

TRACTEBEL ENGINEERING S.A.

Le Delage - 5, rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers CEDEX - FRANCE
tel. +33 1 41 85 03 69 - fax +33 1 41 85 03 74
engineering-fr@gdfsuez.com
www.tractebel-engineering-gdfsuez.com

AREVA

Etablissement du dossier géotechnique des ouvrages de l'Ecarpière

Site : Ecarpière

DOSSIER GEOTECHNIQUE

P.005961.0003 NT09

02	02/07/18	Prise en compte des remarques d'Orano	Final	L. BAZIN	P.MASSAAD	L. BAZIN
01	24/04/18	Première diffusion	1ère emission	L.TARDIEUX	P.MASSAAD	L. BAZIN

REV.	JJ/ MM/ AA	SUJET DE LA REVISION	STAT.	REDIGE	VERIFIE	APPROUVE
-------------	-------------------	-----------------------------	--------------	---------------	----------------	-----------------

SOMMAIRE

1.	CONTEXTE DE L'ETUDE.....	2
2.	DOCUMENTS DE REFERENCE.....	4
3.	FICHE SYNOPTIQUE DE L'OUVRAGE.....	5
4.	DESCRIPTION DU SITE.....	10
4.1.	HISTORIQUE DU SITE.....	10
4.2.	CADRE GEOTECHNIQUE DU SITE ET EXISTENCE D'AVOISINANTS.....	11
4.2.1.	Contexte géotechnique.....	11
4.2.2.	Description du site de l'Ecarpière.....	11
4.2.3.	Caractéristiques des Dignes de l'Ecarpière.....	12
4.2.4.	Environnement de l'ouvrage : avoisinants et ouvrages annexes.....	13
5.	SYNTHESE DES INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES.....	15
5.1.	CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL.....	15
5.2.	HYDROGEOLOGIE.....	16
5.2.1.	Contexte hydrogéologique général.....	16
5.2.2.	Contexte hydrogéologique local.....	17
5.3.	DRAINS.....	18
5.4.	PIEZOMETRIE.....	19
5.4.1.	Dispositifs équipant la digue.....	19
5.4.2.	Niveaux relevés lors de la campagne de GINGER en 2015.....	23
5.5.	RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES - GINGER CEBTP - 2015.....	24
5.5.1.	Coupe stratigraphique type.....	24
5.5.2.	Reconnaissances in situ.....	25
5.5.3.	Programme des essais de laboratoire.....	25
5.5.4.	Analyse des essais de laboratoire.....	25
5.5.5.	Analyse des essais in-situ.....	27
5.5.6.	Conclusion sur les données géotechniques disponibles.....	27
5.6.	RISQUES GEOTECHNIQUES MAJEURS.....	28
6.	ALEA SSMIQUE.....	30
6.1.	DETERMINATION DU COEFFICIENT DE SOL S.....	30
6.2.	CALCUL DES ACCELERATIONS DE REFERENCE POUR T > 475 ANS.....	31
6.3.	ETUDE DE STABILITE DE LA DIGUE DE L'ECARPIERE - TRACTEBEL - 2017.....	32
6.3.1.	Calculs statiques.....	32
6.3.2.	Liquéfaction.....	33
6.3.3.	Calculs sismiques - Période de retour de 5 000 ans.....	33
6.3.4.	Etude de sensibilité au séisme - Période de retour de 30 000 ans.....	33
6.3.5.	Conclusion sur l'étude de stabilité.....	34
7.	MESURES TOPOGRAPHIQUES - CONTROLE DESTASSEMENTS.....	35
7.1.	EVOLUTION DESTASSEMENTS.....	35
7.2.	CONCLUSION.....	37

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs n°3 et 4 (PNGMDR 3 et 4) 2013-2015 et 2016-2018. Les demandes portent sur les points rappelés ci-après :

- Engager de manière prioritaire la constitution d'un dossier géotechnique complet pour chaque digue de stockage de résidus de traitement minier ;
- Poursuivre la démarche d'évaluation de la sureté des digues par une étude de sensibilité de leur stabilité sous séisme en fonction de la période de retour visée et du niveau d'aléa sismique associé ;
- Etablir sur base du constat posé sur la stabilité de ces digues des propositions de mesures de confortement jugées nécessaires à mettre œuvre pour garantir le niveau de sûreté requis pour chaque digue.

Ces prescriptions ont été reprises dans le décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs :

o Article 13.V :

Areva remet aux ministres chargés de l'énergie et de l'environnement, pour le 31 décembre 2013, un plan d'action en vue de constituer les dossiers géotechniques associés à chaque digue puis évaluer leur stabilité et déterminer l'éventuelle nécessité de les renforcer, notamment au regard de leur vulnérabilité vis-à-vis des aléas naturels et de leur potentiel cumul. Ce plan comprend notamment le calendrier envisagé ainsi que la liste des sites jugés aujourd'hui prioritaires. L'ASN est saisie pour avis sur ce plan d'action.

Suite au décret 2017- 23 du 2 février 2017 :

- o AREVA devra poursuivre la constitution des dossiers géotechniques et appliquer la méthodologie définie par le groupe de travail sur la stabilité mécanique des digues sur tout ou partie de ses sites. A l'issue de cette étape, AREVA analysera les résultats de cette évaluation et devra rendre ses conclusions en termes de robustesse des ouvrages pour les durées de vie visées et formulera des propositions en termes de suivi et d'entretien des ouvrages ou de renforcement. Ces conclusions devront s'appuyer, d'une part, sur les résultats de l'étude de la tenue sur le long terme de ces ouvrages et, d'autre part, sur l'évaluation des conséquences éventuelles d'une rupture de ceux-ci.

Ces études seront remises au Ministre chargé des mines avant le 31 décembre 2018.

La sélection des sites prioritaires a été réalisée de manière à identifier les sites représentatifs et/ou prioritaires dans une démarche d'évaluation de la sûreté des ouvrages. Ainsi, suite à l'analyse multicritère réalisée dans le rapport P.005961.NT01, **le site de l'Ecarpière** a été retenu. Cet ouvrage, de type « sables cyclonés » présente la plus grande hauteur sur fondation et est le seul se situant dans une zone de sismicité classée niveau 3.

Le présent rapport s'attache à l'établissement du dossier géotechnique de l'aménagement de l'Ecarpière.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

Référence	Titre du document
[1] YL14 0008	Caractérisation des matériaux constitutifs de la digue de l'Ecarpière - GINGER CEBTP, Septembre 2016
[2] P.005961.NT07	Analyse de stabilité de la digue de l'Ecarpière - TRACTEBEL ENGINEERING, Mai 2017
[3] P.007502	Rapport d'assistance technique à la surveillance de la digue de l'Ecarpière - TRACTEBEL ENGINEERING, Juin 2015
[4] P.005961.NT01	Mission M1 - Sélection des digues prioritaires - TRACTEBEL ENGINEERING, Mars 2014
[5] 12487RP05	Assistance pour la surveillance des digues de l'Ecarpière - AREVA NC, Janvier 2010
[6] TL09-04-07-R1 REV A	Contrôle des tassements - Opération de Septembre 2009 - AREVA NC, Novembre 2009
[7] TABLEAU DE VALEURS BRUTES	Suivi des hauteurs d'eau piézométriques et débits des drains - AREVA NC VENDEE, Janvier 2012
[8] TL14-08-02-R1-REV A	Contrôle des tassements - Opération de Septembre 2014 - AREVA MINES, Septembre 2014

3. FICHE SYNOPTIQUE DE L'OUVRAGE

SITUATION ADMINISTRATIVE DU BARRAGE

Nom de la concession :	Concession de Clisson
Nom de la mine :	Mines de l'Ecarpière, avec usine de traitement des minerais provenant de diverses exploitations de l'ancienne Division minière de Vendée de COGEMA
Historique :	Concession active, octroyée au CEA le 25/07/69 puis mutée à COGEMA par décret du 26/10/76
Documents officiels :	<ul style="list-style-type: none"> - Arrêté préfectoral du 30/11/1995 entérinant les conditions de réaménagement, et fixant les conditions de surveillance du site - ICPE autorisée par arrêté préfectoral du 16/05/83

ETAT DU SITE A L'ETAT INITIAL

Environnement

Bassin versant :	Les premiers bassins de décantations étaient installés dans un vallon descendant vers la Moine ; aujourd'hui, la partie Sud de la digue s'appuie sur une crête topographique vers la côte 97 NGF ; le bassin versant hors emprise de la digue est minime
Environnement du site :	Campagne ouverte, village de Saint-Crespin-sur-Moine (1200 hab.) à 500m de la digue Nord, et, nombreux petits hameaux.
Commune :	Gétigné (Loire-Atlantique) près de Clisson
Lieu-dit	L'Ecarpière

Géologie

Stratigraphie et lithologie :	Substratum des digues et bassins entièrement constitué par le granite à 2 micas de Mortagne-sur-Sèvre
Formations superficielles :	Altération en arène sablo-argileuse, épaisseur maximum 3-4m
Tectonique :	Forte fracturation du granite liée à une faille régionale passant le long de la Moine

Travaux miniers antérieurs

Mine à ciel ouvert :	3 fosses exploitées dans la vallée de la Moine, la plus proche à 200m au NW de la digue Nord, aujourd'hui comblées ou en eau
Mine souterraine :	Exploitation souterraine de 1954 à 1990 ; présence de galeries d'exploration à 13m sous l'extrémité Nord de la digue principale

CONCEPTION ET EXECUTION DES OUVRAGES

Ingénierie

Conception :	Par les services internes du CEA, puis de COGEMA
Construction :	Idem, 7.5 Mt de résidus de traitement stockés de 1958 à 1991 dans les bassins supérieurs
Réaménagement :	Idem, avec appui du CEBRP (calcul des tassements) et de M.Lebegue (calcul de stabilité) ; travaux effectués de 1992 à 1996

