

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 des Bois Noirs

Site : Bois Noirs

DOSSIER GEOTECHNIQUE

P.005961.0002

03	08/03/18	Prise en compte des remarques de M. Crochon	3 ^{ème} version	L.TARDIEUX L. OLIVEIRA	P.MASSAAD	L. BAZIN
02	22/02/18	Prise en compte des remarques de M. Crochon	2 ^{ème} version	L.TARDIEUX L. OLIVEIRA	P.MASSAAD	L. BAZIN
01	22/01/18	Première diffusion	1 ^{ère} émission	L.TARDIEUX L. OLIVEIRA	P.MASSAAD	L. BAZIN

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

SOMMAIRE

1.	CONTEXTE DE L'ETUDE.....	1
2.	DOCUMENTS DE REFERENCE.....	3
3.	FICHE SYNOPTIQUE DE L'OUVRAGE	4
4.	DESCRIPTION DU SITE.....	7
4.1.	HISTORIQUE DU SITE.....	7
4.2.	BILAN DECENNAL DE L'AUSCULTATION.....	7
4.3.	CADRE GEOTECHNIQUE DU SITE ET EXISTENCE D'AVOISINANTS	8
4.3.1.	Contexte géotechnique	8
4.3.2.	Caractéristiques du barrage des Bois Noirs.....	8
4.3.3.	Environnement de l'ouvrage : avoisinants et ouvrages annexes.....	9
5.	SYNTHESE DES INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES.....	12
5.1.	CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL.....	12
5.2.	HYDROGEOLOGIE.....	13
5.2.1.	Contexte hydrogéologique général.....	13
5.2.2.	Contexte hydrogéologique du site.....	13
5.3.	PIEZOMETRIE.....	14
5.3.1.	Dispositifs mis en place avant 2008.....	14
5.3.2.	Equipements complémentaires après 2008	14
5.4.	CAMPAGNES DE RECONNAISSANCES.....	16
5.4.1.	Reconnaitances de 1958.....	16
5.4.2.	Reconnaitances réalisées en 1984 - Corps de digue	17
5.4.3.	Campagne de Boart Longyear en 2009 - Bassin	18
5.4.4.	Campagne d'Althéa-Geo en 2014 - Corps de digue	20
5.4.5.	Conclusion sur les campagnes de reconnaitances	22
5.5.	RISQUES GEOTECHNIQUES MAJEURS	23
6.	ALEA SISMIQUE	25
6.1.	METHODOLOGIE	25
6.2.	CONTEXTE GEODYNAMIQUE	25
6.3.	BASE DE DONNEES SISMOLOGIQUES.....	27
6.4.	RESULTATS.....	29
6.4.1.	Courbes d'aléa.....	30
6.4.2.	Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRs).....	31
6.4.3.	Comparaison avec les spectres réglementaires.....	33
6.4.4.	Désagrégation de l'aléa par couple magnitude/distance	37
6.5.	SYNTHESE DES RESULTATS.....	38
6.6.	ETUDE DE STABILITE DE LA DIGUE DES BOIS-NOIRS – TRACTEBEL – 2016.....	40
6.6.1.	Calculs statiques.....	40
6.6.2.	Liquéfaction.....	41
6.6.3.	Calculs sismiques - Période de retour de 3 000 ans.....	41
6.6.4.	Etude de sensibilité au séisme - Période de retour de 30 000 ans.....	41
6.6.5.	Conclusion sur l'étude de stabilité	42
7.	ANNEXES	43
7.1.	PIEZOMETRIE : DISPOSITION DES PIEZOMETRES	43

7.2.	PIEZOMETRIE : COUPES TRANSVERSALES ET NIVEAUX PIEZOMETRIQUES.....	44
7.3.	PLANS DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION	47

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 des Bois Noirs** a été retenu ; il s'agit du seul ouvrage présentant une charge d'eau permanente à l'amont.

Le présent rapport s'attache à l'établissement du dossier géotechnique de l'aménagement des Bois-Noirs.

NB : Le Maître d'ouvrage a fait procéder à un levé topographique du site des Bois Noirs en novembre 2017 et a demandé à ce que celui soit rattaché au système de coordonnées Lambert 93, nivellement rattaché au NGF (IGN69), seul référentiel de base actuellement en vigueur. Une différence de 17 cm a été observée par rapport au référentiel d'origine utilisé sur le site et ce, jusqu'en 2014. Par exemple, le zéro de l'échelle limnimétrique du grand bassin est maintenant à 761,17 m NGF, contre 761,00 m avant 2014 et le haut de la tulipe est à 763,67 m NGF et non à 763,50 m.

Les cotes utilisées dans le présent rapport sont données dans l'ancien système de cotes, avant 2014.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

Référence	Titre du document
[1] YL14.0008	Evaluation de la stabilité à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères - Ouvrage des Bois Noirs Rapport de diagnostic géotechnique – ALTHEA GEO, Novembre 2014
[2] RLY7.A.026	Réaménagement du stockage de résidus de traitement de minerais d'Uranium du site des Bois Noirs Limouzat – Etude géotechnique de projet – GINGER CEBTP, Mars 2011
[3] GTR/AREV/0216 -1438 REV1	Evaluation de l'aléa sismique spécifique au site de la digue de retenue des Bois Noirs à Saint Priest-la-Prugne (42) – GEOTER SAS, Avril 2016
[4] R060710JSCH	Etude hydrogéologique et géochimique du site minier des Bois-Noirs – MINES PARIS, Juillet 2006
[5] D0207	Réhabilitation de la rivière Besbre sur le site AREVA de Saint Priest-la-Prugne – Etude hydraulique – MAD'EO, juin 2011
[6] P.005961.NT06	Evaluation de la sûreté à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères – Etude de stabilité – TRACTEBEL ENGINEERING, révision 05 du 04/11/2016
[7] 10056RP24	Note de synthèse relative à la réalisation des piézomètres complémentaires – TRACTEBEL ENGINEERING, Août 2010
[8] P.008051_RP01	Etude de dangers du barrage des Bois Noirs - TRACTEBEL ENGINEERING, Juillet 2015
[9] 815-09-0099	Etude de dangers, Réaménagement du site des Bois Noirs Limouzat – Etude de dangers – ARCADIS, Décembre 2013
[10] P008051 RP05	Revue de Sûreté de la digue des Bois Noirs et son addendum « Bilan décennal de l'auscultation »- Tractebel, respectivement novembre 2016 et juin 2017

3. FICHE SYNOPTIQUE DE L'OUVRAGE

SITUATION ADMINISTRATIVE DU BARRAGE

Propriétaire du barrage : AREVA

Exploitant du barrage : AREVA

Services de l'Etat chargés :

- Du contrôle : DREAL Rhône Alpes
- De la police des eaux : DDT 42

Actes administratifs :

- Arrêté préfectoral n° 87-031287 du 3 décembre 1987
- Arrêté préfectoral n° 90-250590 du 25 mai 1990

Maître d'œuvre : CEA

Année de construction : 1959

1^{ère} mise en eau : 1960

DESTINATION DU BARRAGE : Stockage des rejets de l'usine de concentration des minerais d'uranium Forez

SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BARRAGE

Cours d'eau d'alimentation : Besbre

Bassin fluvial : Besbre

Ville la plus proche en aval du barrage : Saint Priest-la-Prugne

- Distance par rapport au barrage : 3km
- Population : 450 habitants

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE ET OUVRAGES ANNEXES

Type de barrage : Barrage en remblai homogène

Nature des matériaux de construction :

- Stériles miniers de type Arènes granitiques

Terrains de fondation : Arène, granite

Hauteur maximale au-dessus du TN : 42m

Longueur maximale en crête : 508m

Largeur du couronnement : 10m

Largeurs :

- En crête : 10.5m
- Maximale au niveau du terrain naturel : 170m

Fruits des talus :

- **Fruit moyen du parement Amont : 2H/1V**
- **Fruit moyen du parement Aval : 2H/1V**

Volume total du corps du barrage : 642 000m³

Altitudes :

- du couronnement : 771.1 à 772.1 m à la construction
- des risbermes du parement amont : 743 et 751 m
- des risbermes du parement aval : 742, 751 et 760 m
- de la Retenue Normale (RN) : 761.785 m (Seuil existant entre la retenue principale et le bassin secondaire en RG)
- des Plus Hautes Eaux (PHE) : 764.54 m

Aire de la retenue : 2.1 hm²

Capacité de la retenue :

- capacité totale à la RN de 761.785 m : 2.1 hm³
- stockage de 1.3 millions de tonnes de résidus

Barrage de catégories A : H = 42m > 20m

Ouvrages d'évacuation des crues :

- déversoir en puits situé en rive gauche, le puits de l'évacuateur de crues est équipé de trois pertuis.
- le puits est prolongé par une galerie puis un chenal à l'air libre
- débit d'évacuation des crues = 35 m³/s

Ouvrage de vidange :

- Seuil en béton vanné avec sas de rétention des eaux, le seuil est équipé d'un muret anti-batillage calé à la côte 761.785 m et trois vannes
- Débit maximal des vidanges : 3 m³/s

Dispositif de drainage :

- un réseau complexe de drains amont/aval sous le barrage, drainant les fuites ainsi que les sources naturelles couvertes par le remblai + 9 déversoirs de jaugeage du débit de ces drains.

Dispositifs de surveillance et d'auscultation

- 5 profils piézométriques

- Contrôle de la stabilité de la digue par 10 repères de nivellement et de déplacement

Dispositif d'alerte :

- Une alarme se déclenche lorsque le niveau d'eau atteint 758.8 m

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DU CORPS DE DIGUE

	Yd (kN/m ³)	Yh (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	φ' (°)	Sr (%)	W (%)	GTR
Remblais	20	21.9	0	36	84.6	8.2	B4/ B5
Alluvions sablo- argileux	17.3	20.5	0	36	95	17	A1

- Toutes les caractéristiques des matériaux sont disponibles au paragraphe 5.4.4.1.

4. DESCRIPTION DU SITE

4.1. Historique du site

Le barrage des Bois Noirs se trouve dans le secteur de la mine d'uranium de Saint Priest la Prugne. La construction s'est échelonnée de novembre 1958 à août 1962 avec une première mise en eau en 1960. Le site a été exploité pendant 25 ans, par le CEA puis par la COGEMA, et fermé en 1980. La digue a été construite avec les terres et les roches stériles de la mine à ciel ouvert en plusieurs étapes.

Les anciennes activités minières avaient nécessité la construction d'un canal de dérivation de « la Besbre », conçu pour accepter un débit de crue de 10 m³/s, dont l'ancien lit se situe à l'aplomb de l'ouvrage.

4.2. Bilan décennal de l'auscultation

La conclusion du bilan décennal d'auscultation ([10]) est la suivante :

« Les tassements semblent stabilisés depuis 2006. Les déplacements planimétriques réversibles observés depuis 2012 sont a priori liés à des mouvements locaux du revêtement du couronnement sous l'effet des températures.

Les mesures piézométriques témoignent dans l'ensemble du bon rabattement de la charge entre l'amont et l'aval.

Les piézomètres P1 et P12, dont les niveaux sont peu rabattus, sont à surveiller dans le cadre de la surveillance mise en œuvre par AREVA.

Les piézomètres P1, P8 et P20 sont à inspecter par caméra. Cette inspection aura lieu en 2018.

On constate une légère tendance à la diminution des débits des drains et des zones humides à cote de plan d'eau identique, traduisant un colmatage progressif des chemins de percolation dans l'ouvrage.

Il est recommandé de surveiller les dépôts de fines en aménageant des bacs de tranquillisation et des goulottes afin d'évacuer les eaux des zones humides hors du parement aval.

En conclusion, l'analyse des mesures d'auscultation attestent du comportement satisfaisant du barrage dans son ensemble. »

4.3. Cadre géotechnique du site et existence d'avoisinants

4.3.1. Contexte géotechnique

D'après la carte géologique (§5.1), le site est dominé au Nord par des granites à gros grains altérés et par des dépôts anthropiques généralement liés à des travaux miniers au sud.

Les conditions de site en aval de la digue peuvent être considérées « au rocher » avec des formations métamorphiques constituées de granite ou d'orthogneiss.

Le bassin versant s'étend dans une direction sud-nord par rapport au barrage. Sa superficie est de 10,9 km². Le bassin versant présente un relief prononcé et une couverture très majoritairement forestière.

On note la présence d'une mine souterraine ainsi que d'une mine à ciel ouvert localisées au sud du site. Présentement la mine souterraine a été fermée et la mine à ciel ouvert a été partiellement comblée.

Le barrage des Bois Noirs, qui occupe une large partie du site, est fondé directement sur un substratum rocheux (arène, gne et granite). Il est constitué principalement de terre végétale et de roches stériles de la mine à ciel ouvert. La pente avale présente une inclinaison de 2H/1V soit 27° et possède plusieurs risbermes.

Il s'agit du seul ouvrage présentant une charge d'eau permanente à l'amont. En effet le barrage retient une lame d'eau épaisse d'au moins 2m, qui représente un volume d'environ 690 000m³ d'eau noyant 1.3 millions de tonnes de résidus miniers.

Afin de garantir la stabilité et la pérennité du bassin et du barrage, la Besbre a fait l'objet d'une retenue dans la partie haute du site, située à l'ouest, pour être ensuite canalisée sur la longueur du site.

4.3.2. Caractéristiques du barrage des Bois Noirs

Comme mentionné ci-dessus il s'agit d'un barrage de hauteur maximale de 42m et d'une longueur en crête de 508m. La largeur maximale en pied de barrage est de l'ordre de 180m contre 10.5m en crête. L'ouvrage compte trois risbermes et une pente moyenne de 2H/1V soit environ 27°. Le barrage, dont l'altitude en crête est de 772 m crée une retenue artificielle, qui sert de stockage aux résidus miniers, qui s'étend sur environ 22 ha à une altitude de 761.8 m.

Le barrage des Bois Noirs est classé en catégorie A conformément au décret 2007-1735 du 11 décembre 2007.

Le barrage en terre compactée des Bois Noirs (digue poids) est fondé sur un substratum rocheux. C'est un barrage du type homogène, constitué d'une même terre répartie à travers toute la section du barrage, tout en présentant toutefois un zoning général. Ainsi les matériaux présentant une granulométrie plus fine (0-10 mm) ont été disposés à l'amont et les matériaux les plus grossiers (10-300mm) à l'aval. Les éléments les plus perméables ont quant à eux été disposés aux parements (enrochements).

La réalisation technique a consisté en un régalage en couches de 0.3m, compactées par un compacteur à pneu de 40t pour atteindre une épaisseur de 0.2m après 6 à 8 passes.

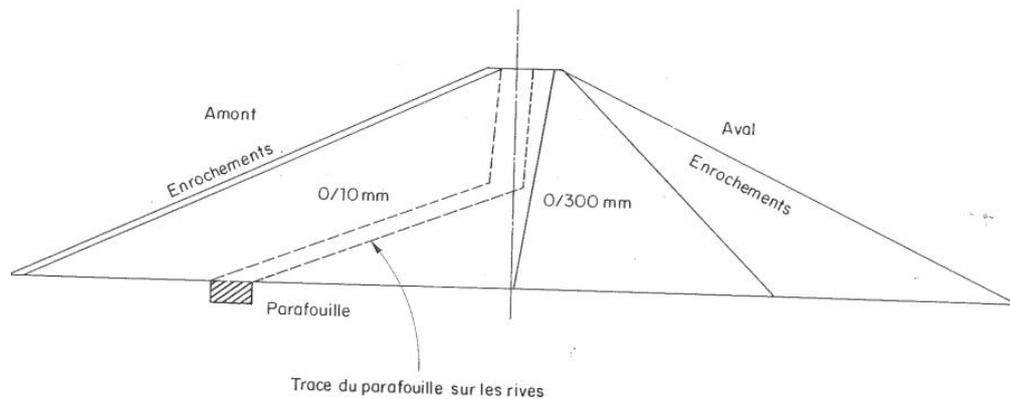


Figure 1 : Barrage des Bois Noirs - coupe type

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

4.3.3.1. LA BESBRE ET SES AMENAGEMENTS PARTICULIERS

Durant la construction du barrage, divers ouvrages annexes ont été intégrés afin de permettre le passage de la Besbre et ainsi éviter la montée en charge du barrage.

