

**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](http://www.tractebel-engineering-gdfsuez.com)

---

# **AREVA**

## **Evaluation de la sûreté à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères**

### **Digue des Bois Noir**

### **Analyse de stabilité**

### **P.005961.NT06**

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>CONTEXTE DE L'ETUDE</b> .....	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>PRESENTATION OUVRAGE</b> .....	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>ETUDES PRECEDENTES (2011)</b> .....	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUE – DONNEES D'ENTREE</b> .....	<b>10</b>
4.1.	ANALYSE DES RECONNAISSANCES COMPLEMENTAIRES .....	12
4.2.	LIQUEFACTION .....	13
4.2.1.	<i>Prescription de l'Eurocode 8</i> .....	13
4.2.2.	<i>Sensibilité des sols à la liquéfaction – Critère granulométrique (Règles de construction parasismique dites Règles PS 92)</i> .....	14
4.2.3.	<i>Cas de la digue des Bois Noirs</i> .....	14
<b>5.</b>	<b>ANALYSE DE STABILITE - METHODOLOGIE</b> .....	<b>16</b>
5.1.	GENERAL .....	16
5.2.	LOGICIEL UTILISE .....	17
5.3.	HYPOTHESES DE GLISSEMENT .....	18
5.4.	COEFFICIENTS DE SECURITE .....	19
5.5.	CAS DE CHARGES .....	19
5.6.	DEFINITION DE L'ALEA SISMIQUE .....	20
5.7.	RISQUE HYDROLOGIQUE .....	22
5.8.	GEOMETRIE DES PROFILS MODELISES .....	22
<b>6.</b>	<b>RESULTATS DE L'ANALYSE DE STABILITE</b> .....	<b>23</b>
6.1.	ANALYSE DES RESULTATS .....	23
<b>7.</b>	<b>ETUDE DE SENSIBILITE AU SEISME</b> .....	<b>23</b>
7.1.	DEFINITION DE LA SOLLICITATION SISMIQUE RENFORCEE .....	23
7.2.	LIQUEFACTION .....	24
7.3.	AUTRES HYPOTHESE .....	24
7.4.	RESULTATS .....	25
<b>8.</b>	<b>PROJET D'ARRASEMENT DUBARRAGE DES BOIS NOIRS</b> .....	<b>27</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>27</b>
	ANNEXE 1 : PROJET D'ARASEMENT DE LA CRETE DE L'OUVRAGE DES BOIS NOIRS .....	28
	ANNEXE 2 : VUE EN PLAN DE L'OUVRAGE .....	31
	ANNEXE 3 : CERCLES DE RUPTURE – TALREN 4 .....	32
	ANNEXE 4 : LIQUEFACTION - FEUILLES DE CALCUL .....	33

## 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 (PNGMDR 3) 2013-2015. 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 sûreté 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.

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. Cet ouvrage est le seul ayant une charge d'eau permanente à l'amont. Il fait actuellement l'objet d'une procédure qui s'inscrit dans le cadre du décret 1735 du 11/12/2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques. Cette procédure nécessite de compléter le dossier géotechnique de l'ouvrage.

## 2. PRESENTATION OUVRAGE

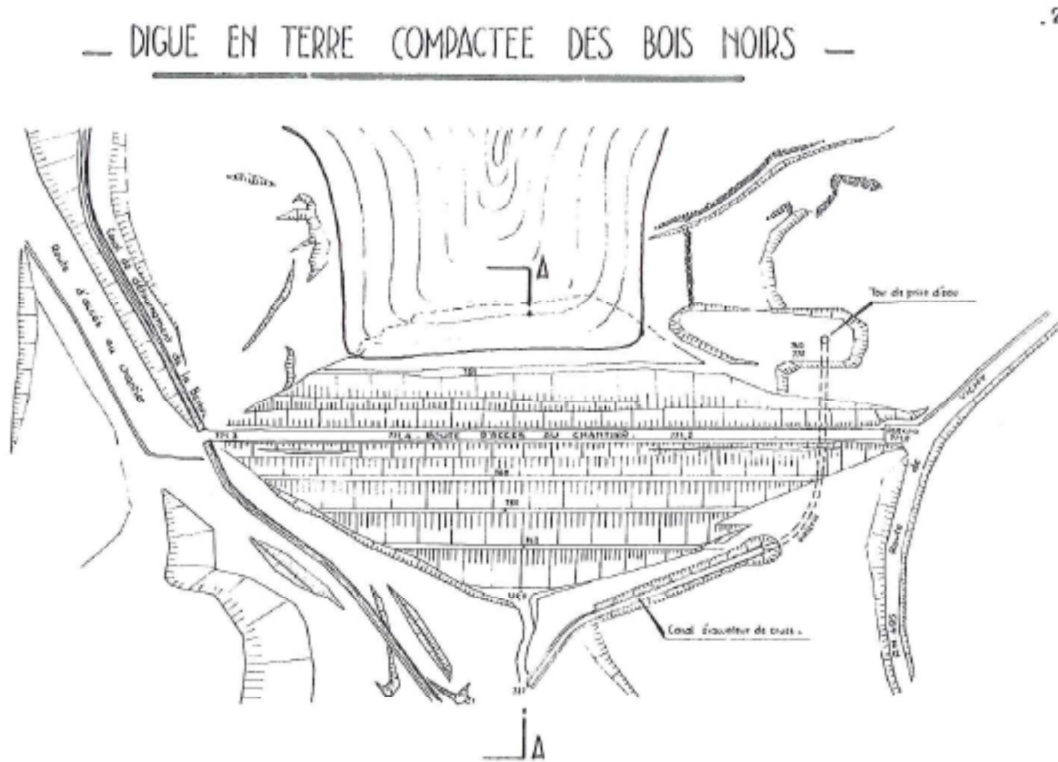


Figure 1 : Vue en plan de la digue des Bois Noirs (aussi digue du Forez)