La digue

Fondations de la digue :	Arènes argileuse et terre végétale laissée en place, et devenue imperméable sous le poids des résidus
Digue principale (nord) :	A l'origine, barrage en argile, puis digue en sables cyclonés, mis en place par méthode semi-aval puis amont <ul style="list-style-type: none"> • $H_{max} = 60m$ • Epaisseur à la base : 250m

<p>Digue de ceinture :</p> <p>Historique :</p> <p>Auscultation</p> <p>Réaménagement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pente globale : 18 à 24° <p>En sables cyclonés (+ résidus de lixiviation dans la digue Sud) ; mise en place par méthode verticale puis amont sur les derniers mètres ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • L = 3 000m • H = 3 à 30m • Largeur en crête : 10m • Pente parement aval : 22° <p>Digue principale commencée en 1958, puis 3 extensions successives au sud dans les années 1970, puis fermeture du grand bassin à partir de 1983</p> <p>Contrôle topographique des tassements, sondages et boîtes piézométriques, suivi de l'exhaure des puits et fossés</p> <p>Remodelage du parement aval des digues de ceinture avec une pente de 21° pour améliorer la stabilité et la résistance à l'érosion ainsi que l'intégration paysagère</p>
Les bassins de décantation	
<p>Emprise :</p> <p>Fondations :</p> <p>Matériaux stockés :</p> <p>Couverture :</p> <p>Lame d'eau :</p>	<p>Emprise totale des bassins : 72 ha, dont 22 ha pour les digues</p> <p>Arène argileuse + terre végétale laissée en place et compactée</p> <p>Résidus de traitement de minerai d'uranium, après cyclonage</p> <p>2 à 8m de produits de lixiviation statique ou de décapage, puis 0.5m de stériles et terre végétale assurant la protection radiologique</p> <p>Il n'y a pas de lame d'eau permanente sur les bassins de stockage des boues de traitement des eaux.</p>
Les organes annexes	
Organes de maîtrise des eaux superficielles	
<p>Ouvrages de diversion :</p>	<p>Le fossé de ceinture recueille quelques apports venant du petit</p>

	bassin versant au SW
Eaux de la couverture :	Sur les bassins, création d'une topographie artificielle sans points bas, permettant de canaliser les eaux vers des fossés empierrés, qui se jettent dans les fossés de ceinture puis dans deux collecteurs périphériques
Ruissellement sur la digue :	Tous les parements avals sont garnis de larges pistes drainantes
Restitution des eaux :	Le collecteur périphérique Est alimente un bassin de contrôle situé au pied de la digue principale, avant rejet dans le Moine
Organes de drainage interne	
Etanchéité amont	Fonction assurée par les résidus décantés et par la terre végétale
Drainage interne	Rabattement de la nappe dans les digues assuré par des massifs drainants en sable de Loire, prolongé à l'aval par un perré ; ces drains sont accessibles dans la digue principale par 3 puits bétonnés et dans la digue Est par 13 regards situés à l'aplomb d'un collecteur.
Contrôle et restitution	Les eaux de drainage, qui ont lixivié partiellement les résidus, sont rassemblées au pied de la digue Nord dans un bassin distinct de celui des eaux météoriques, avant contrôle, traitement et stockage des boues dans les lagunes situées sur la couverture du bassin principal

SURVEILLANCE ET ENTRETIEN

Inspections visuelles

Fréquence hebdomadaire, ou plus en cas de pluies extrêmes, depuis 1996 est tenu à jour un registre des visites

Auscultation

Suivi piézométrique

18 piézomètres équipent la digue, le relevé des mesures se fait de manière mensuelle

Suivi topographique

Suivi altimétrique de 20 repères topographiques

Visites d'expert

Avant 2002 : 2 visites par an de M.Lebègue, avec compte rendu et rapports annuels

Depuis 2002 : Coyne et Bellier a une mission d'assistance pour la surveillance des digues avec l'inspection de chaque digue tous les 5 ans

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DU CORPS DE DIGUE

	Yd (kN/m ³)	Yh (kN/m ³)	C' (kN/m ²)	φ' (°)	W (%)	GTR
Sables cyclonés	15.5	19	0	32	19.1	B1 (37%) D1 (25%) A1 (25%) B5 (13%)

- Toutes les caractéristiques des matériaux sont disponibles au paragraphe 5.5.4.

4. DESCRIPTION DU SITE

4.1. Historique du site

La société COGEMA a exploité le site de l'Ecarpière en Gétigné, dans la vallée de la Moine, à partir de quatre fosses à ciel ouvert et d'une mine souterraine entre 1954 et 1991. Le minerai ainsi extrait alimentait sur place une usine de traitement des minerais d'uranium.

Historiquement, la construction de la digue principale a débuté en 1958, puis trois extensions ont été réalisées vers le Sud dans les années 70, et le bassin sud a été fermé en 1983. L'ensemble des digues a été érigé sur un substratum constitué de granite à deux micas de Mortagne sur Sèvre (il s'agit du rocher décapé des arènes granitiques les surplombant). De 1992 à 1996, des travaux de réaménagement du bassin de l'Ecarpière ont été entrepris :

- Remodelage du parement aval des digues de ceinture avec une pente de 21° (16° en moyenne pour la digue Nord) ;
- Couverture des bassins et des digues à l'aide de 2 à 8 m de produits de lixiviation et de 50 cm de stériles et de terre végétale ; à noter que les bassins ont été remodelés en prévoyant un point bas afin de canaliser les eaux vers les fossés empierrés puis dans les deux collecteurs (le collecteur Est alimente un bassin de contrôle avant rejet dans la Moine) ;
- Mise en place de larges pistes drainantes avec des fossés en contre pente sur les parements aval ;
- Création de deux bassins d'épandage des boues provenant de stations de traitement des eaux.

Actuellement, l'exploitation du site, qui consiste essentiellement en la surveillance, la maintenance et la réalisation des mesures de contrôle, est réalisée par ORANO. Une visite approfondie du site, par un expert extérieur, est prévue tous les cinq ans environ.

Depuis 2002, ORANO a confié à Coyne-et-Bellier une mission d'assistance pour la surveillance de ses digues qui comprend les prestations suivantes :

- L'inspection de chaque digue tous les 5 ans, afin d'émettre un avis extérieur sur le dispositif de surveillance des digues et de formuler des recommandations de correction ou d'amélioration le cas échéant,
- L'interprétation des mesures d'auscultation de chacune des digues (piézométrie, déplacements, débits de drainage).

4.2. Cadre géotechnique du site et existence d'avoisinants

4.2.1. Contexte géotechnique

D'après les données disponibles dont le rapport GINGER CEBTP (Réf[1]), le site est constitué de haut en bas par :

- Des terrains d'altération en arène sablo-argileuse d'épaisseur pouvant atteindre plusieurs mètres,
- De sables cyclonés,
- Eventuellement d'anciennes argiles constitutives d'un ancien barrage

En aval de l'ouvrage, la vallée de la Moine suit la grande faille régionale orientée N95°E, bordant le massif de granite de Mortagne où les versants rocheux sont souvent affleurants avec un remplissage alluvial sur 100m de large.

Le pied de la digue du bassin aval se situe à 5m au-dessus du niveau de la Moine.

On note la présence d'une mine souterraine ainsi que de galeries d'exploration à 13 m environ sous l'extrémité Nord de la digue principale. De la même manière on peut noter l'existence d'une mine à ciel ouvert avec 3 fosses exploitées dans la vallée de la Moine, la plus proche se situant à 200m au NW de la digue Nord, étant aujourd'hui comblée ou en eau.

Un désordre géotechnique a vu le jour en 1999 avec la naissance d'un fontis à environ 50m de la digue principale lié au chantier de l'ancienne mine souterraine.

4.2.2. Description du site de l'Ecarpière

Le stockage de l'Ecarpière était composé initialement de deux bassins principaux séparés par une digue centrale. Après arasement de cette digue centrale, les deux bassins principaux ont été regroupés en un unique bassin ceinturé par une digue.

Cette digue est composée de deux tronçons, qui diffèrent par leurs matériaux constitutifs et par leur méthode de construction :

- Au nord la digue principale était à l'origine un barrage en argile sur un vallon de l'affluent de la Moine, sur lequel la digue a été construite en sables cyclonés - partie grossière (0,15 à 0,50 mm), sableuse, des résidus de traitement des minerais d'uranium produits par l'usine - par la méthode « verticale » puis en « amont » (c'est-à-dire en rechargeant la digue depuis le sommet, dans un premier temps, puis par l'amont dans un second). Sa hauteur maximale est de 60m, avec une largeur de base de 250m. La pente globale du parement est comprise entre 18 et 24°.

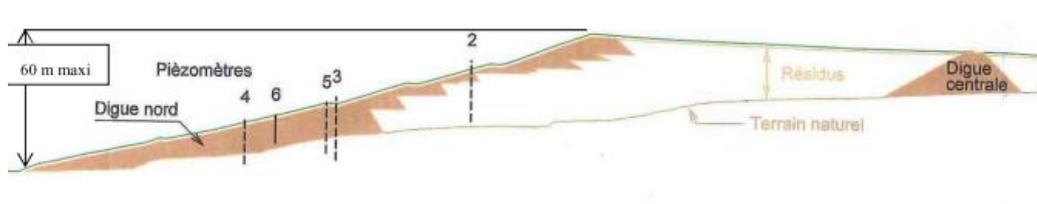


Figure 1 : Coupe type de la digue – Talus Nord

- Des digues de ceinture ont été construites autour de la digue principale en sables cyclonés (et en produits de lixiviation dans la partie sud) par la méthode verticale puis amont sur les derniers mètres (c'est-à-dire que les sables ont été déversés de part et d'autre de la digue depuis son sommet dans un premier temps, puis uniquement par l'amont lorsque la digue a eu atteint une certaine hauteur). La longueur totale des digues est de 3000 m avec des hauteurs allant de 3 à 30 m ; la longueur de la digue Nord (en pied) est de 1500 m. Leur largeur en crête est de 10 m. La pente globale de leur parement aval est de 22°.