Ouvrages annexes :

- Evacuateur de crue : Prévu pour accepter une crue de 50,7 m³/s pour une cote de retenue à 765,18 m. Il se compose d'une tulipe, d'un puits d'entonnement (10 m), d'une galerie (118 m) et d'un canal de restitution (148 m)

- Canal de dérivation de la Besbre, conçu pour accepter un débit de crue de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ d'une longueur de 1083 m en rive droite, longeant la retenue.
- Drainage : un réseau complexe de drains amont/aval disposé sous le barrage et drainant les fuites ainsi que les sources naturelles couvertes par le remblai. 9 déversoirs en pied aval de barrage permettent de jauger les débits de ces drains

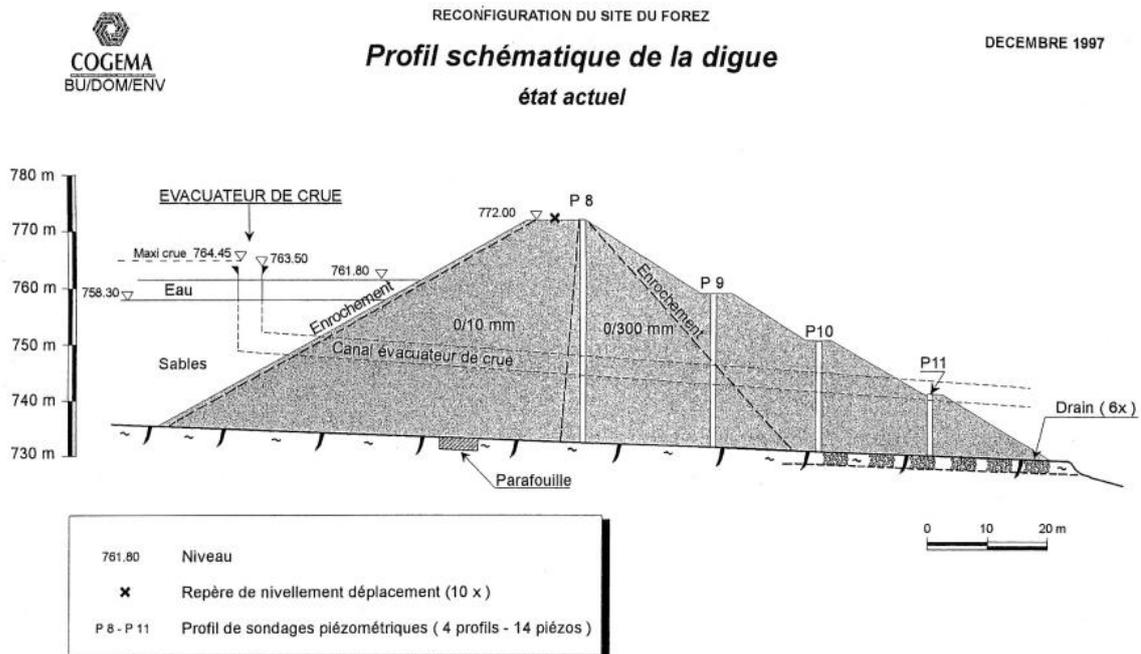


Figure 2 : Plan descriptif de la digue

4.3.3.2. LA MINE SOUTERRAINE

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

4.3.3.3. LA RETENUE DE L'ETANG DES PEUX

Située en amont de la digue, cette retenue sert de piège à sédiments et comporte une hauteur de 2 à 3 mètres entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel.

Conformément à l'article R.214-112 du Code de l'Environnement cette retenue ne peut être considérée comme un barrage car sa hauteur est inférieure à 5m.

4.3.3.4. LA MINE A CIEL OUVERT

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

4.3.3.5. OUVRAGE DE RESTITUTION DE LA BESBRE

Situé en aval du barrage, l'ouvrage consiste en une restitution du cours d'eau dans son lit naturel (« saut à ski » de 247 m de longueur).

4.3.3.6. LA STATION DE TRAITEMENT DES EAUX

Située au sud du barrage, l'objectif de la station est, depuis son installation et sa mise en service en 1981, de pouvoir traiter les eaux provenant des drains en pied de digue et du débordement de la mine. Elle présente une capacité nominale de 300 m³/h.

5. SYNTHÈSE DES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

5.1. Contexte géologique général

Le site des Bois Noirs est situé dans la partie des Monts du Forez ou Montagne du Bourbonnais. Les formations géologiques présentes localement sont des formations cristallines et métamorphiques ainsi que leur produit d'altération :

Le granite des Bois-Noirs : granite riche en quartz à gros grains à tendance alcaline. Au niveau du site cette formation présente un faciès à grains fins.

Les micro-granites liés aux granites des Bois-Noirs auxquels ils sont directement contemporains ou postérieurs.

Des remblais de terre végétale ainsi que des stériles miniers sur plusieurs mètres.

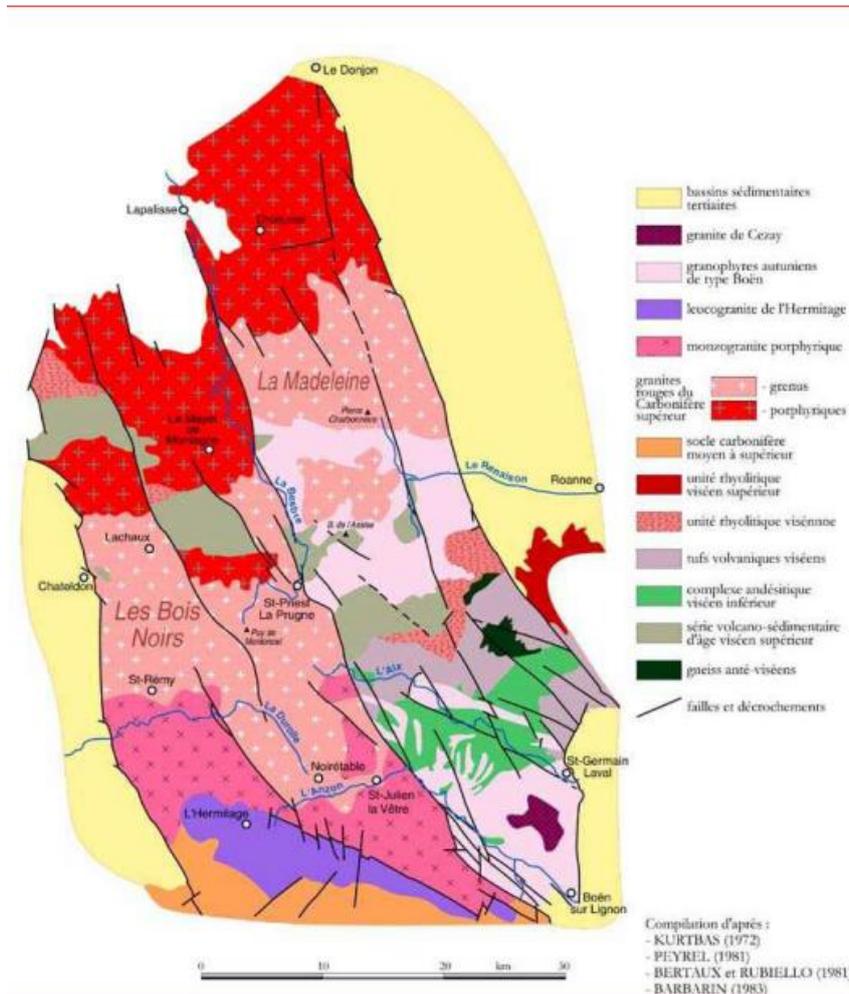


Figure 3 : Géologie du site des Bois-Noirs (Réf.[4])

5.2. Hydrogéologie

5.2.1. Contexte hydrogéologique général

Le site des Bois Noirs Limouzat étant localisé dans l'entité hydrogéologique des Monts de la Madeleine, essentiellement granitique, le développement d'un réseau souterrain hydrogéologique ne se prête pas au contexte géologique local, il n'y a donc pas de nappes aquifères importantes. La nature granitique et métamorphique du site favorise les ruissellements de surface. En conséquence la circulation des eaux souterraines ne peut se faire qu'au niveau des zones d'altération ou via les fractures affectant le granite. Ces zones constituent un milieu relativement poreux présentant une perméabilité moyenne, estimée à environ 10^{-5} m/s. (Réf.[9])

5.2.2. Contexte hydrogéologique du site

Plusieurs essais hydrauliques ont été effectués en 1981 sur trois sondages profonds de 80 à 100 m. Ces sondages ont montré que les perméabilités du granite et des fissures diminuaient rapidement avec la profondeur pour atteindre des valeurs allant de 10^{-7} à 10^{-9} m/s, ce qui est caractéristique de formations très peu perméables.

Ainsi, localement, deux types d'aquifères peuvent exister :

- En surface au niveau de la zone altérée les eaux vont s'infiltrer pour former des nappes isolées et de faibles extensions
- Des circulations d'eaux profondes liées aux fissures et réseaux de fractures avec une perméabilité du granite sain de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-9} m/s.

Au niveau du bassin, des mesures de perméabilité à gradient variable ont été effectuées à partir des 3 sondages carottés, réalisés par l'entreprise Boart Longyear en 2009, sur les formations suivantes :

- Argiles sableuses sur-consolidées : $k = 9.10^{-9}$ m/s
- Argiles sableuses sous-consolidées $k = 1.5.10^{-8}$ m/s (Réf.[2])

Les mesures montrent que ces formations sont très peu perméables.

5.3. Piézométrie

5.3.1. Dispositifs mis en place avant 2008

Jusqu'à 2008, le barrage était équipé de 14 piézomètres, numérotés de P0 à P13 et disposés sur 4 profils amont-aval sur les différentes risbermes.

- Profil 2 : P0 à P4 : situé dans l'axe de la digue, comportant 5 points de mesure, il a été mis en place au cours de la construction et exploité depuis la mise en eau
- Profil 1 : P5 à P7 : situé en rive droite il comporte 3 points de mesure
- Profil 3 : P8 à P11 : situé au pied de la rive gauche, il comporte 2 points de mesure
- Profil 4 : P12 à P13 : situé en haut de la rive gauche, comporte 2 points de mesure

Le profil 2 a été installé lors de la mise en eau, les autres profils ont été mis en place à partir de 1984 et sont exploités depuis cette date. Tous les forages atteignent le substratum rocheux de fondation du barrage.

D'autre part, 7 cellules piézométriques équipent le barrage depuis 1992. Ces cellules sont disposées selon des profils amont/aval situé entre les profils 1 et 2. Les cellules C0 à C4 mesurent les pressions d'eau dans le remblai, les cellules C2bis et C4bis ont quant à elles été placées dans la fondation. Depuis 2006 plus aucune cellule ne fonctionne.

Profil	Position	Dénomination
Profil 1	rive droite	P5,P6,P7
Profil 2	rive droite	P1,P2,P3,P4
Profil 2bis (1)	centre	C0,C1,C2,C2bis,C3,C4,C4bis
Profil 3	rive gauche	P8,P9,P10,P11
Profil 4	rive gauche	P12,P13

Figure 4 : Piézomètres équipant la digue avant 2008 (Réf.[7])

5.3.2. Equipements complémentaires après 2008

Fin 2007, 15 nouveaux appareils sont venus compléter le dispositif : P5bis, P7bis, et P14 à P26. Ainsi de nouveaux profils ont été créés et d'autres anciens profils complétés :

- Nouveau profil P0, composé des piézomètres P15, P16 et P26
- Nouveau profil P2bis, composé des piézomètres P23 à P25
- Nouveau profil P3bis, composé des piézomètres P18 à P19
- Nouveau profil P5, composé des piézomètres P20 à P21

- Intégration des piézomètres P5bis, P7bis et P17 dans le profil initialement composé des piézomètres P5 à P7 (ancien profil 1)
- Intégration des piézomètres P22 et P14 dans l'ancien profil 4 initialement composé de P12 et P13.

La répartition des piézomètres et des cellules est donnée dans le tableau ci-après :

	RD									RG
Cote des risbermes	Numéro des profils									
	Prof.0	Prof.1	Prof.2	Prof.2bis	Cellules	Prof.3	Prof.3bis	Prof.4	Prof.5	
771,70 (crête)	/	P5, P5b	P0,P1	P23	C0,C1	P8	P18	P12, P22	P20	
760,20	P15, P26	P6	P2	P24	C2,C2bis	P9	P19	P13	P21	
751,40	P16	P7, P7b	P3bis	P25	C3	P10	/	P14	/	
742,40	/	/	P4	/	C4,C4bis	P11	/	/	/	

Figure 5 : Répartition des piézomètres équipant le barrage (Réf.[7])

NB : La répartition géographique des piézomètres ainsi que les niveaux piézométriques par profil sont donnés en Annexe.

5.4. Campagnes de reconnaissances

5.4.1. Reconnaissances de 1958

Avant la réalisation des travaux de construction du barrage, 4 puits de reconnaissance ainsi que 8 sondages ont été réalisés sous l'emprise du barrage.

L'étude des reconnaissances effectuées montrent que :

- En fond de vallée, dans la partie la plus haute du barrage, le rocher granitique sain est trouvé à faible profondeur (3-4 m). Le substratum est surmonté de matériaux alluvionnaires : d'une couche de sables et galets et d'une couche superficielle d'argile et de tourbe.
- Au niveau des rives, l'épaisseur des couches altérées (gore) est beaucoup plus importante et peut localement dépasser les 10 m.

Les essais de laboratoire réalisés à partir des puits de reconnaissance mettent en évidence deux types de matériaux meubles :

- Des vases sableuses/graveleuses avec des teneurs en eau de l'ordre de 30% avec un poids volumique sec de 12 kN/m^3
- Des sables avec des teneurs en eau de l'ordre de 10-15% et des poids volumiques sec de 15 kN/m^3

Les essais de cisaillement ont été réalisés au nombre de 4 et permettent de montrer que les matériaux constitutifs du barrage ont les caractéristiques moyennes retenues par les auteurs du projet sont les suivantes :

- Cohésion nulle : $c' = 0$ (même si des valeurs non nulles ont été mesurées)
- Angle de frottement : $\varphi' = 37^\circ$

5.4.2. Reconnaissances réalisées en 1984 – Corps de digue

Sur les échantillons prélevés depuis les piézomètres installés en 1984 (cf. §5.3.1) plusieurs essais laboratoire ont été effectués sur les matériaux du corps du barrage.

Les essais suivants ont été réalisés :

- 17 mesures du poids volumique sec
- 6 mesures des limites d'Atterberg (IP, LP et LL)
- 4 essais de perméabilité
- 5 essais de cisaillement direct
- Essais d'identification (granulométrie)

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats des essais effectués sur les échantillons prélevés :

	Yd	C'	Φ'	k	IP	LP	LL
	kN/m ³	kPa	-	m/s	-	-	-
Nombre d'essais	17	5	5	4	6	6	6
Minimum	18.15	10	30	1.4 * 10 ⁻⁹	-	-	-
Maximum	21.09	80	42	1.2 * 10 ⁻⁶	-	-	-
Moyenne	-	-	-	-	15	20.5	35.5

Tableau 1 : Synthèse des essais réalisés en 1984

Les résultats mettent en évidence des matériaux relativement denses et peu perméables avec une seule mesure de perméabilité de l'ordre de 10⁻⁶, toutes les autres étant de l'ordre de 10⁻⁸ ou 10⁻⁹.

De la même manière, les matériaux présents semblent être très légèrement plastiques à peu plastiques avec des indices de plasticité d'environ 15.

Les résultats d'essais mécaniques sont très hétérogènes avec une cohésion moyenne de l'ordre de 10 kPa et un angle de frottement proche de 38°. Pour l'essai amenant à une mesure de 80 kPa, il est possible que la vitesse de cisaillement ait été trop élevée pour fournir les caractéristiques effectives.

En l'absence de rapport d'archive détaillé il est difficile d'effectuer des analyses statistiques sur ces données.

5.4.3. Campagne de Boart Longyear en 2009 - Bassin

En 2009, trois sondages carottés S1 à S3 alignés sur un axe Est-ouest traversant le bassin ont été réalisés par Boart Longyear à la demande d'AREVA pour identifier les **caractéristiques des matériaux stockés dans la retenue** dans le cadre du projet de réaménagement du site.

Les reconnaissances effectuées sont montrées sur la figure ci-après :

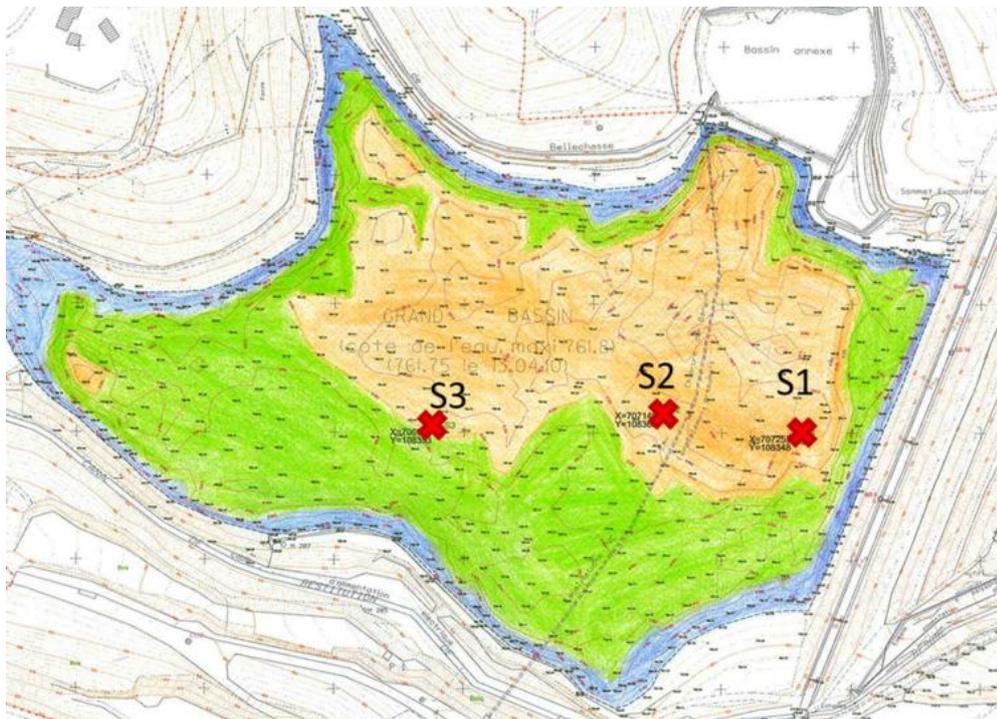


Figure 6 : Reconnaissances effectuées par Boart Longyear en 2009

Au niveau du bassin, les trois sondages carottés, mettent en évidence : (Réf.[2])

- Une lame d'eau de 3 m à 5 m d'épaisseur
- Des sables plus ou moins limoneux et argileux de 1.5 à 2.8 m d'épaisseur
- Des argiles sableuses ou marneuses intercalés de bancs de sables et sables d'argileux d'épaisseur variable mais importante environ 10 m.
- Plus bas on rencontre des Sables et de l'Orthogneiss, produits d'altération du substratum rocheux.