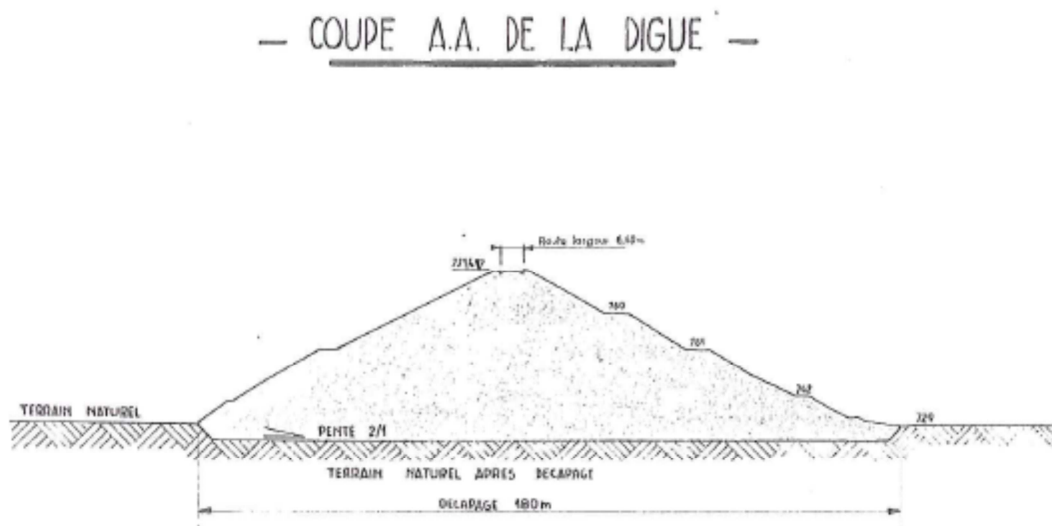


Figure 2 : Coupe type de la digue du Forez

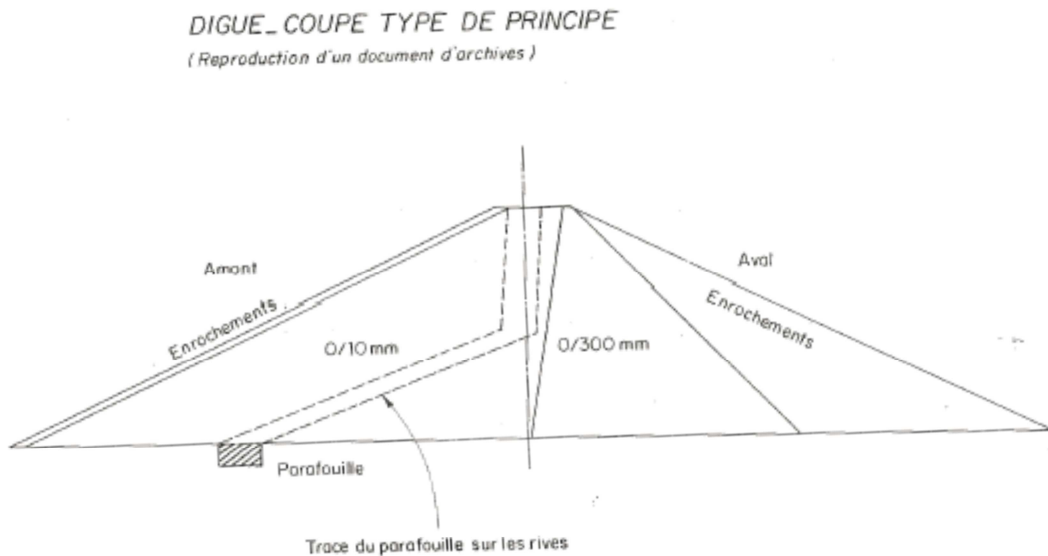


Figure 3 : Coupe type de la digue du Forez avec zonage des matériaux

Le bassin de stockage, d'une longueur de 508 m, contient 1,3 millions de tonnes de résidus.

**Géométrie de la digue :**

Hauteur maximale de la digue de 42 m

Pente aval :  $26^\circ$  - 2H/1V avec risbermes

Pente amont :  $30^\circ$  - 1,8H/1V

Largeur en crête de 10,5 m

Linéaire d'environ 500 m.

**Matériaux de la digue :**

Les matériaux constitutifs de la digue sont de la terre végétale et des roches stériles provenant de la Mine à Ciel Ouvert (MCO).

D'après le rapport LEROY, la digue est constituée d'une même terre répartie à travers toute la section du barrage. Les matériaux ont été disposés en fonction de leurs granulométries comme le montre la Figure 3.

**Caractéristiques particulières :**

La digue est fondée directement sur le substratum rocheux (arène, gore et granite).

Les résidus sont stockés sous une lame d'eau.

La mise en place des matériaux a été réalisée par couches successives d'épaisseur 30 cm. compactées au compacteur chargé à 40 tonnes. Lors de la construction plus de 500 indices de compactage (Rapport entre les densités des échantillons et de l'optimum Proctor) ont été relevés, plus de 90% des valeurs de cet indice sont comprises entre 0,96 et 1,02, ce qui sous-entend que la mise en place des matériaux a été réalisée dans les règles de l'art.

### Hydraulique

Le site du Forez dispose de 30 piézomètres permettant d'avoir une bonne vision des niveaux d'eau dans l'ouvrage.

L'étude hydrologique réalisée en 1983 par Coyne et Bellier définit l'hydrogramme de la crue de projet (période de retour 5000 ans). Elle mène à un débit de pointe de 90 m<sup>3</sup>/s (sous hypothèse pessimiste) et 50 m<sup>3</sup>/s (sous hypothèse moyenne), en prenant en compte le bassin versant de la Besbre, de Bellechasse et de la rive droite.

Une nouvelle étude intitulée «Etude des crues rares au droit du barrage des Bois Noirs » a été réalisée par Coyne et Bellier en novembre 2013. La valeur maximale du débit de pointe, pour une période de retour de 5000 ans, obtenue dans cette étude est de 59 m<sup>3</sup>/s (en cohérence avec l'hypothèse pessimiste de l'étude de 1983).

### Principaux éléments géotechniques :

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

Digues du Forez	
Corps des ouvrages	Stériles miniers, bénéficiant d'un compactage documenté
Fondation	Directement sur le substratum rocheux

Tableau 1 : Principaux éléments géotechniques – Digue du Forez

Des reconnaissances géotechniques sur les matériaux de la digue et de sa fondation ont eu lieu en 1959 et 1984. Ces dernières ont permis de préparer l'établissement du dossier de révision spéciale pour le passage au CTPB de 1984.

Ce sont les paramètres, présentés dans le tableau ci-dessous, issus de ces reconnaissances qui ont servi de données d'entrée pour l'étude de stabilité réalisée par Coyne et Bellier en 2011.