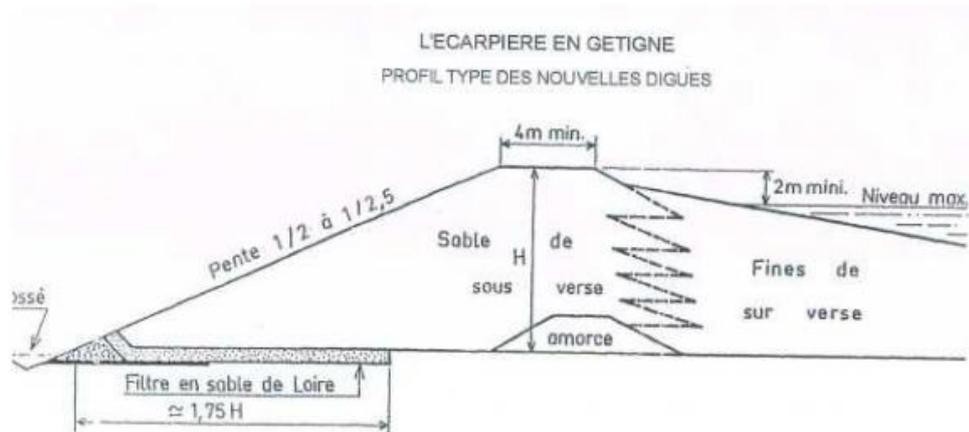


Figure 2 : Coupe type des nouvelles digues

4.2.3. Caractéristiques des Dignes de l'Ecarpière

Le bassin de stockage, d'une longueur de 3 000 m contient 7.5 millions de tonnes de résidus de traitement dynamique ainsi que 4 millions de tonnes de résidus de traitement statique utilisés pour la couverture.

Géométrie de la digue principale :

- Hauteur maximale de la digue de 60 m
- Pente aval : 16° - 3.5H/1V avec risbermes
- Pente amont supposée : 45° - 1H/1V
- Largeur en crête de 10 m
- Linéaire d'environ 1 500 m, en pied.

Matériaux de la digue :

- Digue de ceinture constituée principalement de sables cyclonés et de résidus de lixiviation statique (digue sud)

Caractéristiques particulières :

- La digue a été construite directement sur des arènes granitiques et terre végétale laissée en place.
- Il existe une couverture de 2 à 8 m de produits de lixiviation statique ou de décapage et de stériles puis 50cm de gabbros altérés et de terre végétale.

Principaux éléments géotechniques :

Les considérations à retenir vis-à-vis des données géotechniques sont les suivantes :

Digue de l'Ecarpière	
Corps des ouvrages	<ul style="list-style-type: none"> • Sables cyclonés • Résidus : matériaux sans cohésion et potentiellement instables
Fondation	Arènes granitiques et terre végétale

Tableau 1 : Principaux éléments géotechniques – Digue de l'Ecarpière

4.2.4. Environnement de l'ouvrage : avoisinants et ouvrages annexes

4.2.4.1. LOCAUX ADMINISTRATIFS

Des locaux administratifs et de maintenance sont situés en aval de la butte, côté nord.

4.2.4.2. STATION DE TRAITEMENT DES EAUX

Le site présente une station de traitement des eaux située en partie Ouest de la zone de stockage.

4.2.4.3. LA MINE SOUTERRAINE

Cette mine n'est plus en exploitation et ne rentre pas dans notre étude.

4.2.4.4. LA MINE A CIEL OUVERT

Les cinq mines ne sont plus en exploitation et ne rentrent pas dans notre étude.

4.2.4.5. ORGANES DE MAITRISE DES EAUX SUPERFICIELLES

- Ouvrages de diversion : Le fossé de ceinture recueille quelques apports venant du petit bassin versant au Sud-Ouest

- Eaux de la couverture : sur les bassins, création d'une topographie artificielle sans points bas, permettant de canaliser les eaux vers des fossés empierrés, qui se jettent dans les fossés de ceinture puis dans deux collecteurs périphériques
- Ruissellement sur la digue : tous les parements avals sont garnis de larges pistes drainantes, disposées tous les 10m en altitude, avec fossés en contre-pente, garnis d'enrochements (gabbro)
- Restitution des eaux : le collecteur périphérique Est alimente un bassin de contrôle situé au pied de la digue principale, avant rejet dans le Moine

4.2.4.6. ORGANES DE DRAINAGE INTERNE

- Etanchéité amont : fonction assurée par les résidus décantés eux-mêmes et par la terre végétale laissée en place
- Drainage interne : rabattement de la nappe dans les digues assuré par des massifs drainants en sable de Loire, prolongé à l'aval par un perré ; ces drains sont accessibles dans la digue principale par 3 puits bétonnés et dans la digue Est par 13 regards situés à l'aplomb d'un collecteur.
- Contrôle et restitution : les eaux de drainage, qui ont lixivié partiellement les résidus, sont rassemblées au pied de la digue Nord dans un bassin distinct de celui des eaux météoriques, avant contrôle, traitement et stockage des boues dans les lagunes situées sur la couverture du bassin principal

5. SYNTHÈSE DES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

5.1. Contexte géologique général

Le site de l'Ecarpière est localisé en bordure nord du batholite granitique de Mortagne. Il est constitué par un granite rose clair porphyroïde à gros grains, contenant de la biotite et de la muscovite. Les contacts entre le batholite de Mortagne et les terrains encaissants situés au Nord sont faillés et mylonitisés.

On constate également une forte fracturation du granite dans la région du batholite de Mortagne, due à la mise en place de la faille de Cholet-Izernay, également appelée « faille de la Moine », le long de laquelle est localisé le site de l'Ecarpière et qui s'est accompagnée de la formation d'une zone mylonitisée.

Au niveau du site de l'Ecarpière, on note également la présence d'une autre série de failles, de direction N-S à NW-SE et à fort pendage ouest sont également présentes. D'Ouest en Est, ces failles ont été nommées : faille de Hautegente, faille de la Braudière et faille des Forges.

Le substratum des digues et des bassins est, quant à lui, entièrement constitué par le granite à 2 micas de Mortagne-sur-Sèvre

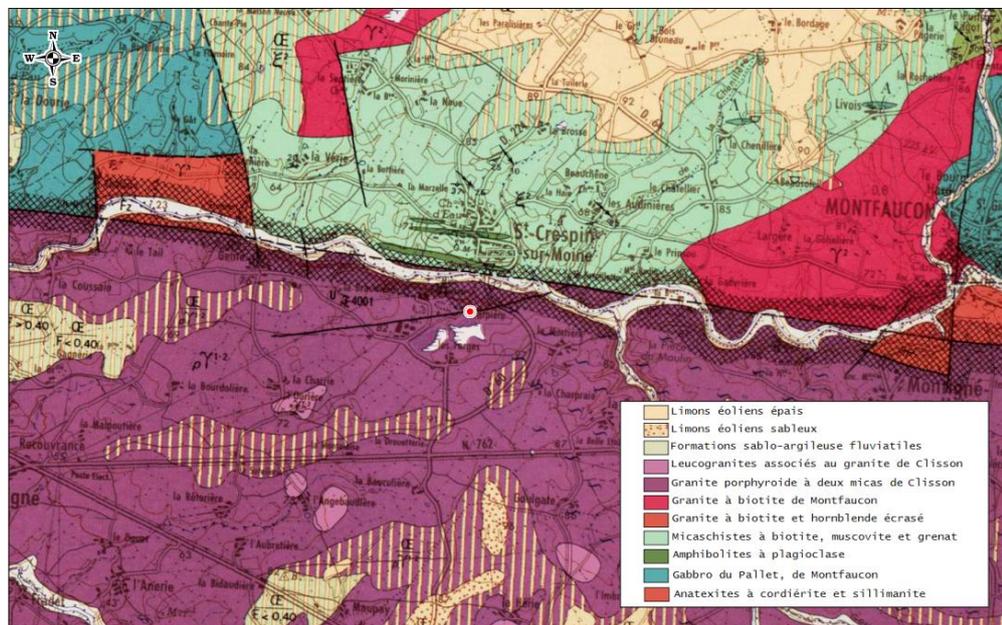


Figure 3 : Géologie générale du site de l'Ecarpière

5.2. Hydrogéologie

5.2.1. Contexte hydrogéologique général

Dans le cadre des travaux de réaménagement du site de l'Ecarpière, il a été demandé au BRGM en 1992, la réalisation d'une étude hydrogéologique générale sur l'ensemble du site minier - stockage de résidus de traitement du minerai compris.