Des essais en laboratoire ont ensuite été réalisés à partir de ces sondages dans le cadre de la mission géotechnique de type G2 réalisée par Ginger en 2011(Réf.[2]). Sur l'ensemble des échantillons, les essais suivants ont été réalisés :

- 10 essais d'identification (granulométrie, valeur au bleu, classification GTR)
- 6 essais de cisaillement à la boîte
- 6 essais Proctor Normal
- 6 essais œdométriques
- 6 mesures du coefficient de perméabilité à gradient variable

L'analyse statistique issue de l'interprétation des essais laboratoire ainsi que l'analyse propre et interne de GINGER a donné lieu à la synthétisation suivante :

sol	identification		cisaillement			consolidation			k m/s	e ₀	
	Classe GTR	γ_{sat} kN/m ³	γ kN/m ³	c' kPa	Φ' °	σ'_p kPa	Cc	Cs			Cv m ² /s
0bis		-	22	0	30		-	-			
1	B1 – B5	20	-	0	30	-	0.2123	0.0260		-	1.200
2a	A1	19.2	-	11	16	-	0.2363	0.0207	1.155.10 ⁻⁸	9.10 ⁻⁹	1.045
2b	A1	19.2	-	14	22	-	0.2123	0.0260	2.769.10 ⁻⁸	1.5.10 ⁻⁸	0.891

Figure 7 : Synthèse et interprétation des reconnaissances faites par Boart Longyear

Avec pour les différents sols :

- 0bis : remblais de stériles miniers
- 1 : sables argileux sous l'eau
- 2a : argiles sableuses sur consolidées
- 2b : argiles sableuses sous consolidées

5.4.4. Campagne d'Althéa-Geo en 2014 - Corps de digue

Une campagne de reconnaissances a été effectuée par ALTHEA-GEO (Réf.[1]) en novembre 2014 afin d'améliorer la connaissance de la digue pour la réalisation d'une nouvelle étude de stabilité. Les reconnaissances réalisées au niveau de la digue comprennent :

- 2 sondages pressiométriques SP1 et SP2
- 1 sondage carotté SC1

La disposition des sondages est montrée sur la Figure 8.

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

- Des remblais constitutifs du corps du barrage composés de sables grossiers graveleux, de graves, d'argile sablo-graveleuse étant reconnus jusqu'à 29.3 m de profondeur au niveau de SC1, 22.8 m de profondeur au droit de SP1, 40.8 m de profondeur au droit de SP2
- Des alluvions sablo-argileuses et sablo graveleuses, qui ont été reconnues a priori au droit du SC1 jusqu'à 30.5 m de profondeur
- Le substratum rocheux granitique qui a été reconnu jusqu'à la base des sondages



Figure 8 : Localisation des sondages au niveau de la digue (Réf.[1])

Sur les échantillons qui ont été prélevés, les essais suivants ont été réalisés :

Essais in situ :

Type d'essai mécanique in situ	N° de sondage	Nombre d'essais
Essai pressiométrique - norme NF P 94-110-1	SP1	16
	SP2	30

Essais en laboratoire :

Identification des sols	Sondage	Nombre	Norme
Teneur en eau pondérale W	SC1	5	NF P94-050
Masse volumique des sols fins		5	NF P94-053
Masse volumique des particules solides		5	NF P 94-054
Analyse granulométrique par tamisage		4	NF P94-056
Analyse granulométrique par sédimentation		4	NF P 94-057
Limite d'Atterberg WI et Wp déterminées à la coupelle et au rouleau		1	NF P94-051
Valeur au bleu du sol (VBS)		4	NF P94-068
Classification des sols (GTR)	4	NF P11-300	
Caractéristiques mécaniques	Sondage	Nombre	Norme
Essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU + u)	SC1	2	NF P94-074

5.4.4.1. ANALYSE DES ESSAIS LABORATOIRE

Les essais d'identification réalisés à partir d'échantillons issus du sondage SC1 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Sondage	Profondeur de l'échantillon (m/TN)	Nature de l'échantillon prélevé	Résultats											
			w (%)	ρ_h (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	Sr (%)	e	< 80 μ m (%)	< 2 μ m (%)	VBS	w _L (%)	I _p	Classe GTR
SC1	5.5 à 7.0	Sable grossier graveleux	4.8	2.42	2.31	2.60	100.1	0.13	4.7	1.2	0.3	-	-	B4
	10.6 à 11.3	Sable limono-graveleux	6.8	2.35	2.20	2.59	100.0	0.18	-	-	-	-	-	-
	13.5 à 14.2	Grave sableuse	7.8	1.88	1.75	2.63	40.4	0.51	15.3	< 3.7	0.6	-	-	B5
	28.0 à 28.7	Grave sableuse	13.3	2.11	1.82	2.59	98.4	0.42	14.1	1.3	0.7	-	-	B5
	29.3 à 30.2	Sable argileux lgt graveleux	17.0	2.05	1.73	2.59	95.0	0.50	42.7	9.0	0.9	32.3	5.8	A1

Figure 9 : Résultats des essais d'identification

Les résultats montrent des matériaux relativement denses et peu plastiques avec des matériaux constitués majoritairement de sables limono-argileux et de graves sableuses.

Les résultats des essais mécaniques confirment, seulement pour la cohésion, les hypothèses qui furent prises en 1958 (§5.4.1) avec des matériaux de corps de barrage très peu cohésifs $c' = 0$ kPa.

Sondage	Profondeur de l'échantillon (m/TN)	Nature de l'échantillon prélevé	Caractéristiques mécaniques mesurées				
			C' (kPa)	ϕ' (°)	C _{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)	λ_{cu}
SC1	10.6 à 11.3	Sable limono-graveleux	0	20	0	19	0.60
	29.3 à 30.2	Sable argileux lgt graveleux	0	28	0	25	0.73

Figure 10 : Résultats des essais de laboratoire

NB : Dans l'étude de stabilité de la digue des Bois-Noirs réalisée par TRACTEBEL en 2015, l'attention est attirée sur le fait que l'analyse des PV d'essais fait apparaître des défauts de consolidation des échantillons (cf. Réf.[6]). En effet, les valeurs de densité des échantillons reconstitués sont inférieures aux valeurs de densité in-situ. De la même manière, ces essais n'ont pas été réalisés sur l'ensemble du spectre granulométrique.

Ceci amène donc à une sous-estimation de la valeur de l'angle de frottement. Avec l'utilisation de corrélations classiques avec la pression limite, **l'angle de frottement peut être estimé en moyenne aux alentours de 36-37°**, ce qui est cohérent avec les reconnaissances menées en 1984 (§5.4.2) qui mettent en évidence un angle de frottement moyen de 38°.

5.4.4.2. ANALYSE DES ESSAIS IN SITU

Le tableau suivant résume pour les différents faciès les résultats des essais in situ :

Horizon	Base de l'horizon (m/TN actuel)	Nombre d'essais	Pression Limite nette p_l^* (MPa)				Module Pressiométrique E_M (MPa)		
			Min	Max	Moy_{ar}	σ	Min	Max	Moy_{ha}
H1 - Remblais	22.8 / 40.8	42	0.23	5.06	2.24	1.01	1.5	131.6	15.6
H2 – Alluvions *	30.5 *	0	-	-	-	-	-	-	-
H3 – Substratum granitique	> 44.9	4	4.79	4.98	4.86	0.08	191.3	500.0	264.5

Moy_{ar} : Moyenne arithmétique Moy_{ha} : Moyenne harmonique σ : Ecart type

Figure 11 : Résultats des essais in situ

Les résultats des essais pressiométriques montrent des dispersions au niveau du module et de la pression limite nette. Les valeurs les plus faibles sont localisées en crête de digue, les caractéristiques s'améliorant nettement avec la profondeur.

La formation des remblais présente des caractéristiques assez dégradées avec un module et une pression limite faibles.

Le substratum présente quant à lui des caractéristiques d'une roche relativement saine avec des bonnes caractéristiques mécaniques et des modules élevés.

5.4.5. Conclusion sur les campagnes de reconnaissances

Les différentes campagnes de reconnaissances menées viennent confirmer les hypothèses qui ont été prises et les données implémentées pour les calculs de stabilité de la digue.

L'analyse des essais réalisés sur les matériaux du corps de digue amènent à considérer des caractéristiques suivantes :

- Des matériaux très peu cohésifs : $c' = 0$ kPa
- Un angle de frottement interne $\phi' = 36-37^\circ$

5.5. 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 18/01/2018).

Vis-à-vis de la prévention du risque sismique, la zone d'implantation de l'ouvrage se situe en zone 2, soit un aléa faible. Le risque de liquéfaction du barrage a été vérifié (cf. §6.6.2).

Aucune cavité souterraine n'est référencée sur la commune de Saint Priest la Prugne et la commune n'est pas soumise à un Plan de Prévention de Risques Cavités souterraines. Cependant, 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 2006 en bordure de la retenue à environ 35 m à l'amont du barrage en rive droite, dû à l'effondrement d'un travers-banc à 15 m de profondeur. Le fontis de 3m m de diamètre et 1,5 m de profondeur a été comblé par du tout venant en 2006.

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

Vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles, le site se trouve en zone d'aléa à priori nul selon la carte d'aléa. La commune de Saint Priest-la-Prugne n'est pas soumise à un Plan de Prévention de Risques Retrait-gonflements des sols argileux.

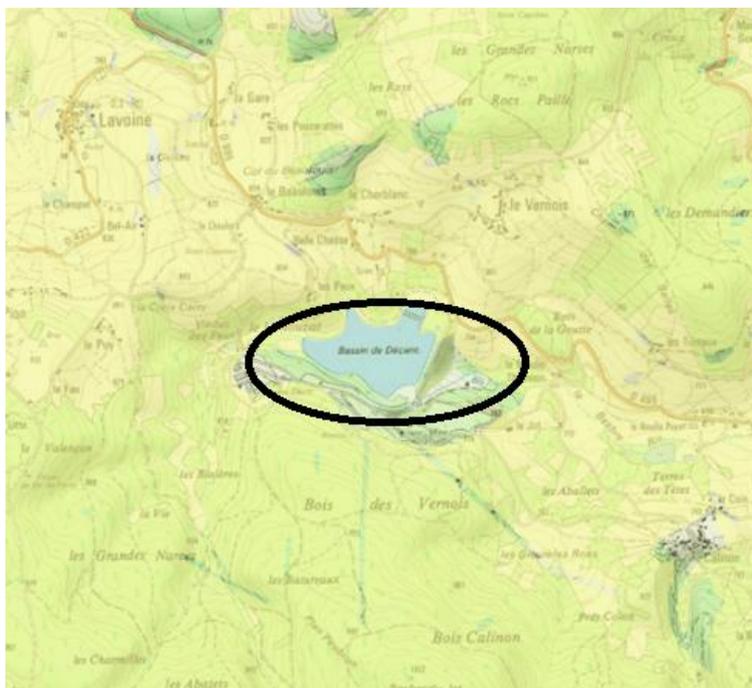


Figure 12 : Carte d'aléa retrait/gonflement des argiles (Réf.[1])

Trois arrêtés de catastrophes naturelles sont recensés pour la commune de Saint Priest la Prugne :

Inondations et coulées de boue : 1

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
42PREF19830247	17/05/1983	17/05/1983	21/06/1983	24/06/1983

Poids de la neige - chutes de neige : 1

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
42PREF19820596	26/11/1982	28/11/1982	15/12/1982	22/12/1982

Tempête : 1

Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
42PREF19820267	06/11/1982	10/11/1982	18/11/1982	19/11/1982

Figure 13 : Recensement des catastrophes naturelles pour la commune de Saint Priest la Prugne

Vis-à-vis du phénomène de remontées des nappes, le site se trouve en zone de sensibilité faible selon la carte consultable sur le site www.inondationsnappes.fr (consultation le 18/01/2018).

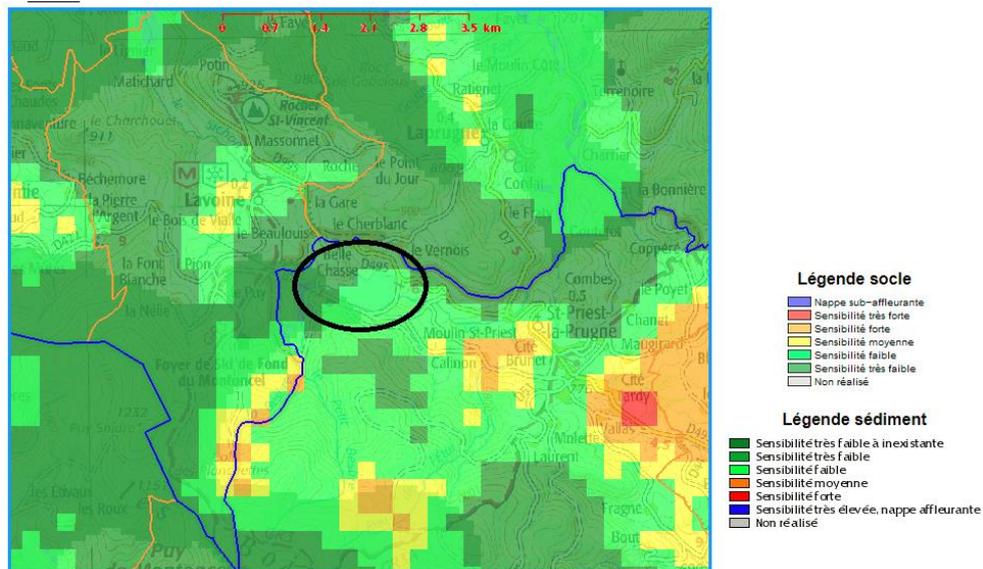


Figure 14 : Carte de remontée des nappes

6. ALEA SISMIQUE

Une étude d'aléa sismique spécifique au site de la Digue des Bois-Noirs a été réalisée par GEOTER en mars/avril 2016 (Réf.[3]). Les principaux points de cette étude sont repris dans ce chapitre.

6.1. Méthodologie

La méthodologie utilisée par GEOTER consiste à :

1. **Caractériser les sources sismogènes** : proposition de modèles sismotectoniques pour la région, évaluation des failles et leur potentiel dans la région et estimation des magnitudes maximales et des profondeurs sismogéniques ;
2. **Compiler un catalogue de sismicité** : compilation des catalogues existants (Sisfrance et LDG) et traitement du catalogue obtenu afin de supprimer les doublons, de retirer les événements précurseurs ainsi que les répliques et de ne conserver que les événements principaux ;
3. **Evaluer les paramètres d'activité sismique** : caractérisation des paramètres de l'activité sismique des zones source (dont M_{min} la magnitude minimum et M_{max} la magnitude maximum) ;
4. **Sélectionner des modèles de prédiction du mouvement du sol** : sélection dans la littérature des modèles les plus adaptés au contexte étudié ;
5. **Construire l'arbre logique** : prise en compte de plusieurs modèles sismotectoniques ainsi que plusieurs modèles de prédiction du mouvement du sol (GMPEs) avec des distributions de magnitude maximales, de profondeur des sources et des paramètres d'activité sismique spécifiques pour chaque source. L'arbre logique permet donc de combiner les différentes hypothèses et de calculer toutes les combinaisons possibles et d'évaluer leur probabilité et pertinence ;
6. **Calculer et produire des résultats** : définition des courbes d'aléa pour différentes périodes spectrales et calcul du PGA et des spectres de réponse élastiques uniformes associés à différentes périodes de retour.

La méthodologie détaillée est présentée dans le document en référence [3].

6.2. Contexte géodynamique

Le barrage des Bois Noirs est situé en montagne Bourbonnaise, dans la partie nord-est du Massif Central. A l'est, le bassin de Valence (ou du Bas-Dauphiné) sépare le Massif Central des Préalpes et de la Chaîne des Alpes. La région de Limagne se trouve à l'ouest (Figure 16).

De grandes failles NNW-SSE recoupant le granite des Bois noirs passent à proximité du site. Il s'agit de la faille du Forez, à environ 2 km à l'est du site et de la faille du Sichon, à environ 6 km à l'ouest du site. Une petite faille de 8 km de long, d'orientation NW-SE et venant se brancher sur la faille du Forez, est située à environ 600 m du site (Figure 17).

Il n'y a pas d'évidence d'activité sur ces accidents sur une période récente et l'activité sismique enregistrée autour de ces structures est quasi-inexistante. Aucune faille active connue n'est donc répertoriée dans un rayon de 25 km autour du site. La structure active la plus proche du site est localisée à environ 50 km à l'ouest du site, en bordure occidentale du bassin de Limagne.