Matériaux	Angle de frottement $\varphi'$	Cohésion $c'$	Poids volumique sec	Poids volumique saturé
Remblais	37°	0 kPa	20 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
Fondations	30°	0 kPa	20 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
sables argileux sous l'eau (1)	30°	0 kPa	-	20 kN/m <sup>3</sup>
Argiles sableuses surconsolidées (2a)	16°	11 kPa	-	19.2 kN/m <sup>3</sup>
Argiles sableuses sous-consolidées (2b)	22°	14 kPa	-	19.2 kN/m <sup>3</sup>

Tableau 2 : Caractéristiques géotechniques – Digue du Forez

### 3. ETUDES PRECEDENTES (2011)

Dans le cadre du projet de réaménagement du site des Bois Noirs, AREVA a sollicité TRACTEBEL ENGINEERING SA afin de réaliser une étude de stabilité de l'ouvrage projeté. Cette étude a fait l'objet du rapport Coyne et Bellier réf. P.001171 RP 01 rev. 02 de Novembre 2012.

Trois stades de travaux ont été considérés dans le cadre de l'étude de stabilité:

- assèchement de la retenue ;
- mise en œuvre de la couverture en remblais ;
- arasement de la digue au niveau de la couverture.

La stabilité des remblais a été étudiée suivant trois profils (le profil 1 en rive droite, le profil 2 au centre et le profil 3 en rive gauche présentant une géométrie et des conditions piézométriques différentes), en prenant en compte les surcharges « poids lourd » (dans le cadre du réaménagement de la digue, en phase de chantier et de maintenance), le séisme, pour divers modes de fonctionnement dont les fonctionnements dégradés suivants :

- crue de la Besbre supérieure à la crue de dimensionnement du lit de dérivation en rive gauche ;
- défaut de drainage de la cuvette ;
- défaut d'abaissement de la nappe dans les résidus de traitement des minerais actuellement sous l'eau ;
- défaut de drainage dans les remblais de la digue.

Les paramètres mécaniques des matériaux constitutifs du barrage et de sa fondation ont été extraits du Dossier à soumettre au Comité Technique Permanent des Barrages (CTPB) d'Avril 1981, document afférent de référence.

En ligne avec les hypothèses du document de Révision Spéciale, l'étude de Coyne et Bellier considère un ouvrage de constitution homogène, à savoir des arènes granitiques, dont les paramètres mécaniques considérés sont [Angle de frottement : 37° ; Cohésion : 0 kPa]. Il n'est pas tenu compte du zonage supposé de la digue selon des fuseaux granulométriques, à savoir un matériau 0/10 mm en amont, un matériau 0/300 mm au centre et des enrochements sur le talus aval, comme il est indiqué dans les archives du barrage.

En outre, le modèle numérique de l'étude Coyne et Bellier considère une couche de fondation meuble couvrant le substratum ; la présence de cette couche de fondation étant identifiée dans les documents de référence selon des reconnaissances antérieures à la construction qui situaient le substratum :

- dans le fond de vallée, à 3 à 4 mètres de profondeur, surmonté de sables et galets et dans la partie superficielle de terre argileuse et tourbeuse ;
- en rives, de l'ordre de 10 mètres de profondeur, sous une couche altérée (arène et gore) similaire à celle du fond de vallée.

L'étude de Coyne et Bellier met en lumière un défaut de stabilité de l'ouvrage sous sollicitation sismique en fonctionnement normal et en fonctionnement dégradé, dans sa configuration après reclassement, c'est-à-dire digue arasée et lame d'eau substituée par une couverture de remblais (8 cas sur 60 configurations testées). En clair, ces défauts de stabilité se traduisent par un glissement du parement aval, la surface de glissement étant circulaire, interceptant ou non la fondation du barrage. Pour ces cas de calculs critiques, le coefficient de sécurité cible de 1 n'est pas atteint, le coefficient obtenu est de 0,86.

Ainsi, les cas de charges suivants ont été désignés comme de nature à déstabiliser l'ouvrage.

- Profils 1 et 2, sous séisme en fonctionnement normal, présentant respectivement des coefficients de sécurité de 0,87 et 0,89 ;
- Profils 1 et 2, sous séisme en fonctionnement dégradé, présentant respectivement des coefficients de sécurité de 0,86 et 0,89.

Les observations et compléments sont à signaler :

- le séisme considéré possède une période de retour de 475 ans, conformément aux règlements de l'Eurocode 8 ;
- le profil 3 est stable en toute circonstance vis-à-vis du risque de glissement global. Les cercles de glissement critiques interceptent la fondation du barrage, modélisée dans l'étude Coyne et Bellier, qui a retenu des paramètres mécaniques faibles : Angle de frottement : 30° ;
- Cohésion : 0 kPa, conformément aux documents de la révision spéciale.
- Ces valeurs ne tiennent pas compte du décapage préalable éventuel lors de la construction du barrage, dont la réalisation sur l'ensemble de l'assise du barrage n'est pas avérée mais dont la prise en compte est bénéfique sur les propriétés mécaniques de la fondation.

Le rapport de l'Ingénieur LEROY « Construction d'une digue en terre compactée dans la vallée de la Besbre », indique que ce décapage des terrains meubles superficielles (terre argileuse et tourbeuse) aurait été réalisé jusqu'à la couche altérée, conservée comme dispositif filtrant naturel, préalablement à l'érection des remblais. Par sécurité, les hypothèses de la révision spéciale ont été conservées dans l'étude Coyne et Bellier et n'ont pas été nuancées par les écrits de ce rapport.

Ainsi, l'étude de stabilité de l'ouvrage de Coyne et Bellier est basée sur des hypothèses d'ensemble conservatives dont les résultats n'ont pas de caractère définitif. Cette étude pointe un besoin de caractérisation de la nature de l'ouvrage afin d'approfondir les études de stabilité de l'ouvrage, autant sur les paramètres du calcul (prise en compte d'un zonage dans la digue) que sur les critères mécaniques des matériaux.

WSP (ex Génivar), dans son étude réf. 2013-23 : « Stabilité de la digue après arasement » démontre la stabilité sous séisme du barrage après reclassement, avec des marges de sécurité importantes, pour des hypothèses de calculs plus favorables que celles retenues dans l'étude Coyne et Bellier justifiées par la différenciation des remblais et la prise en compte d'une fondation rocheuse.

Les résultats différents des deux études témoignent de la sensibilité des résultats du calcul aux hypothèses retenues et imposent ainsi de réaliser des investigations complémentaires permettant de :

- Vérifier l'existence d'un zonage du barrage, et la géométrie de ce zonage,



- Caractériser les matériaux constitutifs du barrage dans les différentes zones de l'ouvrage,
- Définir l'implantation des arènes altérées de la fondation purgée de leur couverture meuble préalablement à la construction, et les caractériser.