L'étude du BRGM rappelle les caractéristiques hydrogéologiques des terrains du site minier et des spécificités du système hydrogéologique, qui ont été observées pendant l'exploitation :

- L'arène granitique, présente au-dessus du granite sain, est argileuse et peu perméable. Les puits fermiers localisés dans l'environnement du site n'ont pas été visiblement influencés au cours de l'exploitation minière.
Sous les arènes peu épaisses, le granite sain fissuré est relativement plus perméable que l'arène de surface.
Il n'existe pas de perte d'eau significative par infiltration souterraine : de nombreuses mares quasi-permanentes montrent la faible perméabilité de l'arène granitique.
- La rivière La Moine a creusé une vallée de type incisif du fait de la présence d'une faille majeure sous son lit, les autres cours d'eau marquent moins le paysage.
Sa nappe alluviale est sans relation directe avec les eaux profondes circulant dans le réseau de fractures ouvertes recoupées par les travaux miniers souterrains. Le système hydrogéologique de surface n'a pas été affecté par les travaux souterrains.
- Le site présente de faibles pentes et un réseau de drainage moyennement développé.
- Avant la mise en exploitation de la mine, la majeure partie de la pluie efficace (pluie totale ôtée de l'évapotranspiration) était drainée par le ruisseau de l'Ecarpière (situé à l'emplacement actuel du stockage) et rejoignait La Moine. La partie infiltrée devait rester dans la nappe superficielle sauf localement où le manque d'arène rendait possible l'infiltration directe dans le granite sain fissuré.
- En surface, le système hydrogéologique initial a été modifié par l'implantation du stockage de résidus, d'une surface totale d'environ 72 ha, à l'emplacement de l'ancien ruisseau de l'Ecarpière. Les dépôts de fines, de limons alluviaux et l'arène granitique sous-jacente rendent le soubassement du stockage quasi-imperméable ($K \approx 10^{-10}$ m/s - coefficient déterminé en laboratoire).

- Au cours de l'exploitation des travaux miniers souterrains, les eaux souterraines ont été rabattues par pompage jusqu'à 520 mètres de profondeur. L'arrêt de l'exploitation a conduit à un retour à l'équilibre du niveau piézométrique jusqu'à une cote supérieure au niveau de la Moine, c'est-à-dire proche de la surface, mais les eaux profondes restant séparées des eaux contenues dans les nappes d'arènes.

Les paramètres hydrodynamiques retenus dans le cadre de l'étude hydrogéologique du BRGM ont été les suivants :

	Perméabilité K	Emmagasinement S
Arènes	1.10^{-9} m/s	2.10^{-4}
Granite	$2,5.10^{-8}$ m/s	5.10^{-5}

Figure 4 : Paramètres hydrodynamiques du site retenus par le BRGM

Ils ont été estimés à partir des caractéristiques lithologiques des formations ainsi que des observations effectuées durant l'exploitation de la mine.

5.2.2. Contexte hydrogéologique local

Dans le contexte géologique décrit ci-avant, peuvent cohabiter plusieurs types de nappe. On distingue, de haut en bas : (cf. Réf[1])

- Une nappe de type perchée pouvant régner au sein des horizons superficiels, alimentée par la pluviométrie efficace,
- Une nappe libre présente au sein des résidus et dont l'exutoire serait situé en pied de la digue,
- Une nappe plus profonde de type fissurale pouvant se développer au sein de l'horizon de granite en fonction de l'état de fracturation du massif rocheux. Ce phénomène se traduit principalement par des venues d'eau de débits variables, et lorsqu'elles existent par des niveaux irréguliers.

5.3. Drains

En plus des mesures des niveaux piézométriques, l'exploitant mesure mensuellement les débits suivants :

- Débit des « Drains de pied de digue bassin 16000 m³ » : il s'agit des drains de la digue de fermeture du bassin des 16 000 m³, qui sont collectés dans un regard. La mesure réalisée est une mesure instantanée mensuelle à la sortie du drain et non faite avec le débit de la pompe ;
- Débit de la « Cascade » : il s'agit des débits des drains collectés dans les regards situés en pied de digue, tronçon Nord-est ;
- Débit de la « Collecte Fossés Ouest » : il s'agit des débits des drains du tronçon Ouest de la digue.

L'évolution des débits est reportée sur la figure ci-après.

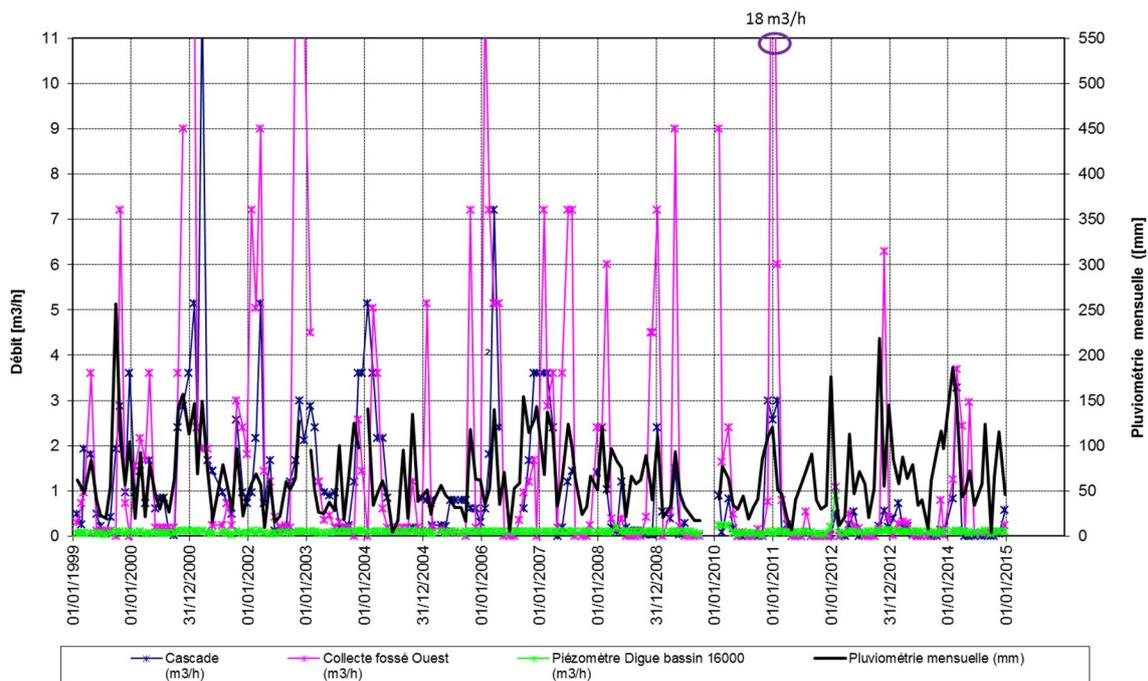


Figure 5 : Evolution des débits des drains sur la période 1999-2015

On constate que les débits de fuite du bassin dit « des 16 000 m³ » sont faibles, de l'ordre de 0,1 m³/h. Les variations sont faibles et on ne constate pas d'évolution à long terme.

Les débits des drains de la digue tronçons Ouest et Nord-Est présentent un débit de base sans pluie intense, d'environ 0,7 m³/h, avec un débit moyen pour la période tel que :

- Débit moyen des drains - tronçon Nord-Est : 1,5 m³/h ;
- Débit moyen des drains - tronçon Ouest : 2,5 m³/h.

Les courbes enregistrent de fortes variations, qui suivent celle de la pluviométrie : l'exploitant confirme qu'en cas de fortes pluies, les mesures sont faussées par les débits d'une partie des eaux de ruissellement sur le talus aval de la digue (bien qu'un système de collecte séparatif existe). En cas de fortes pluies, on observe des pointes de débit pouvant atteindre 18 m³/h : le 30 décembre 2010 après deux mois où la pluviométrie a été élevée : 109 mm et 121 mm, respectivement en novembre et décembre.

On ne constate pas d'évolution à long terme des débits des drains. La vérification du bon fonctionnement des drains s'appuie sur la piézométrie et le fait que la nappe reste bien rabattue sous le talus aval et surtout, sur examen visuel des fossés et puits, par lesquels transitent les débits.

5.4. Piézométrie

5.4.1. Dispositifs équipant la digue

Les 18 piézomètres équipant la digue sont implantés comme suit (voir figure ci-dessous) :

- 9 piézomètres ont été installés en pied de digue (piézomètres 3, 4, 5 et 6) et à mi-pente (piézomètres 1, 2, 11, 12 et 14) sur la digue principale (digue Nord).
- 9 piézomètres ont été installés en crête de digue principale (piézomètres C1, C2, C2 (gris), C3, C4, C5, C6, C7 et C7bis).

Les piézomètres situés en crête sont toujours secs, la nappe phréatique se situant vraisemblablement plus bas que les fond des tubes qui sont relativement courts (longueur comprise entre 9,40 et 11,50 m).

A noter que le piézomètre 12 est toujours sec.

Les niveaux des piézomètres Ci ne sont pas mesurés.

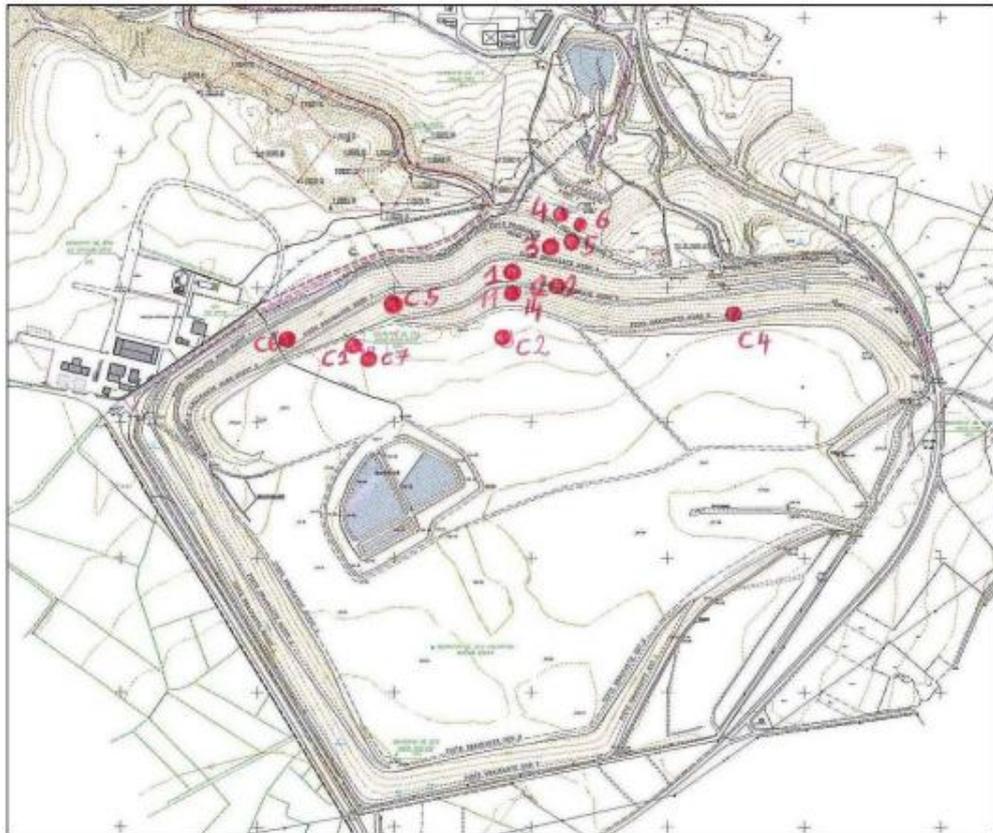


Figure 6 : Localisation des piézomètres équipant la digue

La fréquence de mesure des piézomètres par les agents d'ORANO Mining est mensuelle.