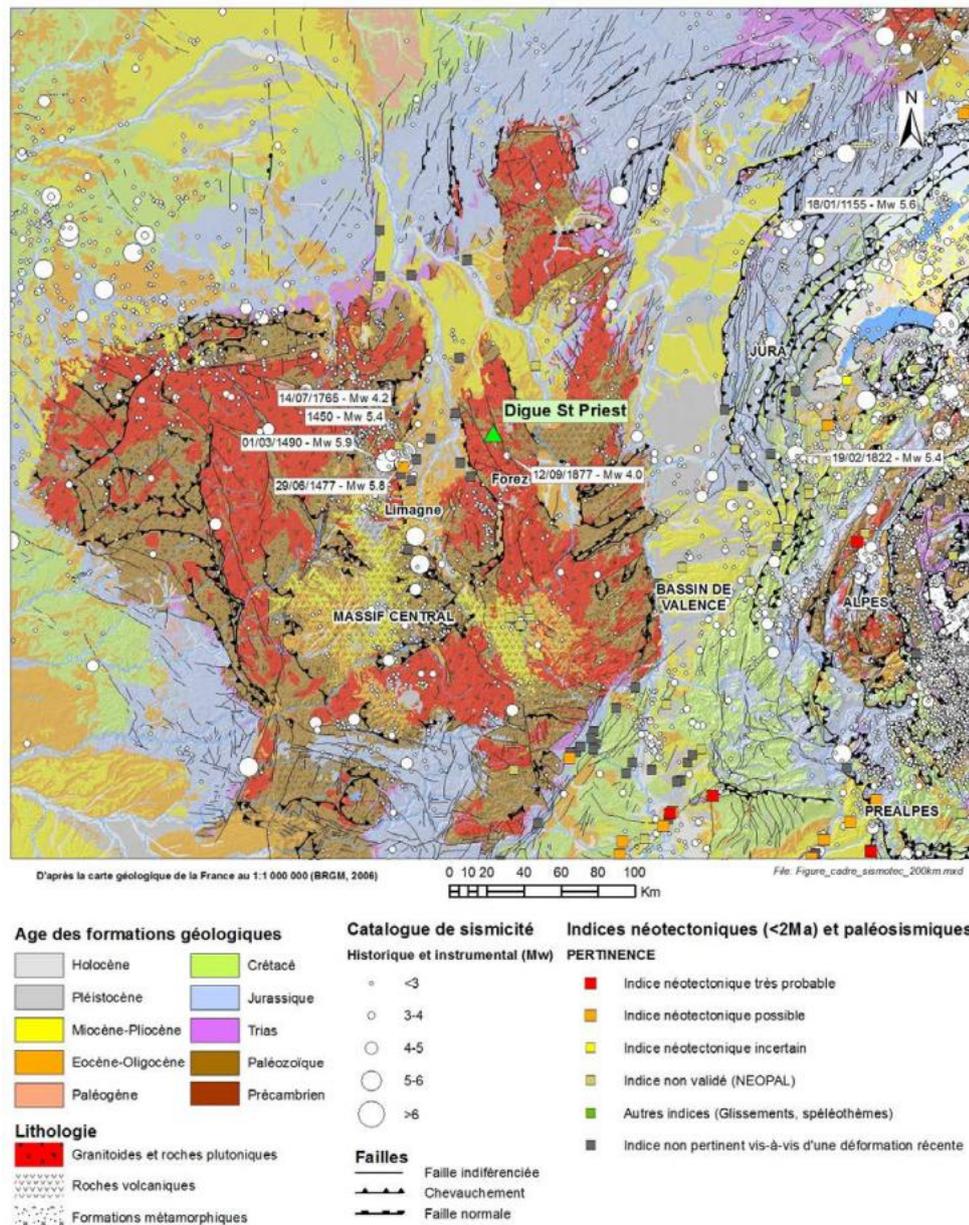


Figure 15 : Cadre géologique et sismotectonique de la région d'étude (Réf.[3])

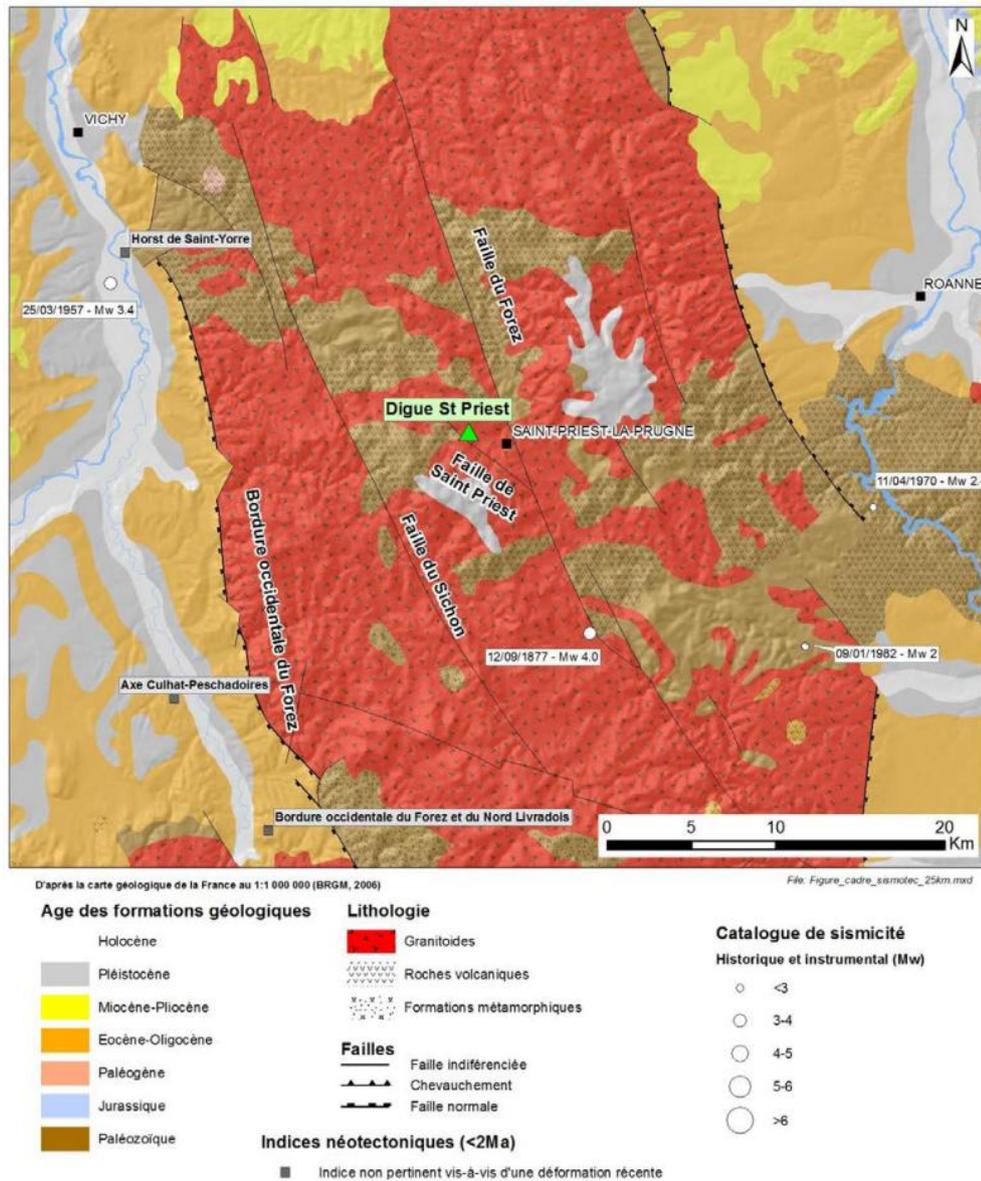


Figure 16 : Carte sismotectonique à l'échelle locale (Réf.[3])

6.3. Base de données sismologiques

Deux bases de données ont été consultées pour cette étude :

- La base des séismes historiques Sisfrance (<http://www.sisfrance.net/> IRSN/BRGM/EDF, 2010) : données macrosismiques et données sur les intensités épacentrales. Les données historiques concernent la période antérieure à 1962. Il s'agit des grands séismes connus historiquement mais dont la magnitude et la localisation de l'épicentre sont approximatives.

- Les données instrumentales du LDG (Laboratoire de détection Géophysique du CEA) pour la période 1962 à fin 2015. Il s'agit des séismes pour lesquels nous disposons d'enregistrements (accélérogrammes) : leur localisation est plus précise et les séismes de faibles magnitudes sont détectés et enregistrés.

Le catalogue de sismicité est homogénéisé en magnitude de moment M_w et les doublons et répliques sont supprimés selon la procédure présentée en [3].

Les figures suivantes présentent les séismes enregistrés dans chacune des bases dans un rayon de 200 km autour du barrage.

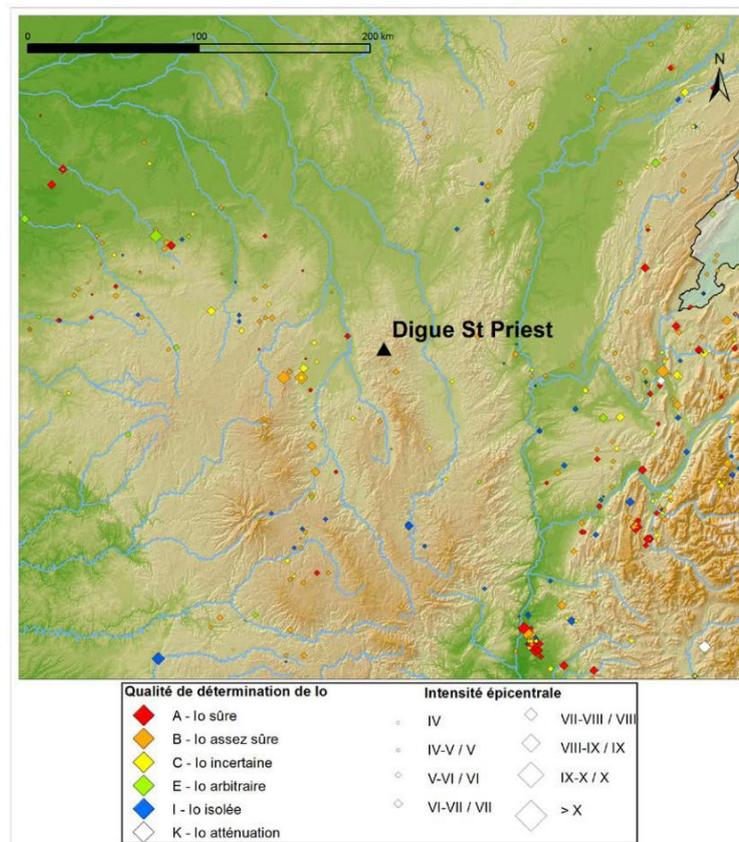


Figure 17 : Catalogue des séismes historiques d'après Sisfrance

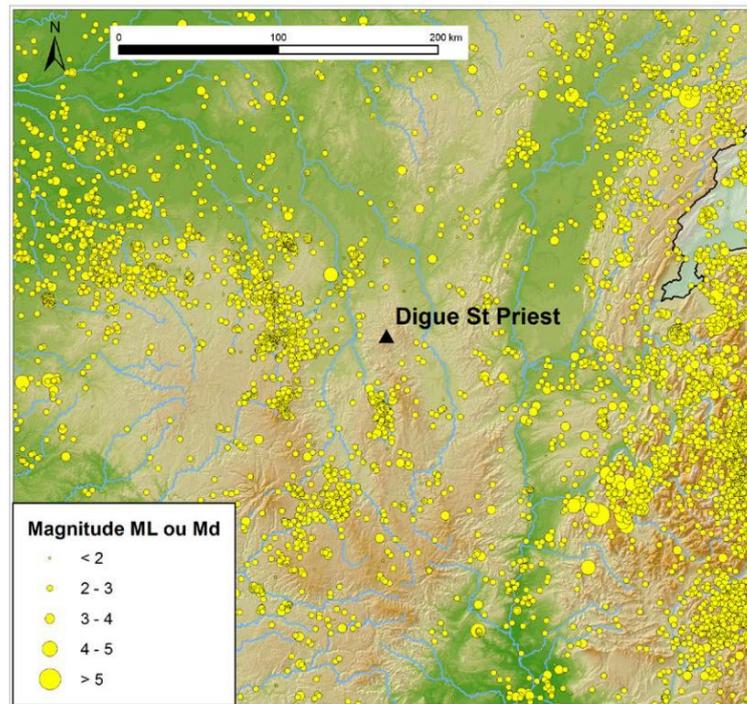


Figure 18 : Catalogue des séismes instrumentaux du LDG (période 1962-2015).

6.4. Résultats

Chaque branche de l'arbre logique représente une combinaison des différentes hypothèses prises pour chaque variable (magnitude, distance, modèle sismotectonique loi d'atténuation, ...) dont l'étude dépend (cf. 6.1 Méthodologie). L'exploitation de l'arbre logique attribue un poids à chaque branche, chacune représentative d'un modèle sismique alternatif. Ce poids est représentatif du niveau de confiance relatif accordé au modèle généré pour représenter l'aléa. (réf. [3]). Chaque modèle aboutit à une valeur d'aléa. Les valeurs moyennes citées ci-dessous correspondent à la moyenne des modèles sismiques pondérés par leur poids.

Les résultats comprennent les courbes d'aléa moyennes, calculées jusqu'à des probabilités annuelles de 10^{-6} et les spectres de réponse d'aléa uniforme (UHRs) moyens pour chaque période de retour (200, 5000, 10 000 et 30 000 ans).

Une désagrégation par triplets (magnitude, distance, epsilon) est également entreprise. Les schémas sont présentés pour la période de retour de 30 000 ans.

6.4.1. Courbes d'aléa

Une courbe d'aléa sismique présente la probabilité annuelle de dépassement des valeurs d'accélération dues à la sollicitation sismique pour une période spectrale donnée. Les courbes d'aléa obtenues au PGA et pour des périodes spectrales de 0,2 s et 1,0 s sont représentées sur les figures suivantes. Les courbes à retenir sont les courbes moyennes, marquées en noir dans les graphiques.

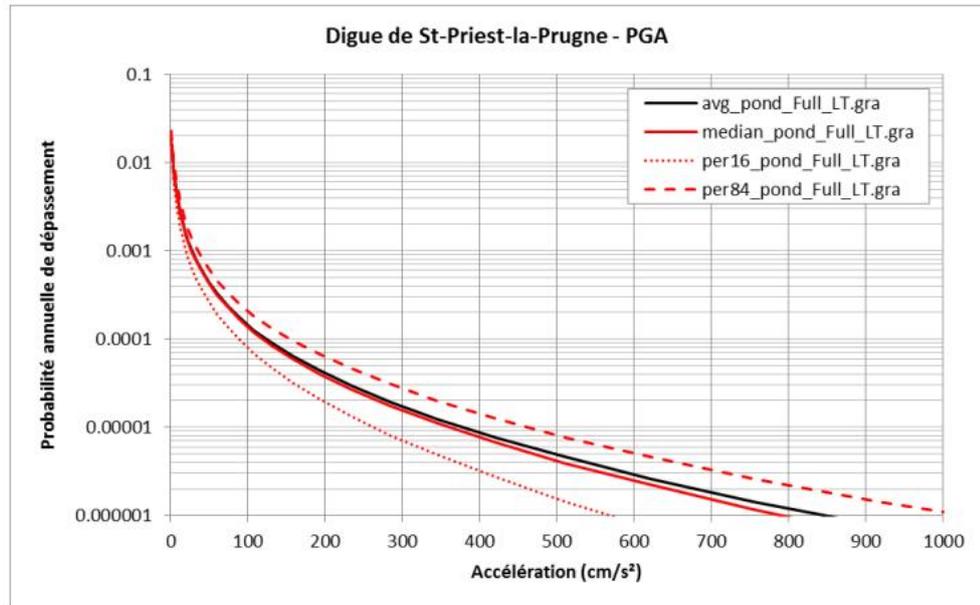


Figure 19 : Courbes d'aléa au PGA

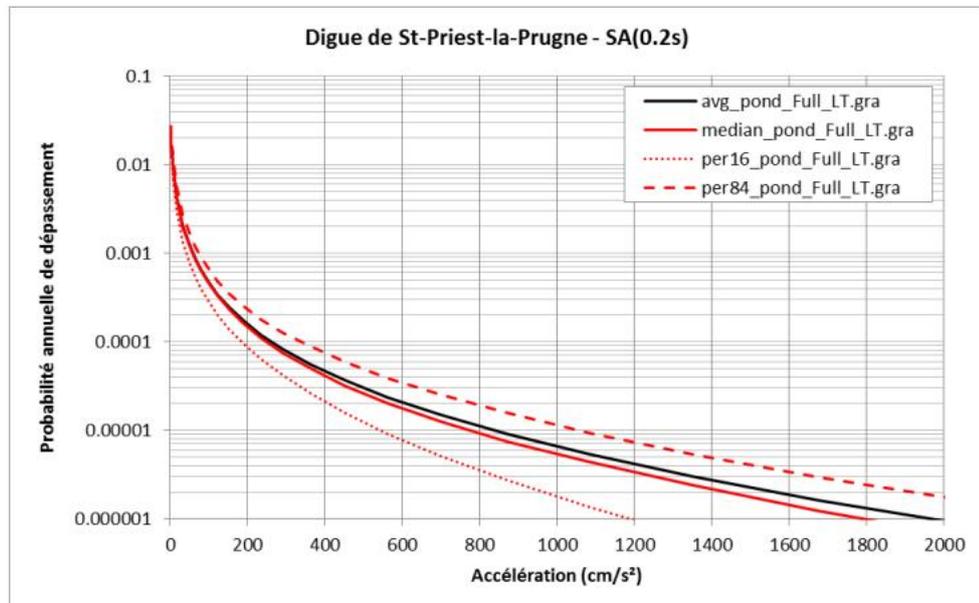


Figure 20 : Courbes d'aléa à 0,2 s

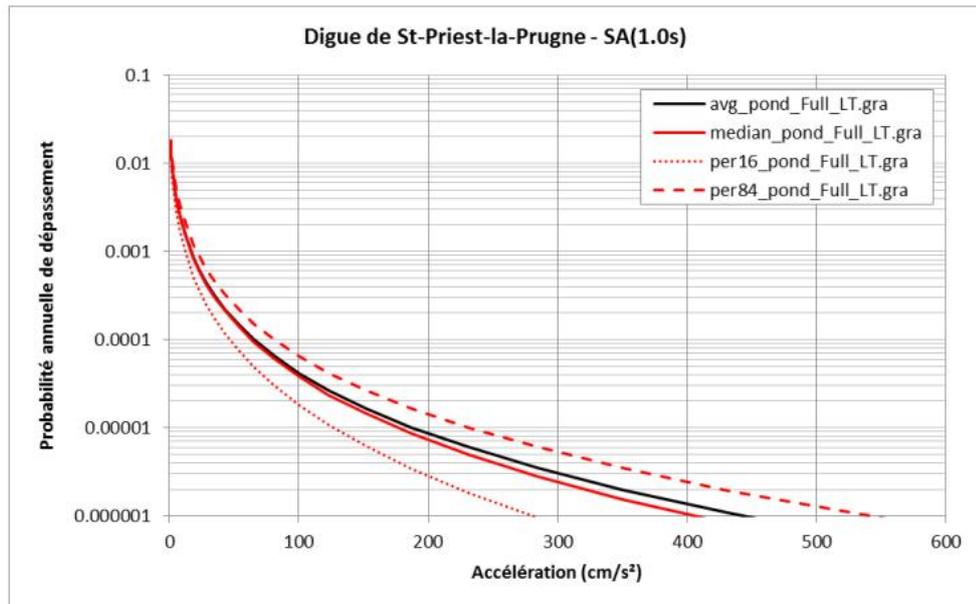


Figure 21 : Courbes d'aléa à 1,0 s

6.4.2. Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRS)

Le spectre de réponse élastique uniforme (UHRS) présente l'accélération en fonction de la période spectrale à prendre en compte pour une période de retour donnée, c'est-à-dire, pour une probabilité d'occurrence déterminée.