**Dans le cadre du PNGMDR, une campagne d'investigations géotechniques a été réalisée permettant de statuer sur ces hypothèses et les résultats sont présentés dans la suite du présent livrable.**

## 4. IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUE – DONNEES D'ENTREE

Les documents suivants font état des données d'entrée déjà disponibles concernant la constitution de la digue des Bois Noirs :

- [1] Dossier à soumettre au Comité Technique Permanent des Barrages – *COYNE ET BELLIER* – Avril 1985;
- [2] Etude géotechnique du projet de réaménagement du stockage de résidus de traitement de minerais d'Uranium du site des Bois Noirs Limouzat, - *GINGER CEBTP* - Mars 2011 ;

A cela s'ajoute une campagne de reconnaissance géotechnique, réalisée en Octobre /Novembre 2014 :

- [3] Diagnostic Géotechnique – Rapport n° YL14 0008 – Saint Priest La Prugne(42) – *ALTHEA* – Novembre 2014.

Cette campagne a pour but de compléter la connaissance de l'ouvrage et de renseigner les éléments nécessaires à la constitution du dossier géotechnique de l'ouvrage. Elle permettra notamment de redéfinir les paramètres suivants :

- Propriétés physiques :
  - La granulométrie,
  - La masse volumique,
  - La teneur en eau,
  - Le degré de saturation,
  - L'indice de plasticité,
  - L'indice de consistance,
  - La perméabilité,
- Les propriétés mécaniques et de déformabilité :
  - La cohésion (effective, non consolidée non drainée),
  - L'angle de frottement (effectif, non consolidé non drainé).

## 4.1. Analyse des reconnaissances complémentaires

### Coupe Type :

Les sondages réalisés lors de la campagne de reconnaissance complémentaire mettent en évidence la succession lithologique suivante :

- Des remblais granitique sablo-graveleux avec passages argilo-limoneux et blocs sur de fortes épaisseurs,
- Reposant sur des alluvions sablo-argileux sur 1,5 m d'épaisseur,
- Surmontant un substratum granitique altéré et fracturé. Le granite sain a été reconnu en SP2 à la cote 728 m NGF.

### Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de matériaux sont présentées dans le tableau suivant :

Matériaux	Angle de frottement $\varphi'$	Cohésion $c'$	Poids volumique sec	Poids volumique saturé
Remblais	36°	0 kPa	20 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
Alluvions sablo-argileux	36°	0 kPa	17.3 kN/m <sup>3</sup>	20.5 kN/m <sup>3</sup>

Tableau 3 : Caractéristiques géotechniques – Informations complémentaires

N.B : Deux essais triaxiaux ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans le sondage carotté SC1. Les résultats obtenus n'ont pas été retenus dans le calcul. En effet, l'étude des PV d'essai font apparaitre des défauts de consolidation des échantillons (valeurs de densité des échantillons reconstitués inférieures aux valeurs de densité in-situ). Ces essais ont par ailleurs été réalisés sur une coupure granulométrique (0/5 mm) et non sur l'ensemble du spectre granulométrique rencontré dans le remblai (Dmax de 150 mm d'après les analyses granulométriques réalisés en 1984). Ce qui conduit à une sous-estimation de la valeur de l'angle de frottement. En utilisant des corrélations classiques entre les valeurs de pression limite et d'angle de frottement, on obtient une valeur moyenne d'angle de frottement de 36-37°. Ces valeurs sont cohérentes avec les données d'archives. Les essais menés lors de l'édification du remblai donnaient des valeurs d'angle de frottement de 37 à 45° et les essais complémentaires réalisés en 1984 des valeurs d'angle de frottement comprises entre 38 et 42° (avec une valeur douteuse à 30°).

Il est également à noter que les essais pressiométriques font apparaitre un horizon aux faibles caractéristiques mécaniques entre 0 et 5 m de profondeur en SP1.

Les valeurs des paramètres retenues, après intégration des résultats fournis en ref [3] et des données géotechniques déjà disponibles, sont présentées dans le tableau suivant :

Matériaux	Angle de frottement $\varphi'$	Cohésion $c'$	Poids volumique sec	Poids volumique saturé
Remblais	36°	0 kPa	20 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
Fondations	45°	0 kPa	20 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
Alluvions sablo-argileux	36°	0 kPa	17.3 kN/m <sup>3</sup>	20.5 kN/m <sup>3</sup>
sables argileux sous l'eau (1)	30°	0 kPa	-	20 kN/m <sup>3</sup>
Argiles sableuses surconsolidées (2a)	16°	11 kPa	-	19.2 kN/m <sup>3</sup>
Argiles sableuses sous-consolidées (2b)	22°	14 kPa	-	19.2 kN/m <sup>3</sup>

Tableau 4 : Caractéristiques géotechniques revues – Bois Noirs

Les observations suivantes sont à relever :

- **Les données géotechniques supplémentaires confirment l'absence de cohésion dans les matériaux constitutifs de la digue (parement aval et sous la crête) ;**
- Le zonage, présenté en Figure 4, n'est pas repéré par la campagne topographique (d'après les plans SP1, en milieu de crête, devrait rencontrer la zone 0/10 mm mais aucune différence notable n'est observé avec SP3) ;
- L'angle de frottement a été très légèrement diminué (de 37° à 36°) ;
- **Un horizon granitique a été défini à 44.9 m sous le niveau de la crête du barrage (pour le profil étudié).**
- Les résultats de l'étude « Coyne et Bellier réf. P.001171 RP 01 rev. 02 de Novembre 2012 » restent cohérents.
- La présence de l'horizon granite (non certifié jusque là), permet de rehausser les caractéristiques de la fondation (angle de frottement interne de 45°).

## 4.2. Liquéfaction

### 4.2.1. Prescription de l'Eurocode 8

L'Eurocode 8 exige une évaluation de la sensibilité des sols à la liquéfaction lorsque le sol de fondation comporte « des couches étendues ou des lentilles épaisses » de sables lâches saturés à faible profondeur.