L'ensemble des niveaux relevés dans les 8 piézomètres (3, 4, 5, 6, 1, 2, 11, 14) est reporté sur la figure ci-après.

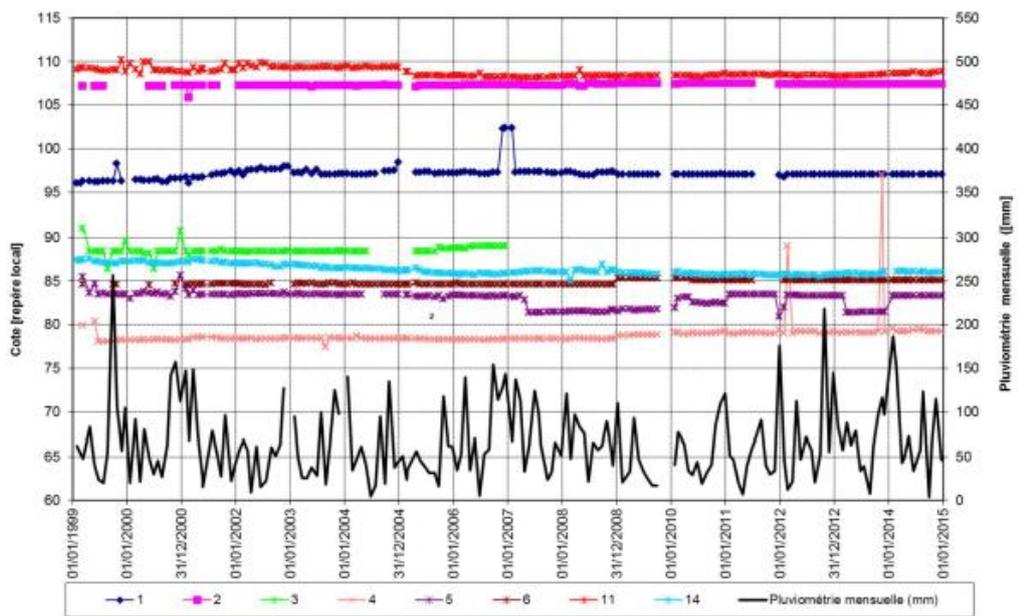


Figure 7 : Evolution des niveaux piézométriques depuis 1999

Quelques pics réversibles sont régulièrement enregistrés mais les niveaux mesurés sont globalement stables.

Il est également nécessaire de noter que **les altitudes ne sont pas données dans le système de nivellement NGF mais dans un repère local qui présente une différence d'altitude de 31,21m par rapport à ce système.**

Il apparaît donc que les variations des mesures piézométriques sont très faibles. Sur la période de mesures disponibles, on ne constate pas d'évolution à long terme. On note cependant quelques tendances, qui pourront être confirmées par les mesures futures :

- Légère augmentation du niveau du piézomètre 1 situé à mi-pente de la digue (+ 1,3 m en 10 ans). A noter quelques pics de mesure, qui correspondent à des mois particulièrement pluvieux : la mesure est sans doute faussée par les eaux de ruissellement sur le parement aval de la digue;
- Légère augmentation du niveau du piézomètre 3 : + 1 m entre 1999 et 2006. Depuis, aucune mesure n'est disponible, le piézomètre est noté comme « bouché à 15,35 m »,
- Légère diminution du niveau du piézomètre 14 situé quasiment en crête de digue : -1 m en 10 ans ;
- Le piézomètre 5 (situé en pied de digue) dont le niveau était stable jusqu'en avril 2007 a subitement vu son niveau diminuer de l'ordre de 2 m. Niveau stable depuis.

Sur le profil clé, on constate un bon rabattement de la nappe, qui est relativement distante du talus aval comme indiqué dans la figure ci-dessous :

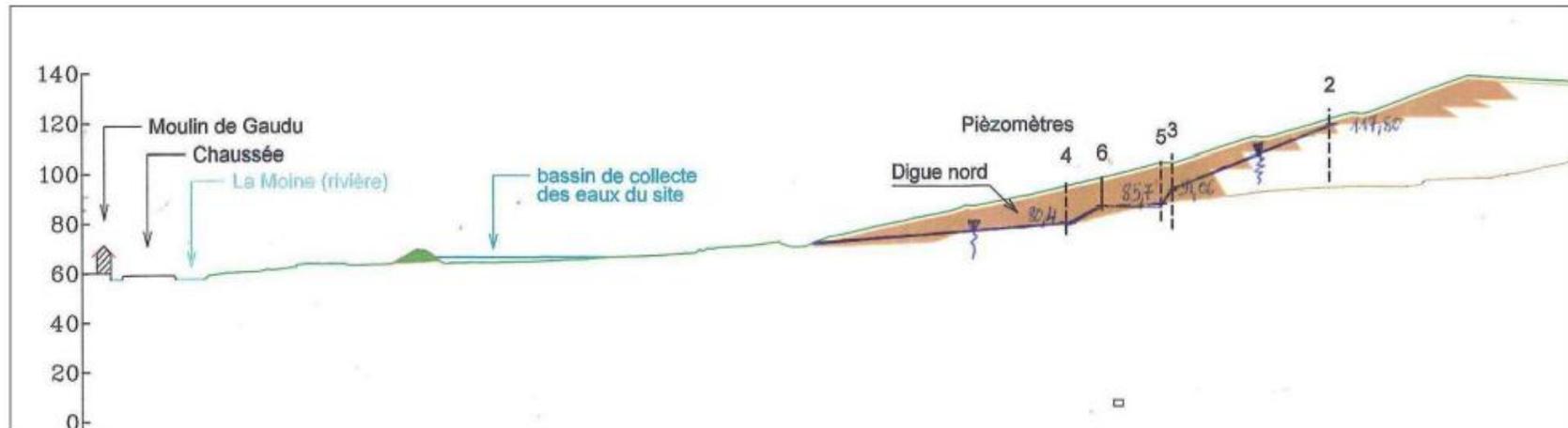


Figure 8 : Coupe de la digue principale et niveaux maximums mesurés sur la période 1999-2009

5.4.2. Niveaux relevés lors de la campagne de GINGER en 2015

Lors des investigations menées en 2015, les niveaux d'eau relevés dans le sondage SC1 s'établissent comme suit :

Sondage n°	Date de relevé	Altitude de la tête (NGF)	Relevé effectué en cours de forage		Observations
			Prof (m)	Cote (NGF)	
SC1	16/10/2015	70.5	14.9	55.6	Relevé effectué dans un forage réalisé au carottier LS (sans eau)
	21/10/2015		15.1	55.4	Relevé effectué avant réalisation de la diagraphie en forage

Tableau 2 : Niveaux d'eau relevés dans le sondage SC1 en 2015

En comparant les Figure 9 et Figure 6 on peut voir que le sondage SC1 se situe approximativement entre les piézomètres 5 et 6.

En tenant compte de la différence de 31.21m entre le repère local et le système de nivellement NGF il s'avère que les niveaux relevés sont :

Sondage n°	Date de relevé	Relevé effectué en cours de forage	
		Côte (NGF)	Côte (repère local)
SC1	16/10/2015	55.6	86.61
	21/10/2015	55.4	86.81

Tableau 3 : Niveaux relevés dans SC1 et exprimés en repère local

Si l'on compare le niveau relevé en octobre 2015 par GINGER avec les niveaux relevés en décembre 2014 dans les piézomètres 5 et 6 il vient que :

- Dans le piézomètre 6 un niveau de 85.13m a été relevé soit 1.5m de différence
- Dans le piézomètre 5 un niveau de 83.3m a été relevé soit 3.3m de différence

Il apparaît que les mesures effectuées par GINGER sont cohérentes avec les relevés mensuels.

Il est à noter que le régime hydrogéologique peut varier en fonction de la saison et de la pluviométrie.

Ces niveaux d'eau doivent donc être considérés à un instant donné, à conditions hydrauliques et pluviométriques données.

5.5. Reconnaissances géotechniques - GINGER CEBTP - 2015

5.5.1. Coupe stratigraphique type

Nous disposons uniquement de données documentées via la campagne effectuée par GINGER en 2015 en ce qui concerne les campagnes de reconnaissances qui ont été menées afin de caractériser le site.

Cette campagne conduite au niveau de la digue a compris les sondages suivants :

- 4 sondages destructifs SD1, SD2, SD3, SD4
- 1 sondage carotté SC1
- 2 sondages SPT : SPT1 et SPT2

L'analyse de l'ensemble des résultats a permis de dresser la coupe géotechnique suivante :

- Un horizon de recouvrement marron, correspondant à un niveau de terre végétale d'épaisseur 0.2 m,
- Horizon sablo-graveleux à passées limoneuses voire argileuses d'épaisseur 1m environ,
- Des Sables fins peu compacts correspondant aux sables de cyclonage de résidus de traitement de minerai d'épaisseur 28 m environ,
- Du granite fragmenté, cet horizon n'a été reconnu qu'au droit du sondage SC1.