Les UHRS moyens pour des périodes de retour de 200, 5 000, 10 000, et 30 000 ans sont représentés sur les figures suivantes.

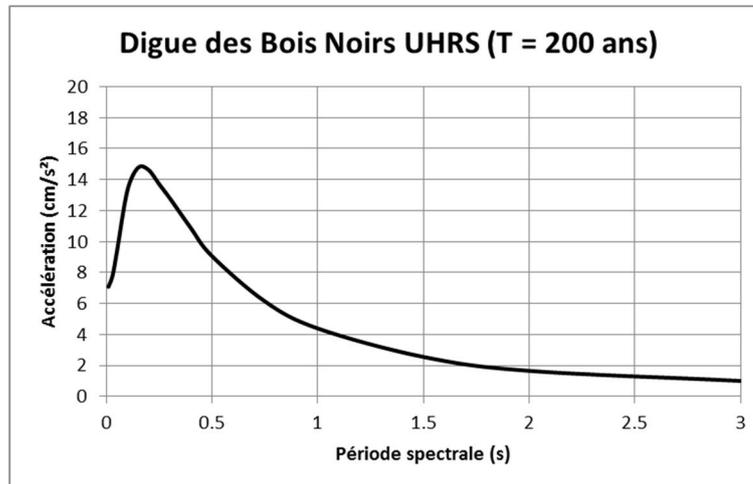


Figure 22 : Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRS) pour une période de retour de 200 ans.

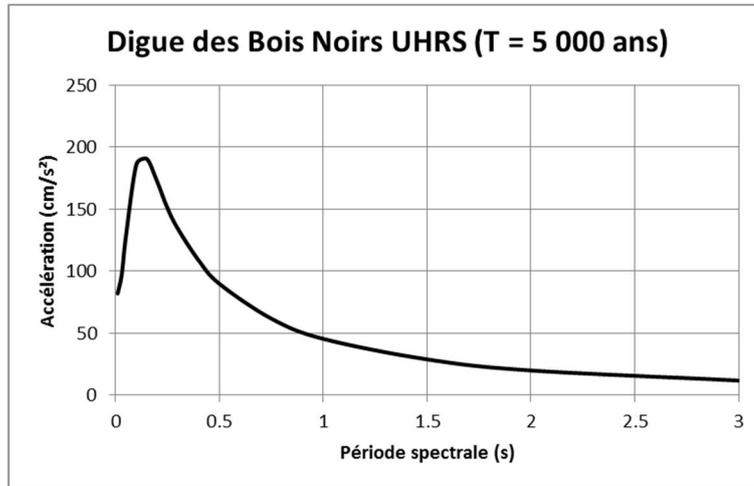


Figure 23 : Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRs) pour une période de retour de 5 000 ans.

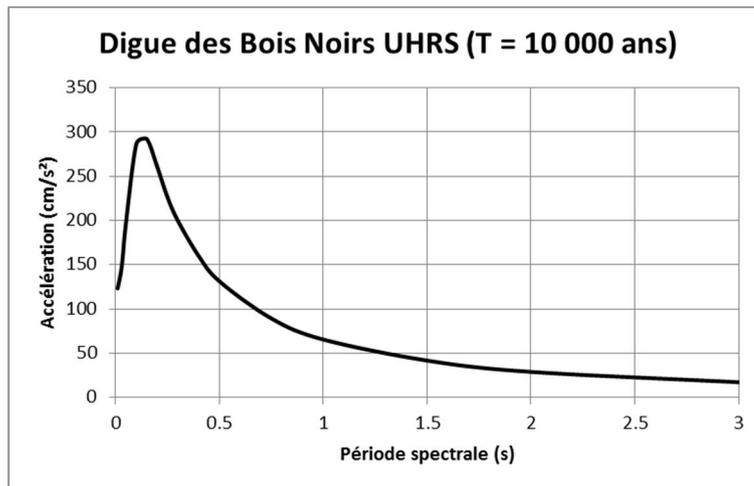


Figure 24 : Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRs) pour une période de retour de 10 000 ans.

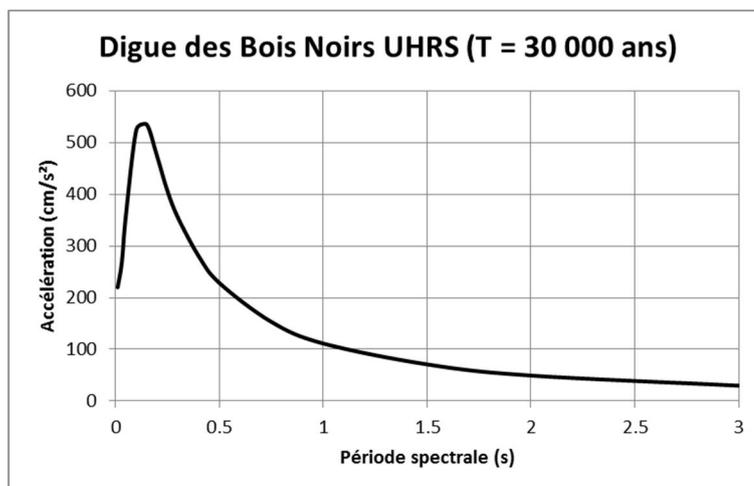


Figure 25 : Spectres de réponse élastiques uniformes (UHRs) pour une période de retour de 30 000 ans.

Période spectrale (s)	Accélération (cm/s ²) : moyenne			
	TR=200 ans	TR=5000 ans	TR=10000 ans	TR=30000 ans
PGA	7.07	81.96	123.22	219.87
0.03	7.82	97.87	148.63	268.41
0.05	9.33	128.43	197.20	360.49
0.10	13.32	186.12	286.49	525.24
0.15	14.77	190.76	292.14	535.56
0.20	14.63	172.49	261.09	473.77
0.25	13.71	150.89	226.28	406.35
0.30	12.81	134.25	199.70	355.23
0.40	10.87	108.76	159.93	280.48
0.50	9.06	89.88	131.34	228.33
0.75	6.14	61.73	89.29	152.96
1.00	4.39	45.44	65.54	111.18
1.50	2.55	28.86	41.74	70.68
2.00	1.65	19.93	28.94	49.05
3.00	1.00	11.80	17.28	29.42

Figure 26 : Valeurs d'accélération correspondantes aux spectres de réponse élastiques uniformes moyens.

6.4.3. Comparaison avec les spectres réglementaires

Le spectre de réponse élastique uniforme (UHRS) moyen à la période de retour de 5000 ans est comparé avec les spectres forfaitaires ICPE et DGPR/2014. La démarche détaillée est présentée dans § 7.4.1.3 de réf [3].

La Figure 28 compare le spectre élastique uniforme moyen calculé dans cette étude à la période de retour de 5 000 ans avec les spectres forfaitaires réglementaires ICPE et DGPR/2014.

Le cadre règlementaire actuel (ICPE en vigueur au 18/01/2018) ne prévoit pas l'utilisation des spectres définis localement. Le spectre à prendre en compte est celui défini par le ICPE pour les installations existantes pour la zone de sismicité 2, soit la courbe à trait rouge plein dans la Figure 28.

A titre de comparaison, le spectre spécifique est significativement inférieur aux spectres forfaitaires correspondants à une période de retour équivalente et ce pour toutes les périodes spectrales.

Type de spectre	a_g (m/s ²)	T_b	T_c	T_d
ICPE (installation existante)	1.30	0.03	0.2	2.5
ICPE (installation nouvelle)	1.54	0.03	0.2	2.5
DGPR/2014	1.50	0.03	0.2	2.5

Figure 27 : Paramètres des spectres forfaitaires ICPE et DGPR/2014 pour une zone de sismicité 2.

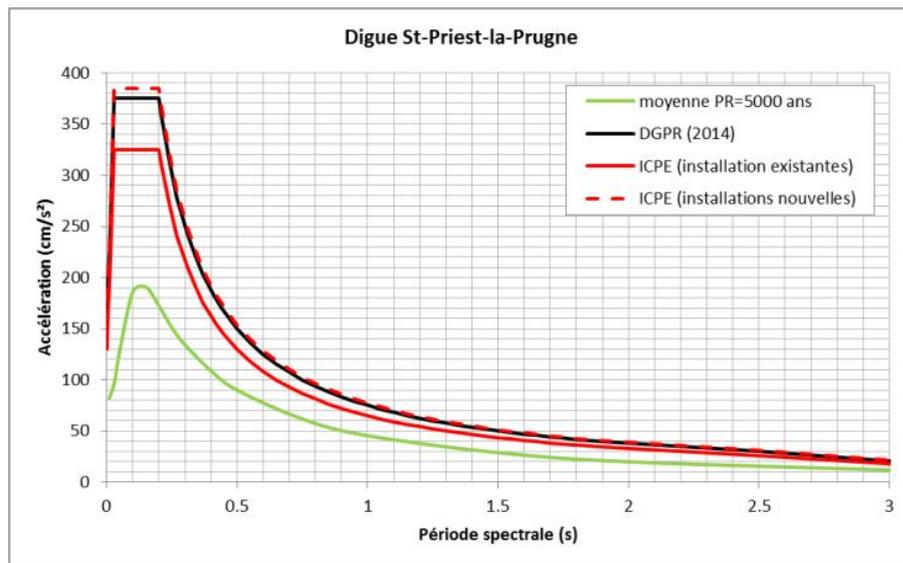


Figure 28 : Comparaison des spectres élastiques uniformes moyens pour les périodes de retour 5 000 ans avec les spectres DGPR/2014 et ICPE.

6.4.3.1. EVOLUTION DE L'ICPE

Concernant l'ICPE, il y a cependant un arrêté modifié qui est en cours d'approbation (numéro NOR : TREP1730066A) qui permettra la prise en compte d'un spectre déterminé localement :

« **Art. 14** - Le mouvement dû au séisme en un point donné de la surface du sol, à partir duquel les règles de la présente section doivent être appliquées, est représenté par un spectre de réponse élastique (verticale et horizontale) en accélération, dénommé par la suite « spectre de réponse élastique ».

« L'exploitant détermine le spectre en réponse élastique :

« - soit à travers le zonage de sismicité et la nature du sol, conformément aux dispositions de l'article 14-1 ;

« - soit à travers une étude de sismicité locale, conformément aux dispositions de l'article 14-2.

[...]

« **Art. 14-2** - Le spectre de réponse élastique établi en application du troisième alinéa de l'article 14, est déterminé à travers une étude locale basée sur des travaux de recherche reconnus, pour des périodes de retour de 5 000 ans et 3 000 ans respectivement pour les installations nouvelles et existantes.

« Ainsi calculés, les spectres de réponse élastique pour les installations nouvelles ne peuvent être inférieurs à ceux qui auraient été calculés conformément aux dispositions de l'article 14-I-1-a), en considérant la zone de sismicité, définie à l'article R. 563-4 du code de l'environnement, directement inférieure à celle de la zone d'implantation de l'installation. »

Nous nous plaçons dans le cas d'une installation existante et la période de retour de référence est de 3 000 ans. La période de retour préconisée pour l'ouvrage est de 30 000 ans selon le PGT/2015 (draft du rapport du GT PNGMDR sur la stabilité des digues) et nous pouvons obtenir le spectre correspondant en appliquant un coefficient d'importance de :

$$\gamma = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1/3} = \left(\frac{30\,000}{3\,000} \right)^{1/3} = 2,15$$

La Figure 29 présente, pour la période de retour de 30 000 ans, les spectres réglementaires ICPE pour les installations existantes ainsi que le spectre déterminé localement. L'accélération au PGA pour la zone 1 est de 159 cm/s² et de 280 cm/s² pour la zone 2, pour cette période de retour.

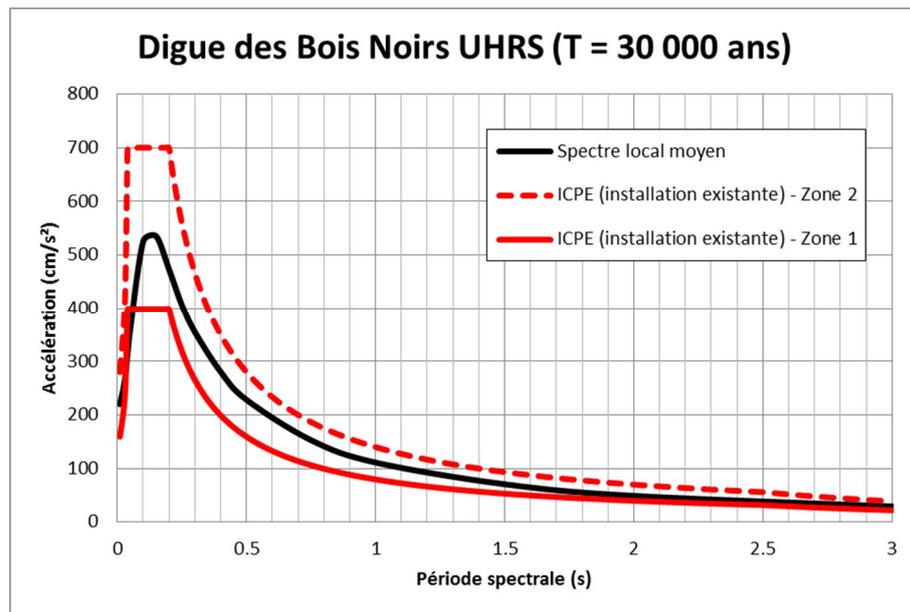


Figure 29 : Comparaison des spectres élastiques uniformes moyens pour la période de retour 30 000 ans avec les spectres ICPE pour les zones 1 et 2

Selon ces nouvelles dispositions, le spectre à prendre en compte est l'enveloppe entre le spectre défini localement et le spectre réglementaire de la zone de sismicité immédiatement inférieure, soit la zone 1 dans le cas de la Digue des Bois-Noirs (situé en zone 2).

Le spectre enveloppe à prendre en compte est présenté dans la Figure 30 et les valeurs des accélérations sont présentées dans le Tableau 2.

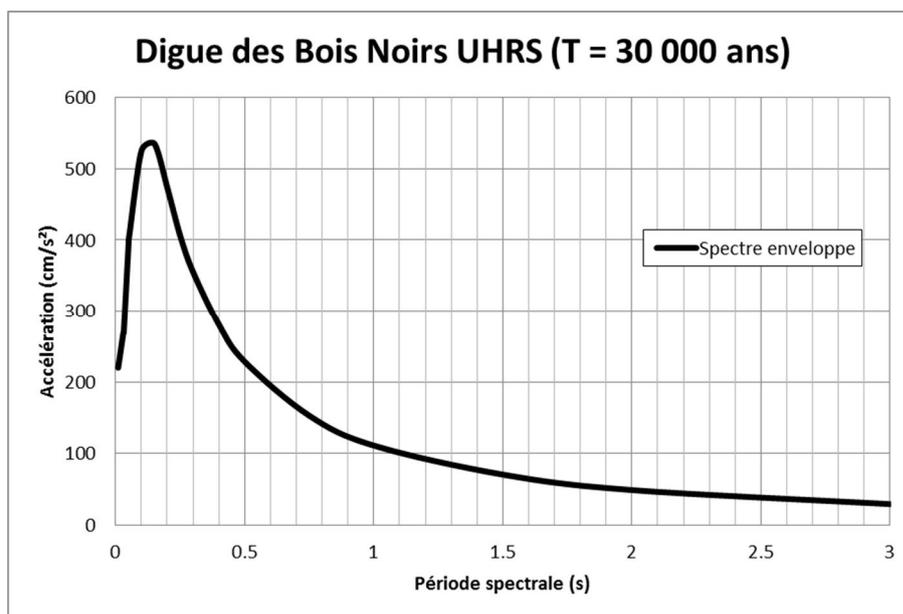


Figure 30 : Spectres élastiques uniformes enveloppe pour la période de retour 30 000 ans

Tableau 2 : Valeurs d'accélérations correspondantes au spectre de réponse élastique uniforme enveloppe.

