ou l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur.
<p>DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)</p> <p>Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, rabattement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans d'autres éléments géotechniques. <p>Des études géotechniques de projet et/ou d'exécution, de suivi et supervision, doivent être réalisées ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique, si ce diagnostic conduit à modifier ou réaliser des travaux.</p>



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Guyane
Domaine de Suzini – Route de Montabo
BP 552
97 333 – Cayenne cedex - France
Tél. : 05 94 30 06 24