Figure 9 : Localisation des sondages au niveau du site de l'Ecarpière

5.5.2. Reconnaissances in situ

Les investigations in situ suivantes ont été menées :

Type de sondage	Noms	Altitude NGF (m)	Prof. / TN (m)	Essais
Sondage destructif avec enregistrement des paramètres en continu	SD1	+ 84.72	10.5	
	SD2	+ 94.59	8.6	
	SD3	+ 94.75	8.7	
	SD4	+ 94.54	8.7	
Essai de pénétration au carottier - sondage SPT	SPT1	+ 84.67	10.85	5
	SPT2	+ 94.47	8.45	4
Sondage carotté	SC1	+ 70.50	34.0	

Tableau 4 : Investigation in situ

5.5.3. Programme des essais de laboratoire

Les essais suivants ont été réalisés dans le cadre de la campagne GINGER :

Identification des sols	Nombre	Norme
Teneur en eau pondérale W	10	NF P94-050
Masse volumique	6	NF P94-053
Analyse granulométrique par tamisage	9	NF P94-056
Analyse granulométrique par sédimentométrie	5	NF P94-057
Valeur au bleu du sol (VBS)	8	NF P94-068
Caractéristiques mécaniques	Nombre	Norme
Essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU + u)	4	NF P94-074

Tableau 5 : Programme des essais de laboratoire

5.5.4. Analyse des essais de laboratoire

Dans le tableau ci-dessous sont reportés les résultats des essais d'identification sur matériaux non rocheux, prélevés au sein du sondage SC1.

Les résultats montrent clairement que les matériaux constitutifs de la digue sont très peu cohésifs à non cohésifs avec plusieurs essais triaxiaux conduisant à des valeurs de C' égales à 0 kPa. Les essais laboratoires menés indiquent des angles de frottement compris entre 31 et 37°.

On peut également voir sur les essais d'identification que les matériaux sont à majorité sableuse (sables silteux à très silteux : B1 à B5 et sables alluvionnaires D1) avec néanmoins une proportion de fine (A1) non négligeable.

Prof. échant* (m/TA)	Formation/type de sol	W (%)	VBS	Dmax (mm)	Tamisat < 80 µm (%)	γ _d (kg/m ³)	φ' (°)	C' (kPa)	Classe GTR
3.65	3 - sable fin	21.7	/	20	13.4	1560	/	/	/
4.85	3 - sable fin	18.8	/	/	/	1480	37	0 / 2	/
5.25	3 - sable fin	20.5	0.12	1	11.2	/	/	/	B1
6.15	3 - sable fin	21.2	/	/	/	1510	/	/	/
6.85	3 - sable +/- fin	10.3	0.02	10	0.5	/	/	/	D1
7.60 à 8.55	3 - sable fin	10.3	0.09	2	9.2 *	/	/	/	D1
9.9	3 - sable fin	12.0	0.19	20	9.6	1800	/	/	B1
12.1	3 - sable fin	17.5	/	/	/	/	/	/	/
13.35	3 - sable fin	11.9	0.12	5	10.9	/	/	/	B1
13.85	3 - sable fin	10.2	/	/	/	1430	35	0	/
19.9	3 - sable fin	17.3	0.21	10	13.3	/	/	/	B5
22.7 à 23.1	3 - sable fin argileux	29.9	0.64	1	52.4 *	1520	31	3 / 7	A1
23.5 à 24.4	3 - sable fin argileux	31.3	0.89	1	55.4 *	1410	31	4 / 7	A1
25.0	3 - argile finement sableuse	31.9	/	1	66.2 *	/	/	/	/
25.7	3 - gravillons noirâtres dans matrice argilo-sableuse	22.3	/	20	44.8 *	/	/	/	/

Tableau 6 : Résultats des essais d'identification et des essais mécaniques

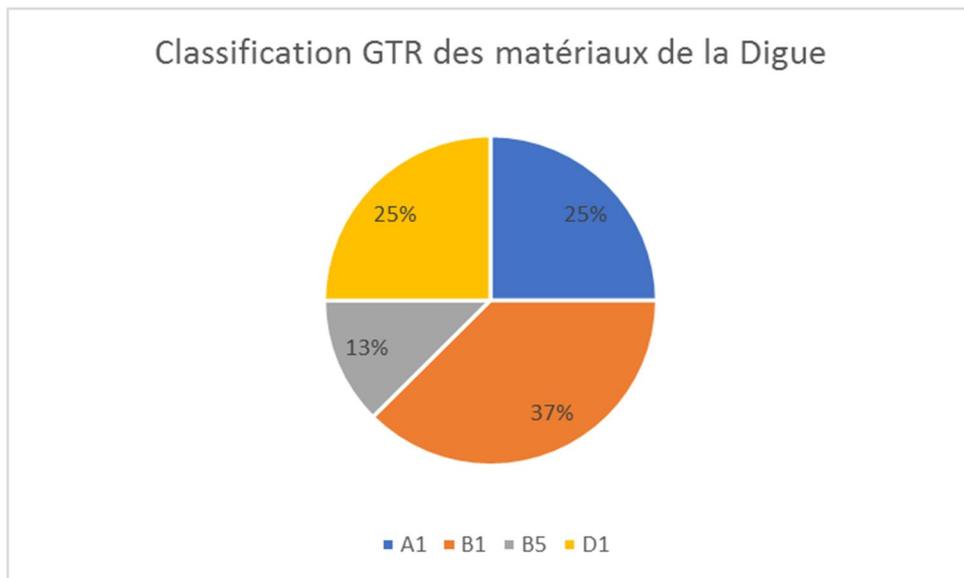


Figure 10 : Répartition des matériaux constitutifs de la digue selon le GTR

5.5.5. Analyse des essais in-situ

Les essais in-situ ont consisté en la réalisation de 2 sondages SPT : SPT1 et SPT2.

Les essais de pénétration au carotté ont été réalisés dans la formation correspondant aux sables cyclonés de résidus de traitement miniers.

Le tableau suivant montre les résultats des essais SPT :

Nombre de coups pour enfoncement de 30 cm (N)	7 à 15 (SPT1)	6 à 10 (SPT2)
Vitesse d'avancement (m/h)	70 à 200 (localement 300)	

Tableau 7 : Résultats des essais de pénétration au carottier

En utilisant les corrélations entre l'angle de frottement et les valeurs de SPT il est possible d'estimer l'angle ϕ de façon empirique. Ainsi selon l'ouvrage « Foundation Analysis and Design » on obtient un angle de frottement : $30^\circ < \phi' < 34^\circ$ pour des valeurs de SPT comprises entre 7 et 15.

Ces corrélations sont tout à fait en cohérence avec les résultats d'essais mécaniques (cf §5.5.4).

5.5.6. Conclusion sur les données géotechniques disponibles

L'analyse des résultats des essais triaxiaux ainsi que les corrélations entre l'angle de frottement ϕ' et les valeurs de SPT montre qu'il est conservatif de considérer les caractéristiques mécaniques suivantes pour caractériser le corps de digue constitués de sables cyclonés :

Matériaux	Angle de frottement ϕ'	Cohésion c'	Poids volumique sec	Poids volumique humide
Sables cyclonés	32°	0 kPa	15.5 kN/m ³	19 kN/m ³

Tableau 8 : Caractéristiques des sables cyclonés de la digue de l'Ecarpière

Il est nécessaire de préciser qu'aucun essai n'a été réalisé au niveau du substratum de granites altérés.

5.6. Risques géotechniques majeurs

Les risques géotechniques majeurs sont évalués à partir de la consultation des sites internet gouvernementaux Géorisques www.georisques.gouv.fr (consultation le 18/04/2018) ainsi qu'à partir du rapport de GINGER CEBTP (Cf. Réf[1]).

Vis-à-vis de la prévention du risque sismique, la zone d'implantation de l'ouvrage se situe en zone de sismicité niveau 3, soit un aléa modéré. Le risque de liquéfaction au niveau des digues est donc à vérifier.

Compte tenu de l'ancienne exploitation minière sur le site, des cavités anthropiques qui correspondent aux anciennes galeries peuvent y subsister. En effet, un fontis a été constaté en 1999 à environ 50m de la digue principale lié au chantier de l'ancienne mine souterraine.

Aucun risque de mouvements de terrain (glissement, chute, éboulement, effondrement, coulée ou érosion) n'est référencé sur la commune de Gétigné et la commune n'est pas soumise à un Plan de Prévention de Risques Mouvements de terrain.

La carte des aléas « Retrait-gonflement des sols argileux » du BRGM indique que le terrain est situé en zone d'aléa a priori nul vis-à-vis du phénomène de retrait gonflement des argiles.



Figure 11 : Aléa retrait-gonflement des argiles – Site de l'Ecarpière

Cinq arrêtés de catastrophes naturelles sont recensés pour la commune de Gétigné :

Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain : 1

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
44PREF19990068	25/12/1999	29/12/1999	29/12/1999	30/12/1999

Inondations et coulées de boue : 4

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
44PREF19830047	15/04/1983	30/04/1983	16/05/1983	18/05/1983
44PREF19900006	21/05/1990	21/05/1990	31/08/1990	16/09/1990
44PREF19930033	08/06/1993	09/06/1993	28/09/1993	10/10/1993
44PREF19980012	11/06/1997	11/06/1997	12/03/1998	28/03/1998

Figure 12 : Recensement des catastrophes naturelles pour la commune de Gétigné

La carte des aléas « Remontée de nappe » indique que le site étudié se situe en zone de sensibilité très faible à forte avec la présence d'une éventuelle nappe sub-affleurante vis-à-vis de ce risque (domaine de socle). La carte consultable sur le site www.inondationsnappes.fr (consultation le 18/04/2018).