Spectre enveloppe, TR = 30 000 ans	
Période spectrale (s)	Accélération (cm/s ²)
0.01	219.87
0.03	268.41
0.05	398.57
0.10	525.24
0.15	535.56
0.20	473.77
0.25	406.35
0.30	355.23
0.40	280.48
0.50	228.33
0.75	152.96
1.00	111.18
1.50	70.68
2.00	49.05
3.00	29.42

6.4.4. Désagrégation de l'aléa par couple magnitude/distance

La contribution relative de chaque couple magnitude/distance est représentée sous forme d'un histogramme, qui contient aussi l'information du nombre d'écart-type (epsilon) du modèle de mouvement du sol correspondant à l'accélération calculée pour ce couple magnitude/distance.

Le schéma de désagrégation obtenu, présenté sur la figure suivante, montre que les contributions principales à l'aléa sont dues à des séismes proches (distances inférieures à 20 km) ayant des magnitudes comprises entre Mw 5.0 et Mw 6.5.

Cette analyse permet d'observer, par exemple, que :

- les séismes à magnitudes supérieures à 6.5, à n'importe quelle distance de l'ouvrage, contribuent peu à l'aléa sismique, c'est-à-dire, ne sont pas essentiellement importants lors de l'évaluation du risque sismique. Cela peut être expliqué par leur faible probabilité d'occurrence dans la zone. ;
- les séismes situés à plus de 20 km de l'ouvrage contribuent peu à l'aléa sismique quelle que soit leur magnitude. Cela peut être expliqué par le fait que le sol amorti suffisamment les ondes sismiques de telle sorte que l'ouvrage n'est pas impacté de manière importante.

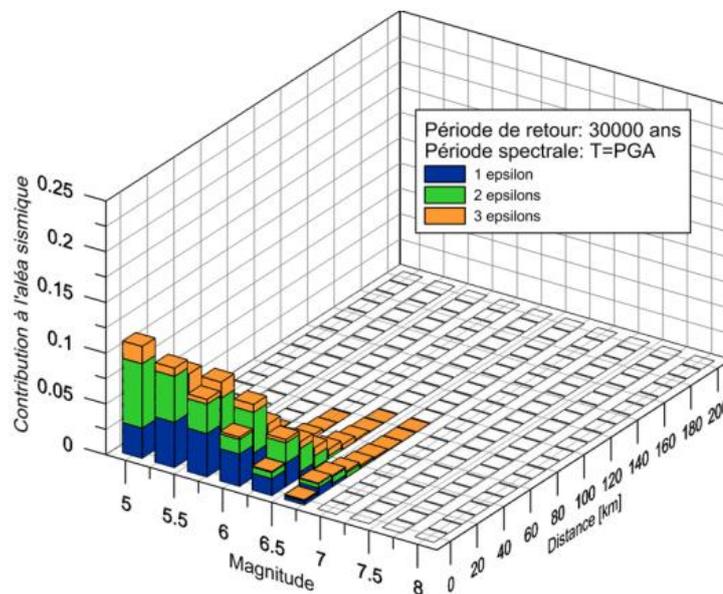


Figure 31 : Désagrégation par magnitude, distance et epsilon au PGA et pour une période de retour de 30000 ans.

6.5. Synthèse des résultats

L'étude d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique pour le site du barrage des Bois Noirs a été menée en tenant compte de l'état actuel des connaissances sur les conditions géologiques et géotechniques. Les résultats sont présentés en termes de spectres de réponse d'aléa uniforme, pour la composante horizontale du mouvement du sol en champ libre, à 5% d'amortissement critique.

Les valeurs moyennes des accélérations maximales du sol (PGA), calculées aux périodes de retour de 200, 5000, 10000 et 30000 ans, sont, respectivement, de 7.07, 81.96, 123.22, et 219.87 cm/s².

En ce qui concerne la période de retour de 30 000 ans, qu'il est préconisé de considérer dans le PGT/2015, le niveau forfaitaire peut-être extrapolé du niveau forfaitaire ICPE grâce à la formule du coefficient d'importance donnée dans l'Eurocode 8 et reprise dans le DGPR/2014.

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

Selon le cadre réglementaire actuel, le spectre à adopter pour la Digue des Bois-Noirs est celui obtenu à partir de l'ICPE pour les installations existantes, soit avec une accélération au PGA de 280 cm/s² (pour une période de retour de 30 000 ans). Ce spectre est présenté dans la Figure 32.

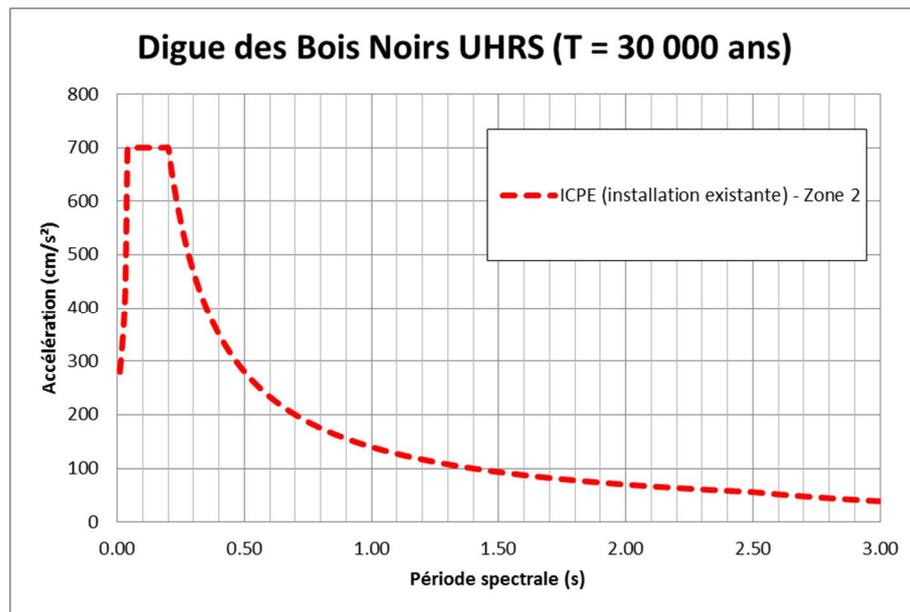


Figure 32 : Spectre élastique uniforme réglementaire ICPE pour les installations existantes pour la zone 2 et pour la période de retour 30 000 ans

En considérant les dispositions de l'arrêté modifié encore en cours d'approbation, où il sera admis de prendre en compte un spectre défini localement, le spectre enveloppe à adopter pour la période de retour de 30 000 ans est présenté dans la Figure 33 et les valeurs des accélérations sont présentées dans le Tableau 3.

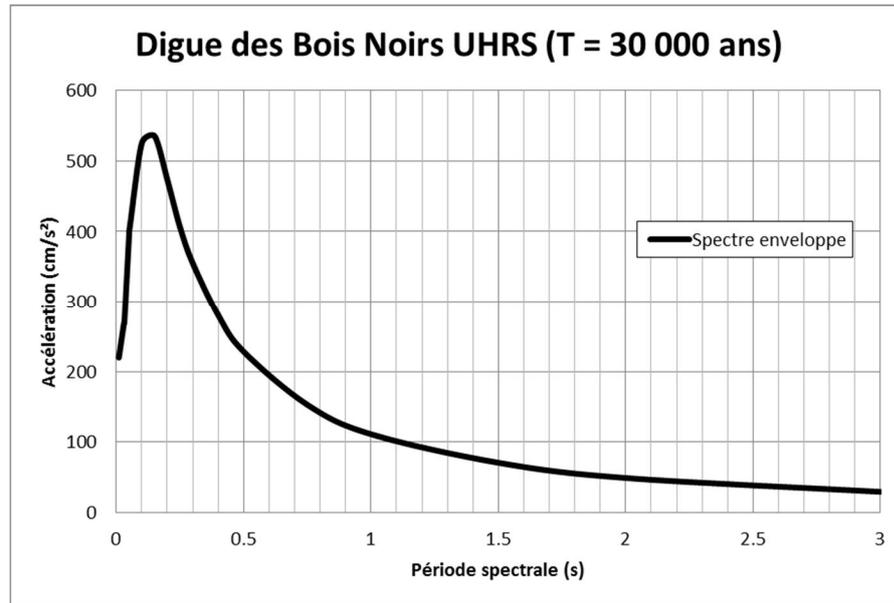


Figure 33 : Spectre élastique uniformes enveloppe pour la période de retour 30 000 ans

Tableau 3 : Valeurs d'accélérations correspondantes au spectre de réponse élastique uniforme enveloppe.

Spectre enveloppe, TR = 30 000 ans	
Période spectrale (s)	Accélération (cm/s²)
0.01	219.87
0.03	268.41
0.05	398.57
0.10	525.24
0.15	535.56
0.20	473.77
0.25	406.35
0.30	355.23
0.40	280.48
0.50	228.33
0.75	152.96
1.00	111.18
1.50	70.68
2.00	49.05
3.00	29.42

6.6. Etude de stabilité de la digue des Bois-Noirs - Tractebel - 2016

Ce chapitre rappelle les résultats de l'étude de stabilité de la digue réalisée en 2016 par TRACTEBEL Engineering.

Les hypothèses sur les caractéristiques mécaniques des matériaux sont rappelées dans la fiche synoptique de l'ouvrage au chapitre 3 ainsi que dans l'étude de stabilité citée en référence (cf. Réf [6]).

6.6.1. 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 [6]).

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

COEFFICIENT DE STABILITE		GLISSEMENT		Valeurs minimales	
		LOCAL (F>1,3 statique F>1 séisme)	GLOBAL (F>1,5 statique F>1 séisme)	LOCAL	GLOBAL
SURCHARGES ROUTIERES AVANT REAMENAGEMENT					
Stabilité du parement amont :	Profil 1	1,34	1,62	1,33	1,61
	Profil 2	1,36	1,61		
	Profil 3	1,33	1,61		
Stabilité du parement aval :	Profil 1	1,39	1,51	1,39	1,51
	Profil 2	1,39	1,73		
	Profil 3	1,45	1,58		
PHASE 1 : ASSECHEMENT DE LA RETENUE - STABILITE DU PAREMENT AMONT					
à demi-charge :	Profil 1	1,35	1,69	1,31	1,59
	Profil 2	1,36	1,62		
	Profil 3	1,31	1,59		
à retenue vide :	Profil 1	1,35	1,7	1,31	1,67
	Profil 2	1,36	1,67		
	Profil 3	1,31	1,72		
PHASE 2 : REMBLAIEMENT DE LA CUVETTE - STABILITE DU PAREMENT AVAL					
en fonctionnement normal :	Profil 1	1,4	1,53	1,40	1,53
	Profil 2	1,41	1,73		
	Profil 3	1,46	1,55		
en régime dégradé :	Profil 1	1,42	1,52	1,39	1,52
	Profil 2	1,39	1,62		
	Profil 3	1,46	1,55		
PHASE 3 : ARASEMENT DE LA DIGUE - STABILITE DU PAREMENT AVAL					
en fonctionnement normal :	Profil 1	1,43	1,57	1,39	1,55
	Profil 2	1,39	1,75		
	Profil 3	1,77	1,55		
en régime dégradé :	Profil 1	1,43	1,57	1,40	1,57
	Profil 2	1,40	1,62		
	Profil 3	1,80	1,57		

Figure 34 : Résultats des calculs de stabilité - Statique

6.6.2. Liquéfaction

La vérification de la sensibilité à la liquéfaction est détaillée dans le rapport concernant l'étude de stabilité de la digue des Bois-Noirs réalisé par TRACTEBEL (cf. Réf [6]).

Les analyses ont été effectuées suivant les prescriptions de l'Eurocode 8 et ont été complétées par l'application des critères granulométriques des règles PS92.

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

6.6.3. Calculs sismiques – Période de retour de 3 000 ans

Les analyses de stabilité sous séisme, en fonctionnement hydraulique normal, sont rappelées ci-dessous.

Les accélérations sismiques appliquées dans l'analyse pseudo-statiques sont les suivantes pour une zone de sismicité 2 et un sol de classe C :

- $a_{gr} = 1.0 \text{ m/s}^2$
- $a_{vr} = 0.5 \text{ m/s}^2$

COEFFICIENT DE STABILITE		GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)	GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)
Séisme – Période de retour 3 000 ans					
sous séisme en fonctionnement hydraulique normal (F>1.2)	Profil 1	1.32	1.40	1.29	1.40
	Profil 2	1.44	1.48		
	Profil 3	1.29	Sans Objet		

Figure 35 : Stabilité sous séisme – Période de retour 3 000 ans

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

6.6.4. 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 $Y=2.15$ a été appliqué sur le spectre d'aléa sismique de référence.

Les accélérations sismiques appliquées dans l'analyse pseudo-statiques sont les suivantes :

- $a_{gr} = 1.0 \times 2.15 = 2.15 \text{ m/s}^2$
- $a_{vr} = 0.5 \times 2.15 = 1.05 \text{ m/s}^2$

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

COEFFICIENT DE STABILITE - Séisme 30 000 ans		GLOBAL (F>1,2)
SEISME – Profil n°1	Zone d'émergence des cercles de glissement	Facteur de sécurité
Stabilité du parement aval :	Tiers 1	1.01
	Tiers 2	1.01
	Tiers 3	1.01
	Parement aval 1	1.02
	Parement aval 2	1.13
	Résidus	1.52
SEISME – Profil n°2		
Stabilité du parement aval :	Tiers 1	1.10
	Tiers 2	1.11
	Tiers 3	1.11
	Parement aval 1	1.12
	Parement aval 2	1.22
	Résidus	1.37
SEISME – Profil n°3		
Stabilité du parement aval :	Tiers 1	1.05
	Tiers 2	1.06
	Parement aval 1	1.10
	Parement aval 2	1.36

Figure 36 : 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 des Bois Noirs, les exigences en terme de réserve de sécurité ne sont pas atteintes (aussi bien pour un coefficient de stabilité global de 1.2 que de 1.1).

6.6.5. Conclusion sur l'étude de stabilité

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.

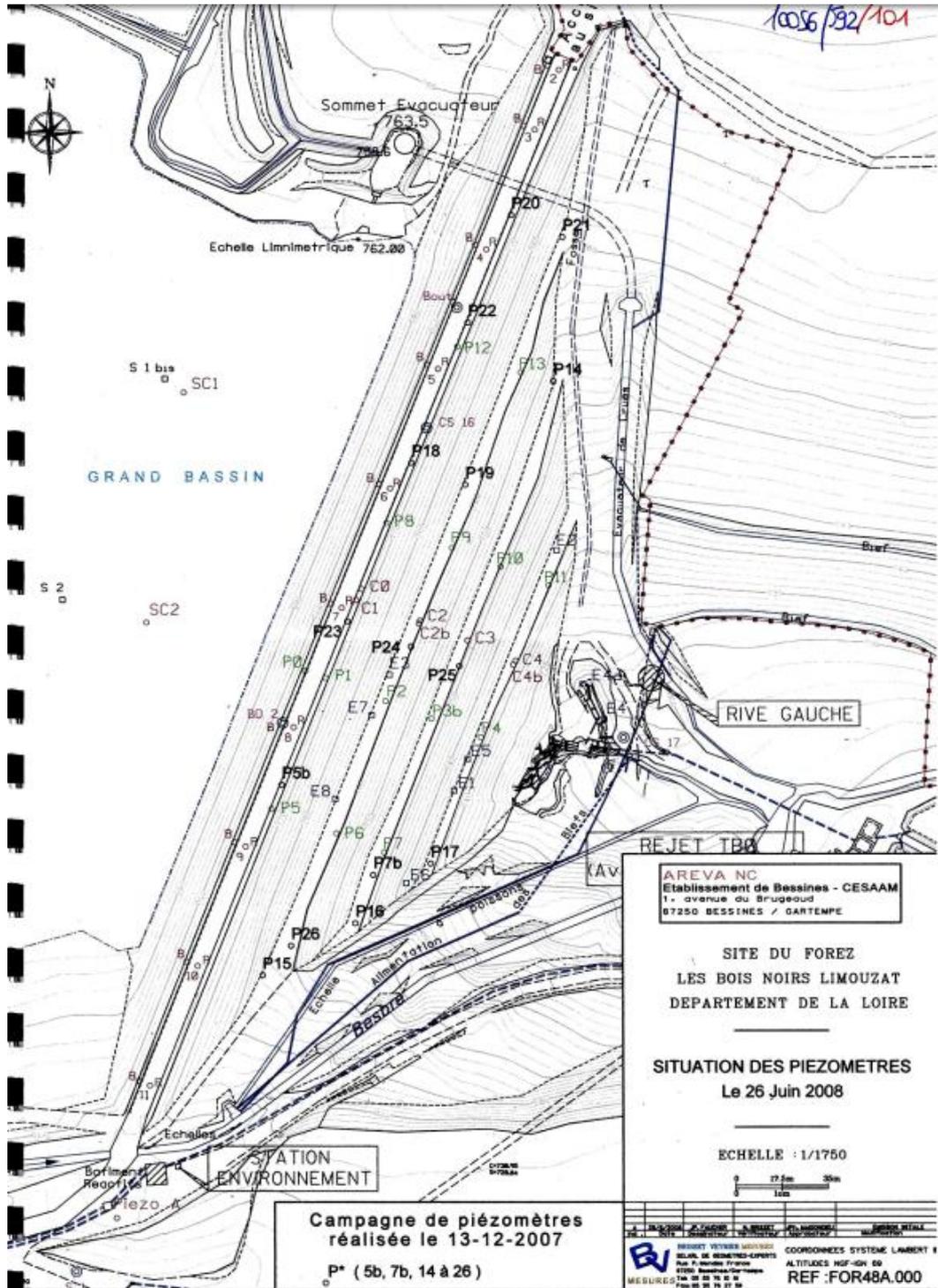
Lorsque la sollicitation sismique considérée est supérieure aux recommandations en vigueur pour les ouvrages du type des Bois Noirs, les exigences en terme de réserve de sécurité ne sont pas atteintes (aussi bien pour un coefficient de stabilité global de 1.2 que de 1.1).