Il est possible de négliger le risque de liquéfaction lorsque :

- Pour les ouvrages sur fondations superficielles, les couches sableuses sont situées à plus de 15 m de profondeur.
- $\alpha \cdot S < 0,15$  et si l'une des conditions suivantes au moins est vérifiée :
  - les sables contiennent de l'argile en proportion supérieure à 20% avec un indice de plasticité  $I_p > 10$ ,
  - les sables contiennent plus de 35% de silts et le nombre de coups STP normalisé  $N_{1(60)}$  est supérieur à 20,

- les sables sont propres et le nombre de coups STP normalisé  $N_{1(60)}$  est supérieur à 30.

Si le risque de liquéfaction ne peut pas être écarté, il est nécessaire de calculer le facteur de sécurité :

$$F_S = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot CM$$

Avec :

- CM : Coefficient de correction de la magnitude (Magnitude Scaling Factor).
- CRR7.5 : Taux de résistance cyclique correspondant à un séisme de magnitude Mw 7.5.
- CSR : Taux de cisaillement cyclique (Cyclic Stress Ratio).

#### 4.2.2. Sensibilité des sols à la liquéfaction – Critère granulométrique (Règles de construction parasismique dites Règles PS 92)

Cette vérification est effectuée à partir des règles PS92 qui sont plus précises que celles des Eurocodes vis-à-vis des critères granulométriques.

La sensibilité des sols à la liquéfaction est fonction de leur granulométrie. Les règles PS 92 identifient comme « suspects » (i.e. susceptibles de se liquéfier) :

- Les sables, sables vasards et silts présentant les caractéristiques suivantes :
  - Degré de saturation  $S_r$  voisin de 100%
  - Granulométrie assez uniforme correspondant à un coefficient d'uniformité  $C_u$  inférieur à 15 :
 
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$$
  - Diamètre à 50%,  $D_{50}$  compris entre à 0.05mm et 1.5mm.
- Les sols argileux présentant les caractéristiques suivantes :
  - Diamètre à 15%,  $D_{15}$  supérieur à 0.005mm,
  - Limite de liquidité  $w_L$  inférieure à 35%,
  - Teneur en eau  $w$  supérieure à 0.9  $w_L$ ,
  - Point représentatif sur le diagramme de plasticité se situant au-dessus de la droite « A » dudit diagramme si données disponibles.

Peuvent être considérés comme exempts de risque, les sols tels que :

- La granulométrie présente un diamètre à 10%,  $D_{10}$  supérieur à 2 mm ;
- La granulométrie présente un diamètre à 70%,  $D_{70} < 74 \mu\text{m}$  et l'indice de plasticité  $I_p > 10 \%$ .

#### 4.2.3. Cas de la digue des Bois Noirs

##### 4.2.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Les sollicitations sismiques à considérer (séisme de période de retour de 3 000 ans) interdisent de négliger le risque de liquéfaction. En effet,  $\alpha \cdot S = 0.195 > 0.15$ .

Au cours de la campagne de reconnaissance complémentaire, 5 échantillons ont été prélevés en SC1. Sans être exempts de risque, les sols constitutifs de la digue ne sont pas « suspects » et présentent une granulométrie étalée et/ou un D50 supérieur à 1.5 mm. L'échantillon prélevé dans les alluvions sablo-argileux (plus fins) présente également une granulométrie étalée et une teneur en eau suffisamment faible (très inférieur à 0.9 wL) pour ne pas être qualifié de « suspect ».

A partir des critères granulométriques, la liquéfaction peut donc être exclue.

#### 4.2.3.2. FACTEUR DE SECURITE VIS-A-VIS DE LA LIQUEFACTION

Conformément à l'Eurocode 8 et afin de compléter les résultats de l'analyse granulométrique, les facteurs de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction ont été calculés en exploitant les résultats des essais pressiométriques. La corrélation (valable pour les sables) suivante a été utilisée :

$$N_{SPT} = 30 \cdot p_l^*$$

Dans les calculs, une magnitude Ms 7.5 a été considérée. Pour mémoire, le séisme historique maximal observé sur le territoire métropolitain a une magnitude de M6.2 (séisme de Lambesc) et les magnitudes estimées de paléoséismes sur le système de faille de la Durance atteignent M6.5.

Les résultats obtenus sont présentés en **Annexes 4**.

A l'Eurocode 8, un coefficient de sécurité de 1.25 est recherché. Les calculs font apparaître localement des horizons potentiellement liquéfiables.

Les analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés lors de la campagne de reconnaissance complémentaire montrent que la fraction fine (particules de taille inférieure à 5 microns) est comprise entre 2 et 7 % dans le remblai avec une moyenne à 4.4 %. La fraction fine moyenne est inférieure à 5%. Le calcul est donc réalisé avec la courbe du CRR<sub>7.5</sub> correspondant à des sables propres. Dans le calcul, la fraction fine considérée est donc nulle. En pratique, les fines présentes, même en faible quantité dans les sols, participent à réduire le risque de liquéfaction.

Par ailleurs, la procédure de calcul n'intègre pas les caractéristiques granulométriques (critères granulométriques présentés ci-dessus) des sols considérés. En combinant les deux approches, il apparaît donc que **le risque de liquéfaction est négligeable**.

## 5. ANALYSE DE STABILITE - METHODOLOGIE

### 5.1. Général

L'analyse de stabilité est effectuée en découpant le massif par tranches et en regardant son équilibre statique sur une surface de rupture potentielle. Cette méthode dite « méthode des tranches » a plusieurs approches (Fellenious, Bishop, Janbu, Spencer) qui diffèrent dans l'hypothèse faite sur les forces agissant entre les tranches et les équations d'équilibre à résoudre.