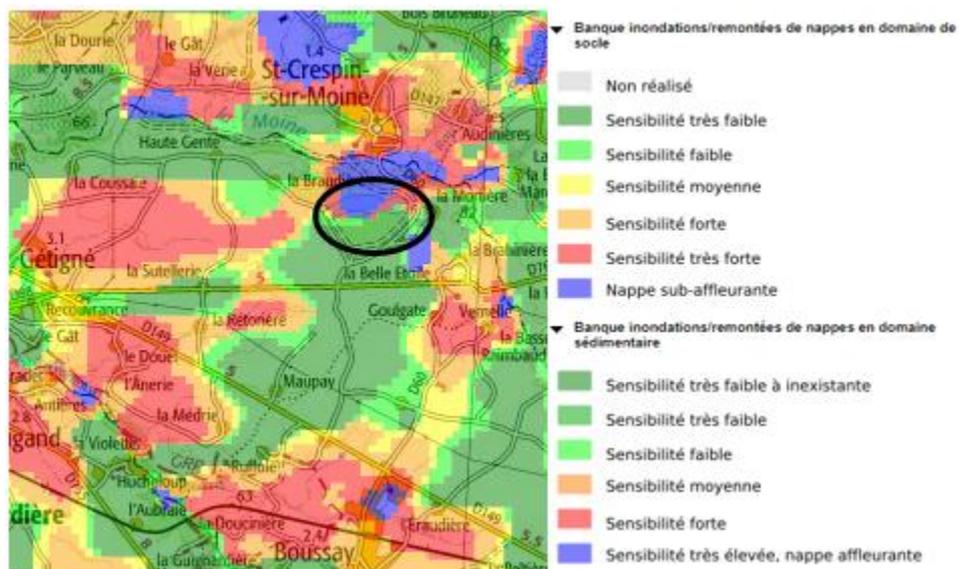


Figure 13 : Carte de remontée des nappes

6. ALEA SISMIQUE

Aucune étude d'aléa sismique spécifique au site de l'Ecarpière n'a été réalisée. Néanmoins la campagne de reconnaissance réalisée par GINGER CEBTP en octobre 2015 a permis de déterminer les coefficients de sols à considérer.

6.1. Détermination du coefficient de sol S

Comme énoncé précédemment dans le chapitre 5.6 le site de l'Ecarpière se situe en zone de sismicité 3 correspondant à un aléa modéré.

Numéro de zone	Sismicité	a_{gr} (m/s ²)
1	très faible	0,4
2	faible	0,7
3	modérée	1,1
4	moyenne	1,6
5	forte	3,0

Tableau 9 : Accélération de référence au rocher selon l'aléa sismique

NB : Ces **accélération**s de calculs résultent d'une évaluation probabiliste du niveau d'accélération susceptible d'être atteint en un lieu donné pour une **période de retour de 475 ans**.

Afin de calculer des accélération au rocher pour des séismes de périodes de retour « T » supérieures à « T_{réf} » = 475 ans il est nécessaire d'appliquer un coefficient d'importance égal à : (cf. ci-après)

$$\gamma = \left(\frac{T}{T_{réf}} \right)^{1/3}$$

Selon le décret n°2010-1255 et la norme NF EN 1998 (EUROCODE 8), les principales données parasismiques déduites des éléments du projet et des reconnaissances effectuées et présentées dans les paragraphes précédents, figurent dans le tableau ci-dessous :

Zone de sismicité	3 (aléa modéré)
Type de sol	D : Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne
Paramètre de sol S	1.60
Accélération du sol a_{gr} (m/s ²)	1.1

Tableau 10 : Données parasismiques du site de l'Ecarpière

Sur la hauteur des couches testées par essai SPT (limite de 10 m), il ressort un nombre de coup $N \leq 15$ ($V_s \leq 180$ m/s), correspondant à un sol de type sable lâche à moyennement dense. De fait, les sols sont assimilés à une classe D.

6.2. Calcul des accélérations de référence pour $T > 475$ ans

Comme montré dans le Tableau 9 ci-dessus, l'accélération de référence du sol à prendre en compte pour des séismes avec des périodes de retour supérieures à 475 est à majorer par le coefficient d'importance γ .

Pour les périodes de retour qui nous intéressent il vient :

	agr (réf) (m/s ²)	$\gamma = \left(\frac{T}{T_{réf}}\right)^{1/3}$	agr (T) (m/s ²)
$T_{réf} = 475$ ans	1.1	1	1.1
$T = 5\ 000$ ans	1.1	2.19	2.41
$T = 30\ 000$ ans	1.1	3.98	4.38

Tableau 11 : Accélérations à considérer selon la période de retour du séisme

6.3. Etude de stabilité de la digue de l'Ecarpière - Tractebel - 2017

Ce chapitre rappelle les résultats de l'étude de stabilité de la digue réalisée en 2017 par TRACTEBEL Engineering.

6.3.1. Calculs statiques

Les calculs de stabilité effectués, pour les différents profils étudiés, montrent qu'aux glissements local et global la stabilité de la digue est assurée avec des coefficients supérieurs aux critères du projet (cf. Réf[2]).

Les résultats de l'analyse de stabilité sont rappelés ci-dessous :

COEFFICIENT DE STABILITE		GLISSEMENT		Profil Critique	
		LOCAL (F>1,3 statique F>1 séisme)	GLOBAL (F>1,5 statique F>1 séisme)	LOCAL	GLOBAL
SITUATION NORMALE D'EXPLOITATION - (Situation normale F>1,5)					
Stabilité du parement aval :	Profil 1	2.33	2.46	2.22	2.62
	Profil 2	2.22	2.62		
SURCHARGES ROUTIERES - (Situation transitoire F>1,3)					
Stabilité du parement aval :	Profil 1	2.33	2.42	2.33	2.42
	Profil 2	2.48	2.58		
REMONTEE DE LA NAPPE - (Situation rare F>1,3)					
Stabilité du parement aval en fonctionnement normal :	Profil 1	-	1,50	-	1.50
	Profil 2	-	1.80		

Figure 14 : Résultats des calculs de stabilité - Statique

6.3.2. Liquéfaction

La vérification de la sensibilité à la liquéfaction des matériaux de la digue est détaillée dans le rapport concernant l'étude de stabilité de la digue de l'Ecarpière réalisé par TRACTEBEL (cf. Réf[2]).

A l'aide des règles PS92, les analyses effectuées sur les échantillons prélevés sur le sondage SC1 permettent d'écarter le risque de liquéfaction car les échantillons de matériaux de digue susceptibles de liquéfaction sont situés bien au-dessus de la nappe de la digue.

De la même manière, en utilisant les prescriptions de l'Eurocode 8, l'analyse des sondages SPT montre que les échantillons potentiellement liquéfiables sont situés bien au-dessus de la nappe. Il faudrait néanmoins disposer d'échantillons beaucoup plus profonds et situés au niveau de la nappe afin d'affiner l'analyse.

Il apparaît que le risque de liquéfaction est à négliger au droit du site.

6.3.3. Calculs sismiques - Période de retour de 5 000 ans

Les analyses de stabilité sous séisme, en fonctionnement hydraulique normal, sont rappelées ci-dessous (cf. Réf[2]).

Les accélérations sismiques appliquées dans l'analyse pseudo-statiques sont les suivantes pour une zone de sismicité 3 et un sol de classe D :

- $agr = 1.93 \text{ m/s}^2$
- $avr = 0.97 \text{ m/s}^2$

SEISME 5 000 ANS - (Situation exceptionnelle F>1,2)				
sous séisme en fonctionnement hydraulique normal	Profil 1	1.29	1.32	1.25
	Profil 2	1.24	1.41	

Figure 15 : Stabilité sous séisme - Période de retour 5 000 ans

Les critères de sécurité sont donc respectés au séisme pour la configuration normale.

6.3.4. Etude de sensibilité au séisme - Période de retour de 30 000 ans

Une étude de sensibilité au séisme a été menée en considérant un séisme de période de retour 30 000 ans.

En utilisant l'approche de l'Eurocode 8 un coefficient d'importance $\gamma=3.98$ (cf. §6.2) a été appliqué sur le spectre d'aléa sismique de référence.

Les accélérations sismiques, horizontales et verticales, appliquées dans l'analyse pseudo-statiques sont les suivantes :

- $agr_h = 0.5 \times S \times agr(T) = 0.5 \times 1.6 \times 4.38 = 3.50 \text{ m/s}^2$
- $avr = 0.5 \times agr_h = 1.75 \text{ m/s}^2$

Les résultats des calculs de stabilité sont donnés ci-dessous :

COEFFICIENT DE STABILITE		GLOBAL
Séisme – Période de retour 30 000 ans		
sous séisme en fonctionnement hydraulique normal	Profil 1	1.03
	Profil 2	1.05

Figure 16 : Résultats des calculs de stabilité - Séisme période de retour 30 000 ans

Ces résultats montrent que dans le cas où la sollicitation sismique considérée est supérieure aux recommandations en vigueur pour les ouvrages du type de l'Ecarpière, le coefficient de stabilité globale reste supérieur à 1, ce qui est jugé satisfaisant.

6.3.5. Conclusion sur l'étude de stabilité

Conditions normales, vidange Rapide et fonctionnement hydraulique dégradé :

La stabilité de la digue est assurée aux glissements locaux et globaux avec des coefficients de sécurité supérieurs aux critères de projet ;

Sollicitation sismique usuelle - Période de retour 5 000 ans :

En considérant les recommandations du CFBR, et tenant compte d'une provision de sécurité majorée (rehausse du coefficient de sécurité global à hauteur de 1.2), il apparaît que la stabilité de la digue est assurée en fonctionnement normal d'exploitation, ainsi que pour des situations exceptionnelles ou accidentelles.