Néanmoins, le facteur de sécurité reste supérieur à 1, et les dégradations restent localisées sur la partie aval de l'ouvrage. La réserve de sécurité de l'ouvrage permet d'assurer qu'aucun cercle de glissement ne vienne directement intercepter les résidus entreposés.

La digue des Bois-Noirs est donc jugée stable sur la base de l'étude menée en 2016 (cf. Réf [6]).

7. ANNEXES

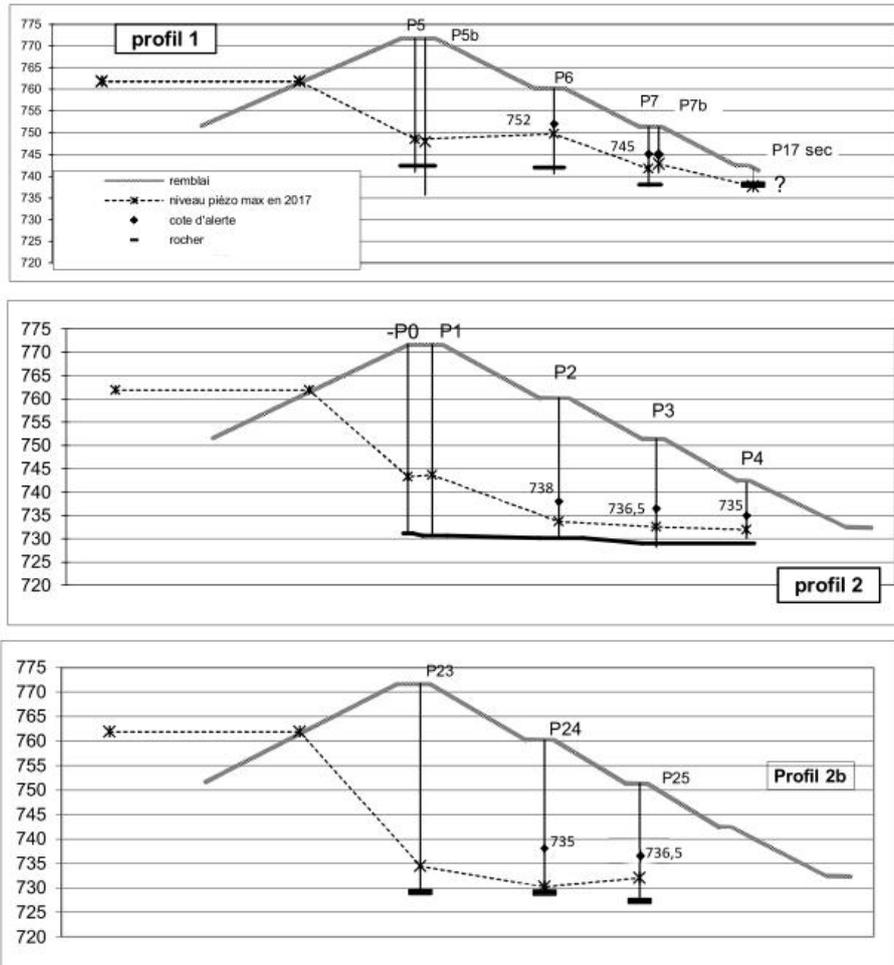
7.1. Piézométrie : Disposition des piézomètres



This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any duplication or transmission to third parties is forbidden without prior written approval

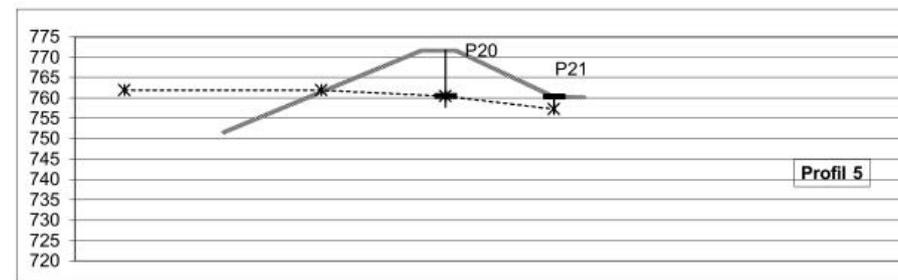
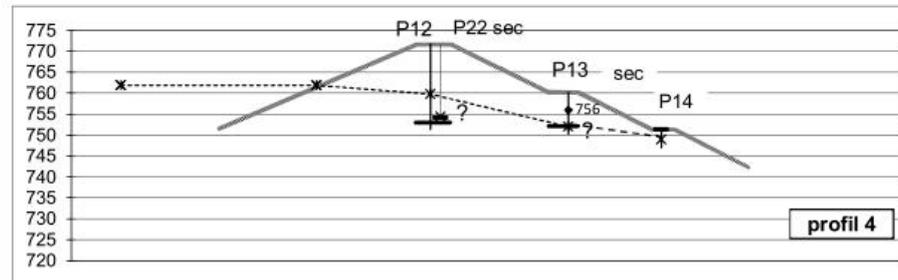
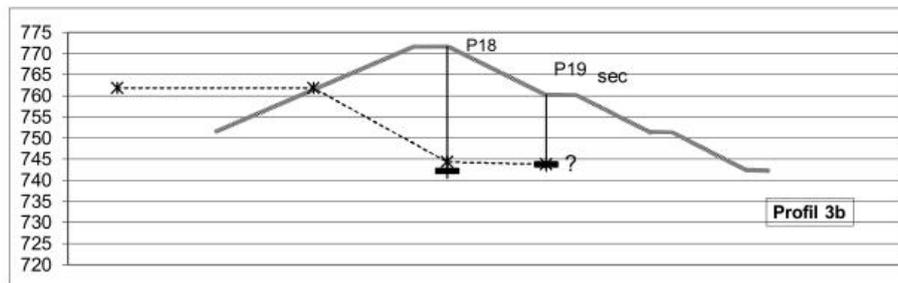
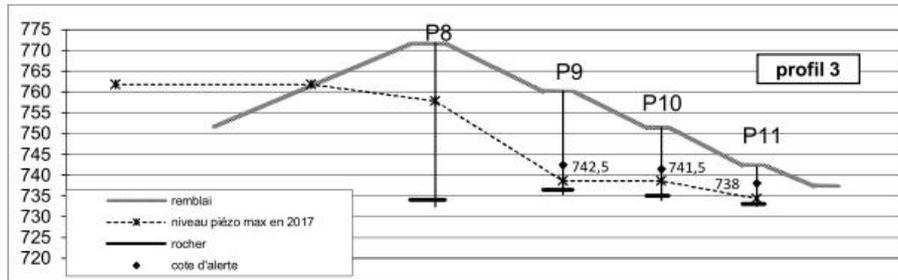
7.2. Piézométrie : Coupes transversales et niveaux piézométriques

Coupes transversales - Niveaux piézométriques par profil
Rive droite et Centre rive droite

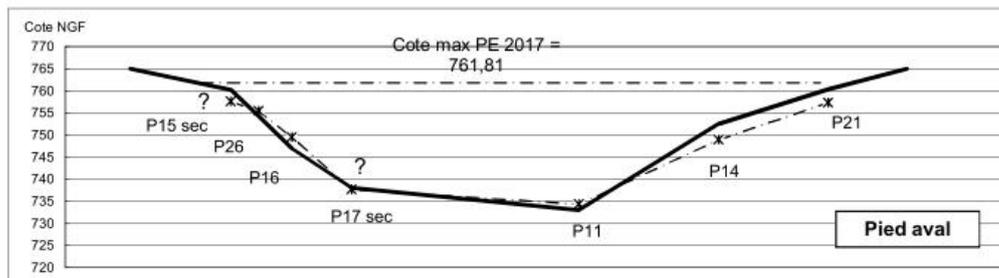
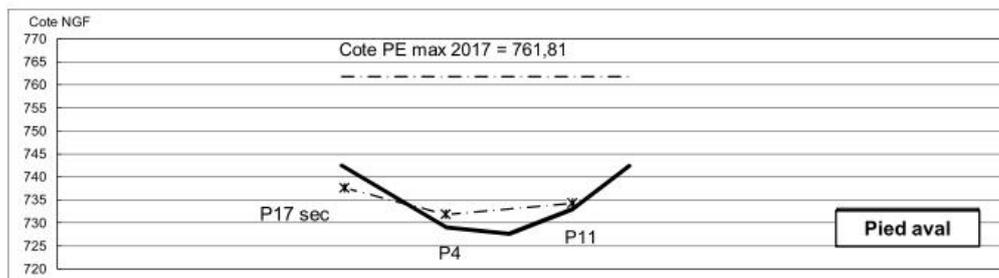
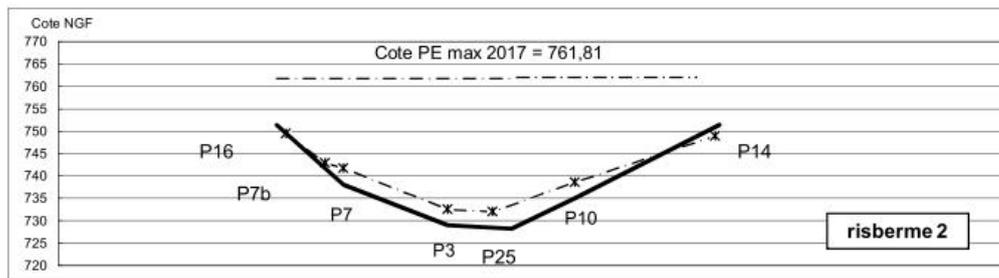
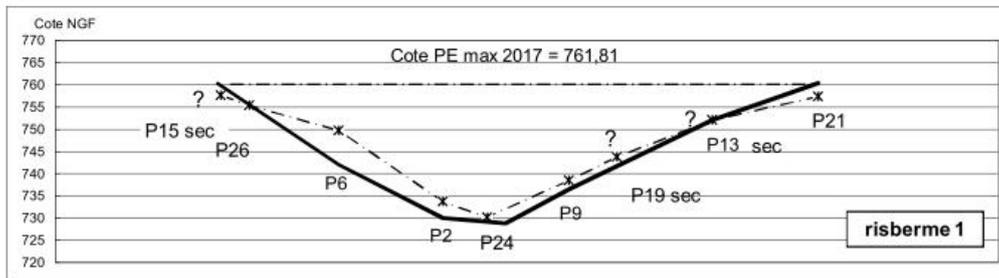
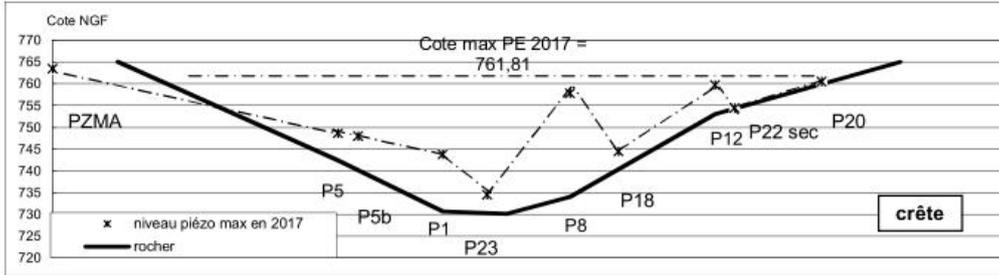


This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any duplication or transmission to third parties is forbidden without prior written approval

**Coupes transversales - Niveaux piézométriques par profil
Centre rive gauche et Rive gauche**

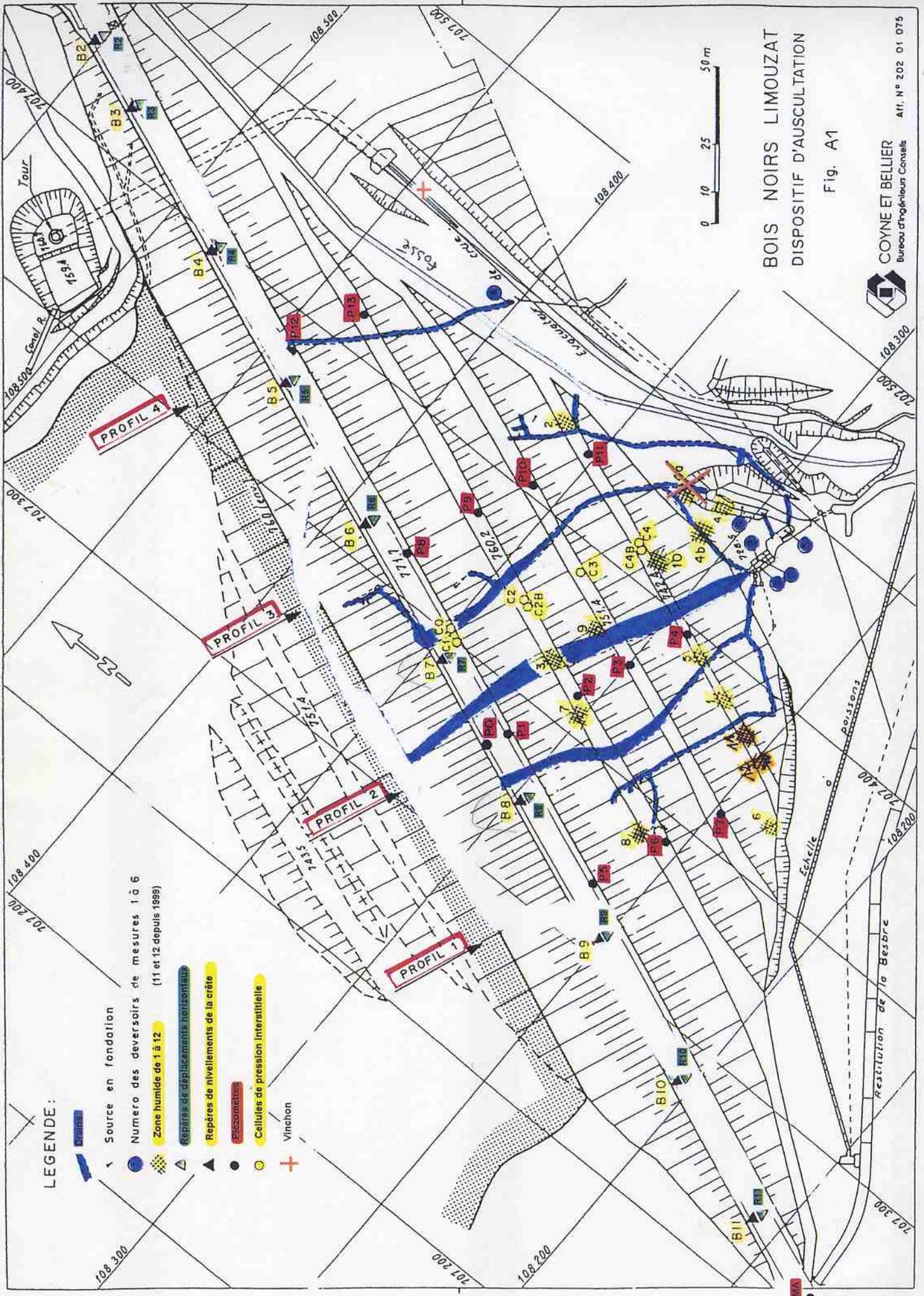


Coupes longitudinales - Niveaux piézométriques maximum 2017



This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any duplication or transmission to third parties is forbidden without prior written approval

7.3. Plans du dispositif d'auscultation



LEGENDE :

-  Source en fondation
-  Numero des deversoirs de mesures 1 à 6 (11 et 12 depuis 1999)
-  Zone humide de 1 à 12
-  Repères de déplacements horizontaux
-  Repères de nivellements de la crête
-  Cellomatères
-  Cellules de pression interstitielle
-  Vinchon

BOIS NOIRS LIMOUZAT
DISPOSITIF D'AUSCULTATION

Fig. A1



COYNE ET BELLIER
Bureau d'ingénieurs Conseils

10056/592/104



Sommet Evacuateur
763.5
758.6

Echelle Limnimétrique 762.00

S 1 bis
SC1

GRAND BASSIN

S 2

SC2

RIVE GAUCHE

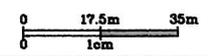
REJET TBO

AREVA NC
Etablissement de Bessines - CESAAM
1, avenue du Brugeaud
87250 BESSINES / GARTEMPE