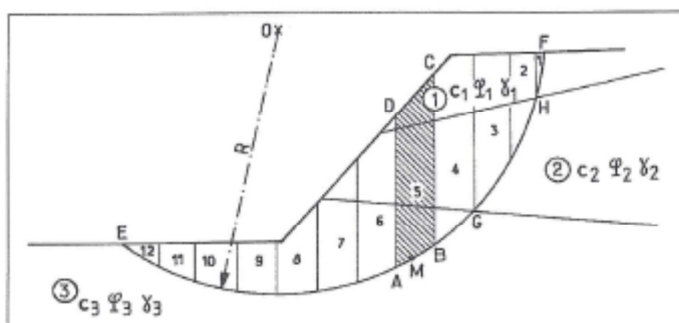


Figure 4 : Découpage en tranches d'un talus

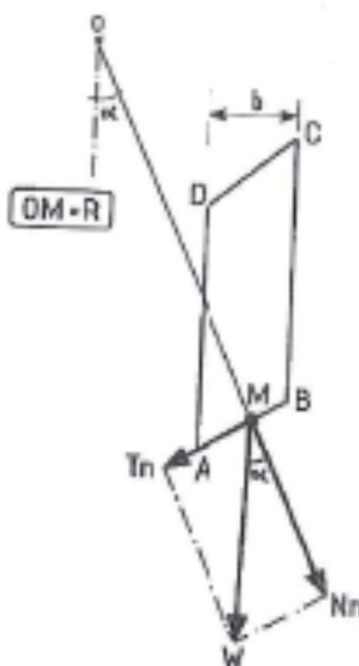


Figure 5 : Forces agissant sur une tranche

La condition d'état-limite s'écrit sous la forme d'une équation dans laquelle sont comparés, d'une part un rapport des forces résistantes (ou de leur moment) sur les forces motrices (ou de leur moment), d'autre part le coefficient de modèle. L'expression mathématique de la condition d'état-limite dépend du modèle d'état-limite adopté ; elle fait intervenir les valeurs caractéristiques des propriétés de résistance et les valeurs représentatives des actions correspondant à la situation de projet examinée. A titre d'exemple pour un sol homogène, la condition d'état-limite peut s'écrire (de façon simplifiée) :

$$F_S = \frac{\sum \text{des moments résistants maximaux}}{\sum \text{des moments moteurs}}$$

Soit

$$F_S = \frac{c \cdot L + \tan \varphi \sum N_n}{\sum T_n}$$

Avec  $c$  la cohésion,  $\varphi$  l'angle de frottement interne du matériau et  $L$  la longueur développée de la surface de rupture.

Dans le cas présent la méthode appliquée est dite de Bishop.

Les effets sismiques sont analysés par une approche pseudo-statique.

## 5.2. Logiciel utilisé

Les calculs de stabilité interne des digues seront effectués soit à l'aide du logiciel TALREN 4 (de la société TERRASOL) par la méthode de Bishop pour des surfaces de glissements circulaires.

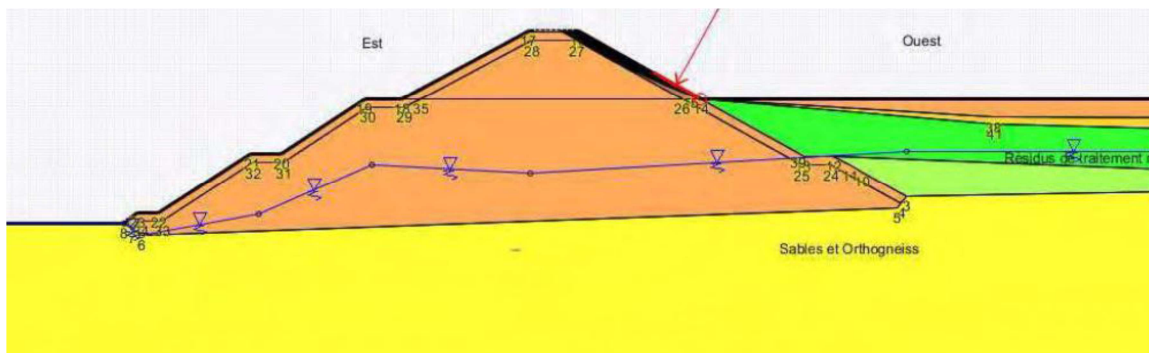


Figure 6 : Modèle de la digue des Bois Noirs sous TALREN

Les coefficients de sécurité sont calculés en considérant un fonctionnement normal puis dégradé de l'aménagement. Les coefficients de sécurité sont définis comme le rapport de la somme des moments résistants maximaux sur la somme des moments moteurs.



### 5.3. Hypothèses de glissement

La présente étude comporte l'analyse du facteur de sécurité vis-à-vis du glissement pour les différents types de mécanismes, on étudie principalement les différents cas précisés ci-après :

1. Une surface de rupture **circulaire** se développant à l'intérieur de la digue ; dans cette catégorie on pourrait trouver des cercles de glissement « **de peau** » qui présentent des facteurs de sécurité particulièrement bas. Ces cercles sont peu profonds (moins d'un mètre). Le deuxième type, dit « **local** », correspondra aux cercles de glissement émergeant sous les 2/3 de la hauteur de la digue.
2. Une surface de rupture **composite** dont une des composantes est la couche mince se trouvant à la base de la digue. Cette hypothèse a été retenue compte tenu de la présence d'une couche mince à faible résistance sur laquelle la digue peut avoir été construite. Ce mécanisme de rupture est aussi « **local** » puisqu'il se développe principalement à l'intérieur de la digue et ne traverse pas la couche des arènes granitiques.
3. La troisième hypothèse de glissement représente un mécanisme de rupture « **global** » dont la surface se développe à l'intérieur des couches de fondation de la digue.

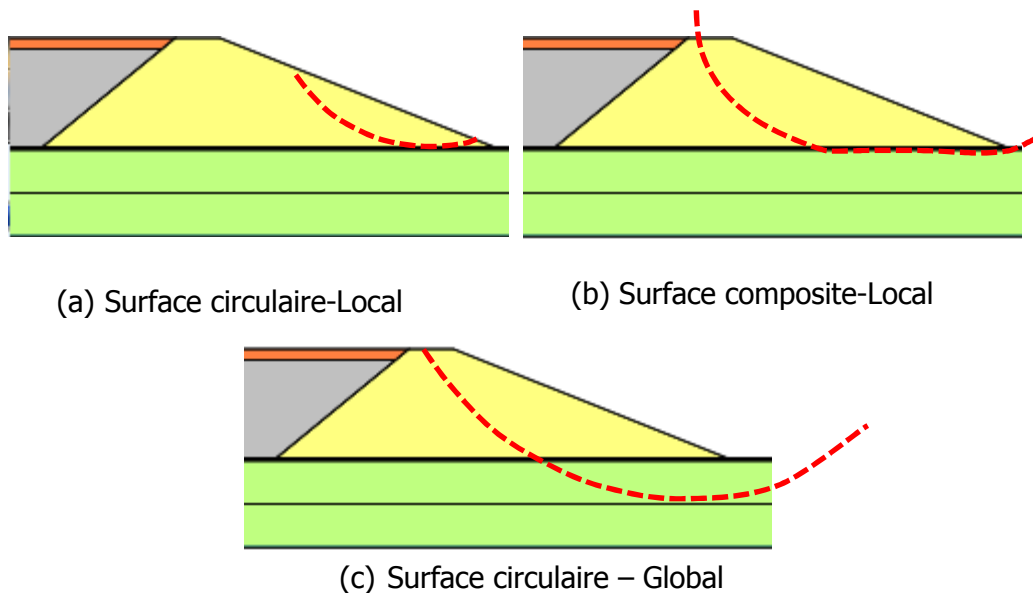


Figure 7 : Typologie de surface de glissement

## 5.4. Coefficients de sécurité

En accord avec les recommandations du Comité Français des Barrages Réservoir (CFBR) et les recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en Remblais, éditée en Novembre 2010, les coefficients partiels et de modèle à considérer sont les suivants :

Situation...	Coefficient partiel $\gamma_m$ sur $c'$ et $\tan \phi'$	Coefficient partiel $\gamma_m$ sur le poids volumique	Coefficient de modèle $\gamma_d$
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrême de crue	1	1	1,1
accidentelle	1	1	1,1

Tableau 5 : Coefficients partiels et de modèle – ELU stabilité d'ensemble (glissement).