Sollicitation sismique renforcée - Période de retour 30 000 ans :

Lorsque la sollicitation sismique considérée est supérieure aux recommandations en vigueur pour les ouvrages du type de l'Ecarpière, les exigences en termes de réserve restent satisfaites avec un coefficient de sécurité global au glissement supérieur à 1.

7. MESURES TOPOGRAPHIQUES - CONTROLE DES TASSEMENTS

7.1. Evolution des tassements

Les mesures topographiques sont réalisées annuellement par le cabinet de géomètre-expert Brisset Veyrier Mesures et comprennent le suivi altimétrique de 20 repères topographiques (1 à 19 + SIMO-79) répartis uniquement sur la couverture en quinconce selon une maille de l'ordre de 100 m par 100 m.

L'origine des mesures remonte à des dates comprises entre le 07 novembre 1995 et le 12 février 1997 selon les repères. La localisation des repères topographiques est donnée par la figure ci-dessous :

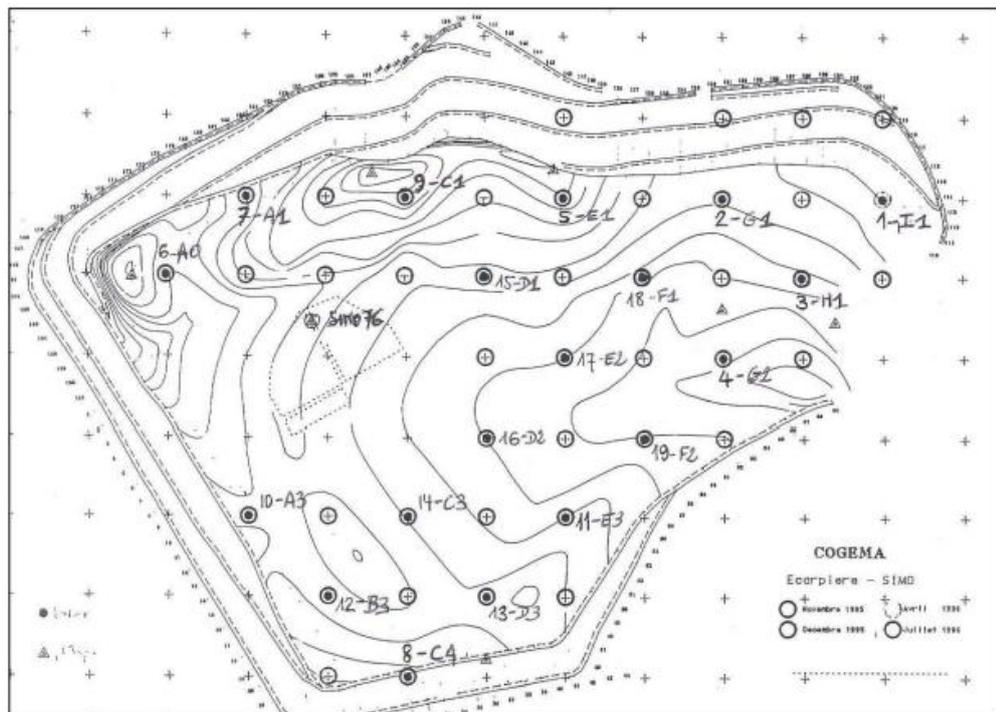


Figure 17 : Position des différents repères topographiques

Les figures ci-après présentent respectivement les déplacements altimétriques des repères situés en partie Nord et en partie Sud de la couverture.

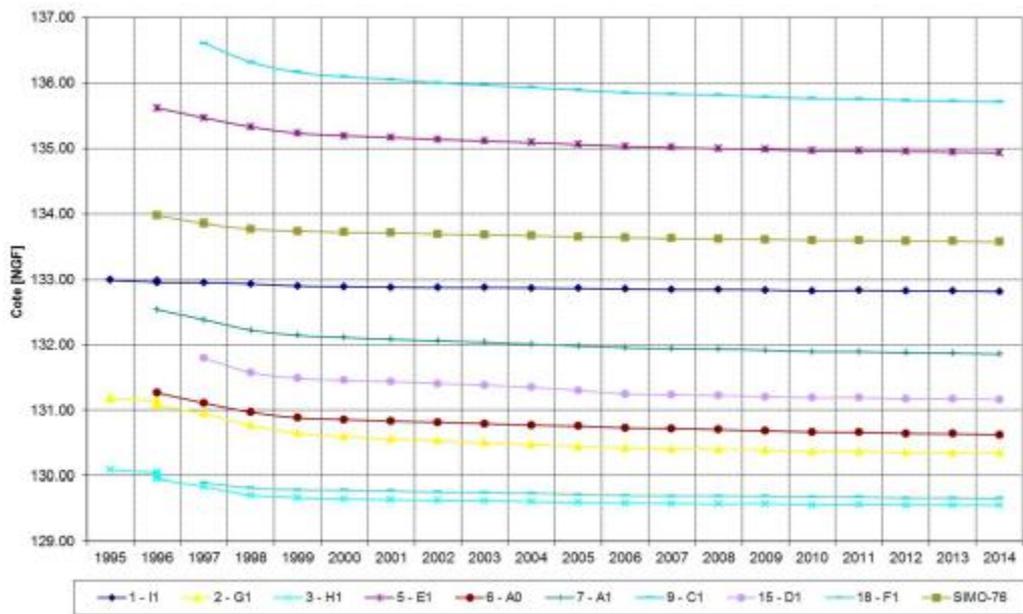


Figure 18 : Déplacements altimétriques des repères situés en partie Nord de la couverture

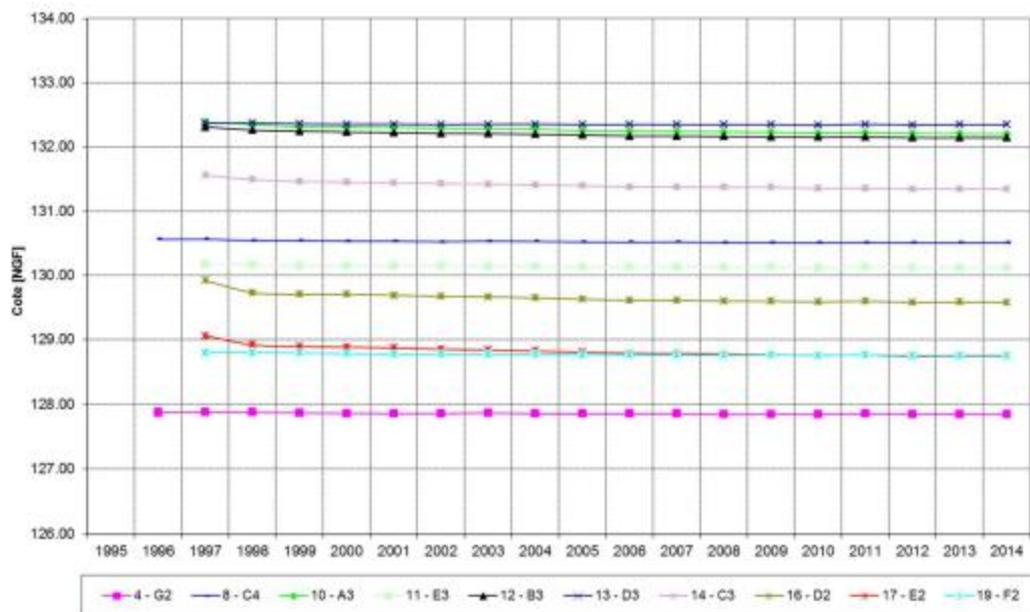


Figure 19 : Déplacements altimétriques des repères situés en partie Sud de la couverture

D'une manière générale, on constate que les repères situés en partie Nord de la couverture ont nettement plus tassé que ceux implantés en partie Sud ce qui s'explique par la hauteur des résidus, qui atteint 50 m au droit de la digue principale Nord et moins de 10 m en extrémité Sud. Depuis environ 2012, les tassements des repères en partie Nord sont stables tandis que ceux en partie Sud le sont depuis environ 2007.

Les tassements maximums mesurés sur les repères implantés en partie Nord sont relativement importants et atteignent les valeurs maximales suivantes :

- Repère 7-A1 (situé à droite du profil clé et en crête de la digue principale) : 60 mm entre le 10 septembre 2009 et le 26 septembre 2014, soit en moyenne 8,6 mm/an ;
- Repère 9-C1 (situé en clé et en crête de la digue principale) : 77 mm entre le 10 septembre 2009 et le 26 septembre 2014, soit en moyenne 11 mm/an ;
- Repère 5- E1 (situé à gauche du profil clé et en crête de la digue principale) : 51 mm entre le 10 septembre 2009 et le 26 septembre 2014, soit en moyenne 7 mm/an ;
- Repère 2-G1 (situé à gauche du profil clé et en crête de la digue principale) : 42 mm entre le 10 septembre 2009 et le 26 septembre 2014, soit en moyenne 6 mm/an ;

7.2. Conclusion

Il est nécessaire de noter que les courbes de tassements s'aplatissent très nettement avec le temps, ce qui signifie qu'au fur et à mesure de la consolidation des résidus, les vitesses de tassements diminuent. Certains repères de la zone Nord, implantés sur des épaisseurs moindres de résidus, ne tassent presque plus. C'est notamment le cas pour le repère 1-11 qui n'a tassé que de 25 mm au cours des 5 dernières années.

Les repères implantés en partie Sud de la couverture sont stables, les tassements dus à la consolidation des résidus étant achevés (ou presque). Les tassements observés au cours des 5 dernières années ne dépassent pas les 25 mm pour l'ensemble de ces repères.