SITE DU FOREZ
LES BOIS NOIRS LIMOUZAT
DEPARTEMENT DE LA LOIRE

SITUATION DES PIEZOMETRES
Le 26 Juin 2008

ECHELLE : 1/1750



STATION ENVIRONNEMENT

Campagne de piézomètres
réalisée le 13-12-2007

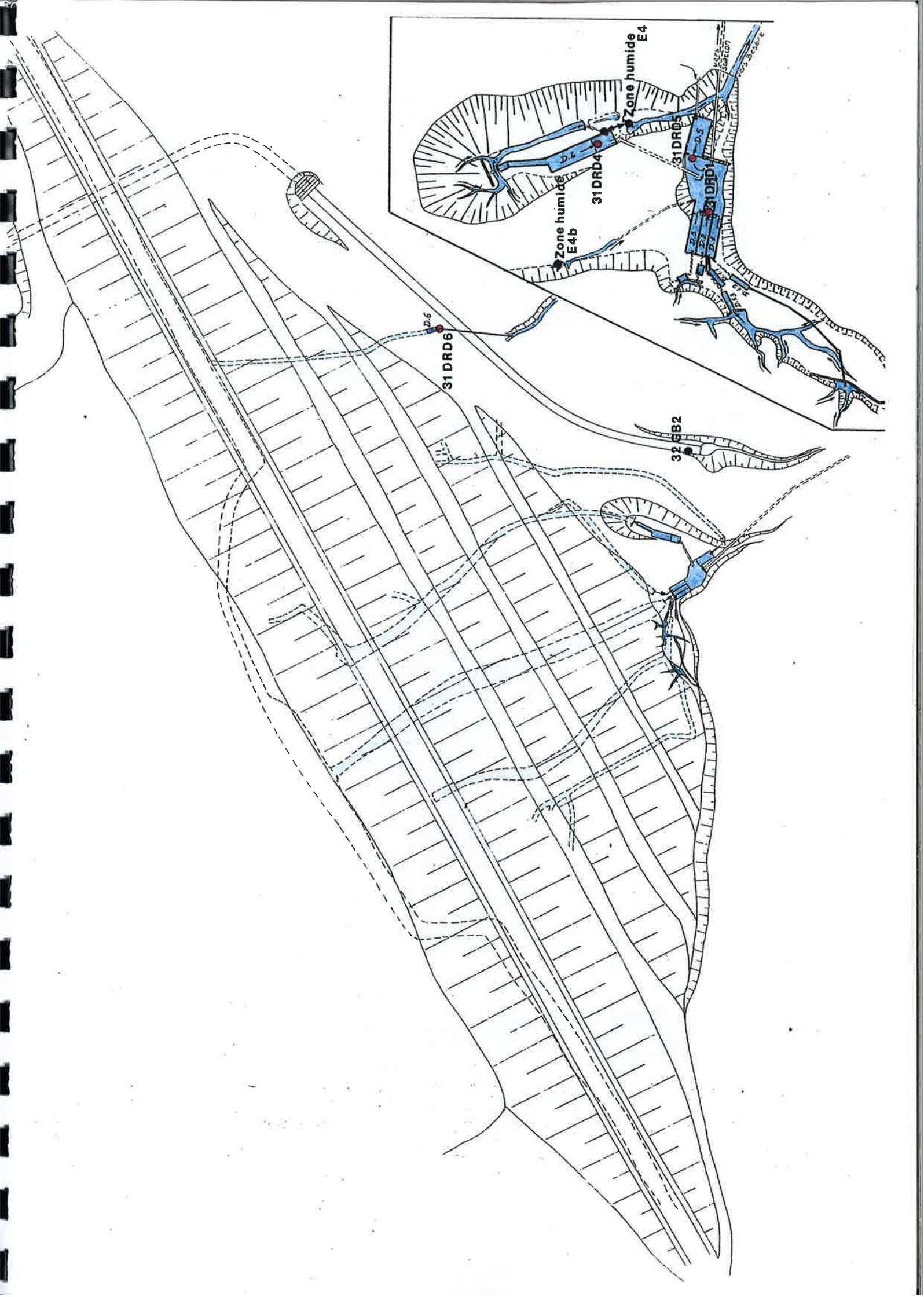
P* (5b, 7b, 14 à 26)

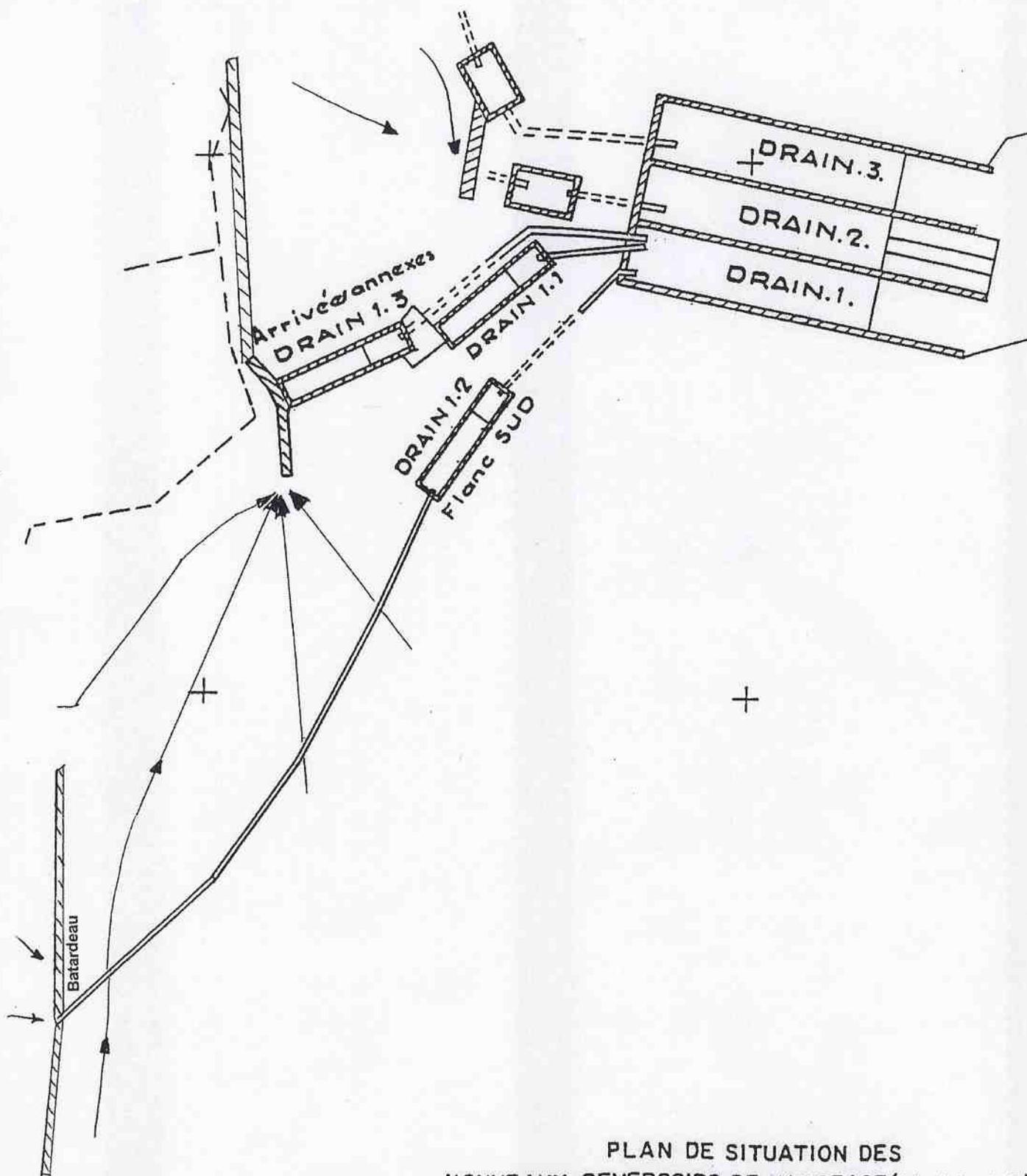
A	26/6/2008	J. FAUCHER	N. BRISSET	J.P. MAISONNEU	EMERSON BETALE
Ind.	Date	Dessinateur	Vérificateur	Approuvé	Modification
					COORDONNEES SYSTEME LAMBERT II ALTITUDES NGF-IGN 69 REF : FOR48A.000



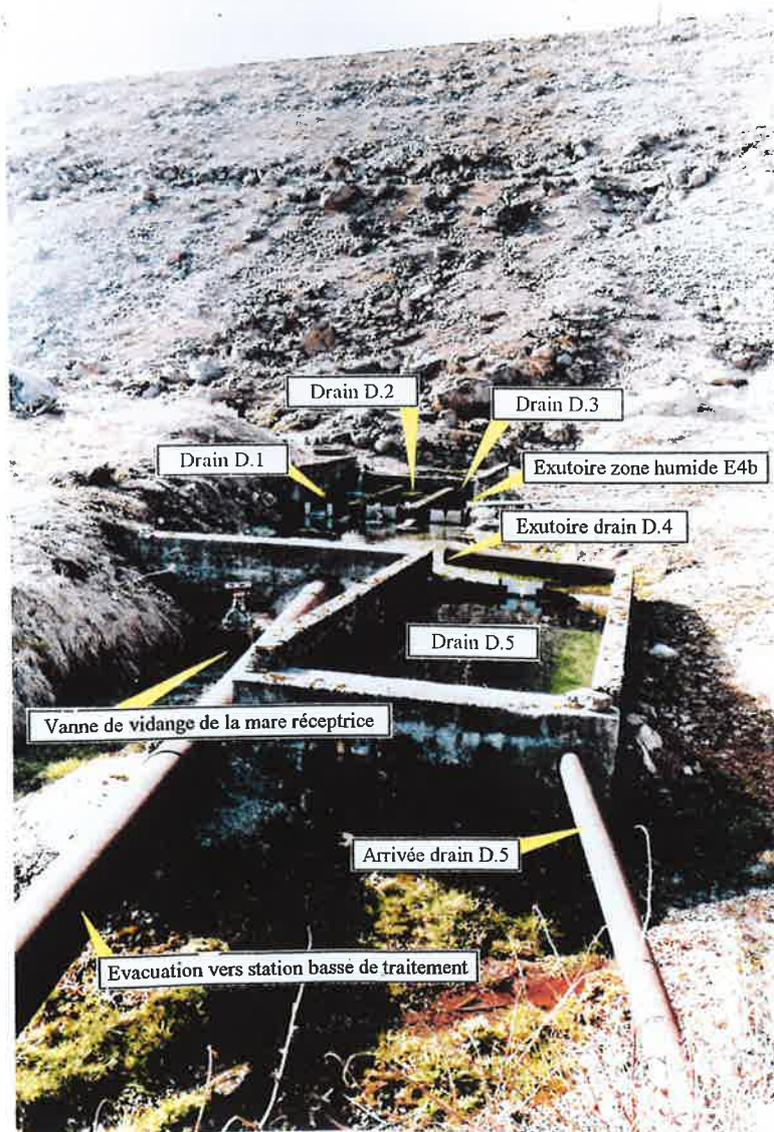
BRISSET VEYRIER MESURES
SELARL DE GEOMETRES-EXPERTS
Rue P. Mendès France
87250 Bessines/Gartempe
Tél: 05 55 76 10 61
Fax: 05 55 76 27 58

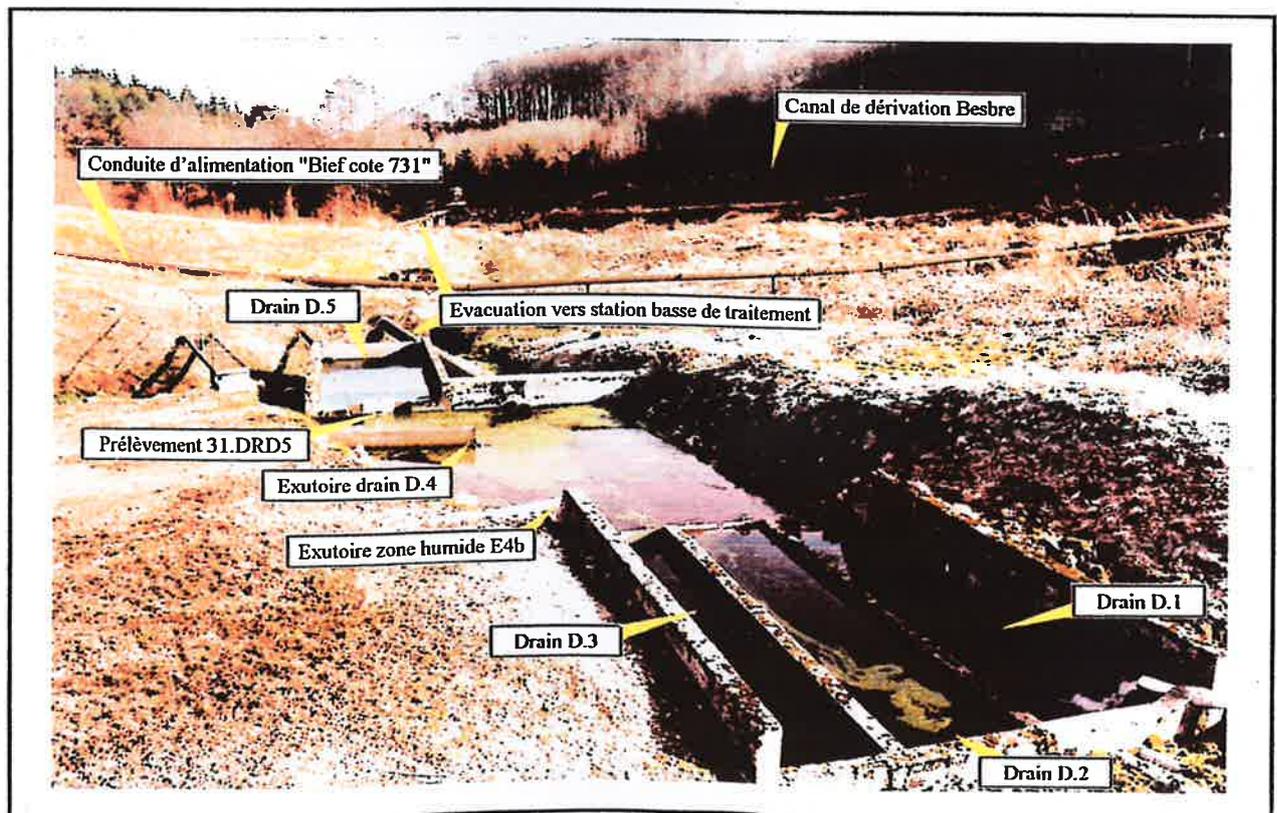
COORDONNEES SYSTEME LAMBERT II
ALTITUDES NGF-IGN 69
REF : FOR48A.000

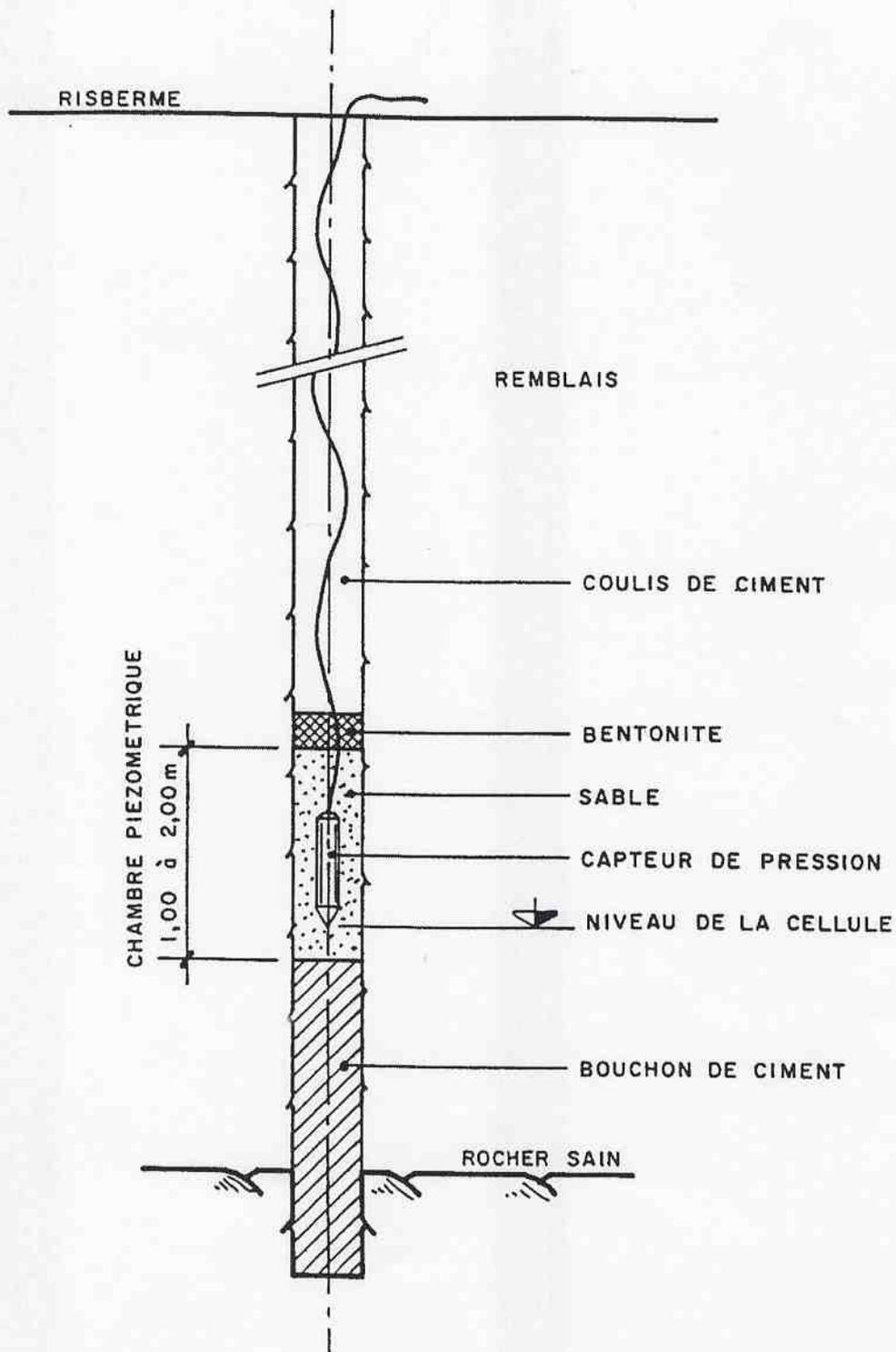




PLAN DE SITUATION DES
NOUVEAUX DEVERSOIRS DE JAUGEAGE(1.1-1.2-1.3)







BOIS NOIRS LIMOUZAT

SCHEMA DE MISE EN PLACE D'UNE
CELLULE PIEZOMETRIQUE DANS
LA DIGUE