Dans le cas du séisme (situation accidentelle), il a été retenu en accord avec l'ASN **de rehausser de 1.1 à 1,2 le facteur de sécurité global** pour juger de la tenue à long terme des digues dans le cas des sollicitations extrêmes.

## 5.5. Cas de charges

Dans le cas de l'ouvrage des Bois Noirs, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans le rapport « Coyne et Bellier réf. P.001171 RP 01 rev. 02 de Novembre 2012 », seul le cas de charge du séisme reste à étudier à la vue de la démarche proposée ci-avant. Ainsi seul le cas de charge suivant est considéré dans le présent rapport :

- Séisme avec régime hydraulique courant.

Les résultats de ce rapport sont repris ci-après :

### Paragraphe 5 : Résultat des calculs de stabilité

COEFFICIENT DE STABILITE	GLISSEMENT		Valeurs minimales	
	LOCAL ( $F > 1,3$ statique $F > 1$ séisme)	GLOBAL ( $F > 1,5$ statique $F > 1$ séisme)	LOCAL	GLOBAL
<b>SURCHARGES ROUTIERES AVANT REAMENAGEMENT</b>				
Stabilité du parement amont :	Profil 1	1,34	1,33	1,61
	Profil 2	1,36		
	Profil 3	1,33		
Stabilité du parement aval :	Profil 1	1,39	1,39	1,51
	Profil 2	1,39		
	Profil 3	1,45		
<b>PHASE 1 : ASSECHEMENT DE LA RETENUE - STABILITE DU PAREMENT AMONT</b>				
à demi-charge :	Profil 1	1,35	1,31	1,59
	Profil 2	1,36		
	Profil 3	1,31		
à retenue vide :	Profil 1	1,35	1,31	1,67
	Profil 2	1,36		
	Profil 3	1,31		

<b>PHASE 2 : REMBLAIEMENT DE LA CUVETTE - STABILITE DU PAREMENT AVAL</b>			
en fonctionnement normal :	Profil 1	1,4	1,53
	Profil 2	1,41	1,73
	Profil 3	1,46	1,55
en régime dégradé :	Profil 1	1,42	1,52
	Profil 2	1,39	1,62
	Profil 3	1,46	1,55
<b>PHASE 3 : ARASEMENT DE LA DIGUE - STABILITE DU PAREMENT AVAL</b>			
en fonctionnement normal :	Profil 1	1,43	1,57
	Profil 2	1,39	1,75
	Profil 3	1,77	1,55
en régime dégradé :	Profil 1	1,43	1,57
	Profil 2	1,40	1,62
	Profil 3	1,80	1,57
sous séisme en fonctionnement normal (F>1) :	Profil 1	0,87	0,96
	Profil 2	0,89	1,11
	Profil 3	1,11	0,94
sous séisme en régime dégradé (F>1) :	Profil 1	0,86	0,97
	Profil 2	0,89	1,04
	Profil 3	1,12	0,94
<b>SURCHARGES ROUTIERE APRES REAMENAGEMENT</b>			
Stabilité du parement aval :	Profil 1	1,43	1,57
	Profil 2	1,39	1,62
	Profil 3	1,71	1,55

1,40	1,53
1,39	1,52

1,39	1,55
1,40	1,57
0,87	0,96
0,86	0,97

1,39	1,55
------	------

**Légende des couleurs :**

	Coefficient de sécurité supérieur ou égale au critère de projet
	Coefficient de sécurité inférieur au critère de projet

**Paragraphe 6 : Conclusion**

L'étude de stabilité de la digue des Bois Noirs permet de tirer les conclusions suivantes :

- Conditions statiques : aux glissements local et global, la stabilité de la digue est assurée avec des coefficients supérieurs aux critères de projet ;
- Au séisme : la stabilité de la digue n'est assurée, aux glissements local et global, que dans un tiers des cas considérés.

**5.6. Définition de l'aléa sismique**

Dans le cas où le risque de liquéfaction est jugé nul, il a été proposé de retenir dans un premier temps des niveaux d'accélération correspondants à une période de retour de 3 000 ans (ouvrages classés SES selon la réglementation sismique en vigueur). Dans la suite de l'étude une étude de sensibilité est réalisé afin d'estimer la sensibilité de l'ouvrage vis-à-vis d'un séisme majoré, correspondant à une période de retour de 30 000 ans.

La définition de la sismicité est donnée par le décret n 2010-1255 du 22 octobre 2010. L'aléa sismique du site des Bois Noirs est classé en zone 2 « faible » selon la carte de l'aléa sismique en vigueur en France.

Les accélérations de calcul applicables aux installations classées existantes sont les suivantes :

<b>ZONE DE SISMICITÉ</b>	<b>ACCÉLÉRATION HORIZONTALE DE CALCUL (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>ACCÉLÉRATION VERTICALE DE CALCUL (m/s<sup>2</sup>)</b>
Zone de sismicité 2	1,30	1,17

Tableau 6 : Zone de sismicité – Bois Noirs

Pour un séisme de période de retour 3 000 ans, en référence aux termes des textes réglementaires applicables aux ICPE fixant les règles de construction parasismique, les données prises en compte sont les suivantes ; elles correspondent aux accélérations à fréquence infinie (PGA), pour un sol rocheux en zone de sismicité 2 :

- accélération horizontale de calcul :  $a_g = 1,30 \text{ m/s}^2$
- accélération verticale de calcul :  $a_{vg} = 1.17 \text{ m/s}^2$
- paramètres de sol S :
  - sol de classe A :  $S = 1.0$
  - sol de classe B :  $S = 1.35$
  - **sol de classe C :  $S = 1.5$**
  - sol de classe D :  $S = 1.6$
  - sol de classe E :  $S = 1.8$

L'ouvrage des Bois Noirs peut être défini comme un sol de classe C : *dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.*

Les accélérations sismiques appliquées dans l'analyse pseudo-statique des talus sont déterminées selon l'Eurocode 8, partie 5. Elles sont les suivantes :

- coefficient sismique horizontal :  $\sigma_H = 0,5 \times S \times a_g$
- coefficient sismique vertical :  $\sigma_V = \pm 0,50 \times \sigma_H$  (car  $a_{vg} / a_g \geq 0,6$ )

avec  $g$  (accélération de la pesanteur) =  $10 \text{ m/s}^2$

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

## 5.7. Risque hydrologique

Dans le cas de l'ouvrage des Bois Noirs, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans le rapport « Coyne et Bellier réf. P.001171 RP 01 rev. 02 de Novembre 2012 », seul la sollicitation au séisme est étudiée dans le présent rapport. La sollicitation au séisme est associée à un régime hydraulique en fonctionnement normal.

Les niveaux piézométriques sont déduits des niveaux moyens majorés observés dans les piézomètres de l'ouvrage.

## 5.8. Géométrie des profils modélisés

Trois profils sont étudiés :

- Profil N°1 : Profil mi-hauteur en rive droite ;
- Profil N°2 : Profil de plus grande hauteur ;
- Profil N°3 : Profil de faible hauteur en rive gauche.

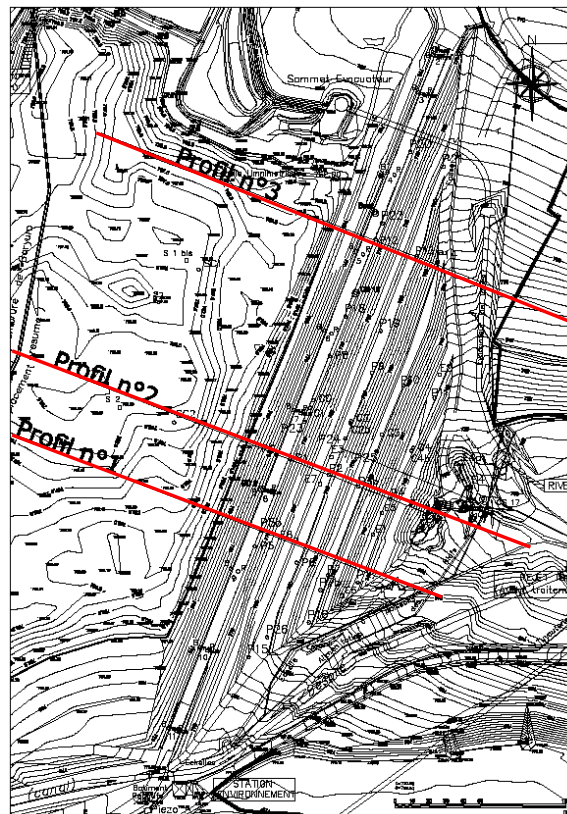


Figure 5 : Localisation des profils modélisés

## 6. RESULTATS DE L'ANALYSE DE STABILITE

### 6.1. Analyse des résultats

Les facteurs de sécurité obtenus après modélisation de l'ouvrage sous sollicitation au séisme sont présentés dans le tableau ci-après :

COEFFICIENT DE STABILITE		GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)	GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)
<b>Séisme – Période de retour 3 000 ans</b>					
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		

Tableau 7 : Résultats – Profils non modifié – Bois Noirs

Les critères de sécurité sont respectés au séisme pour la configuration actuelle de l'ouvrage.

## 7. ETUDE DE SENSIBILITE AU SEISME

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

L'étude du renforcement de la sollicitation sismique est détaillée par un zonage des coefficients de sécurité obtenus selon la zone de rupture de la digue. L'objectif étant de considérer le potentiel de libération des résidus entreposés selon le degré de dégradation subit par la digue.

### 7.1. Définition de la sollicitation sismique renforcée

Pour un séisme de période de retour supérieure à 3 000 ans, en référence aux termes des exigences à retenir pour la stabilité des digues à long terme, il sera procédé à un calcul spécifique qui visera à calculer le facteur de sécurité vérifié en situation accidentelle.

Pour un ouvrage dont la durée de vie serait de 1 000 ans, la période de retour à prendre en compte permettant l'obtention d'un niveau de sécurité comparable à celle d'une ICPE de durée de vie 100 ans est égale à  $1\ 000 \times 3\ 000/100 = 30\ 000$  ans.

En utilisant l'approche de l'Eurocode 8-1, le coefficient d'importance à appliquer sur le spectre d'aléa sismique de référence est déterminé selon la formule suivante :

- $\gamma = (T/T_{ref})^{(1/3)}$
- $\gamma = (30\ 000 / 3\ 000)^{(1/3)} = 2.15$

Les accélérations horizontales et verticales au rocher à fréquence infinie à considérer sont donc égales à :

- $a_{gr} = 2.1 \text{ m/s}^2$ , en zone 2,
- $a_{vr} = 1.05 \text{ m/s}^2$ , en zone 2,

## 7.2. Liquéfaction

Les sollicitations sismiques à considérer (séisme de période de retour de 30 000 ans) interdisent de négliger le risque de liquéfaction. En effet,  $\alpha \cdot S = 0.42 > 0.15$ .

De la même façon que précédemment, les sols constitutifs de la digue ne sont pas « suspects » et présentent une granulométrie étalée et/ou un D50 supérieur à 1.5 mm. A partir des critères granulométriques, la liquéfaction peut donc être exclue.

### Facteur de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction

Dans les calculs, une magnitude Ms 7.5 a été considérée. Pour mémoire, le séisme historique maximal observé sur le territoire métropolitain a une magnitude de M6.2 (séisme de Lambesc) et les magnitudes estimées de paléoséismes sur le système de faille de la Durance atteignent M6.5.

Les résultats obtenus sont présentés en **Annexes 4**.

A l'Eurocode 8, un coefficient de sécurité de 1.25 est recherché. Les calculs font apparaître localement des horizons potentiellement liquéfiables.

Les analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés lors de la campagne de reconnaissance complémentaire montrent que la fraction fine (particules de taille inférieure à 5 microns) est comprise entre 2 et 7 % dans le remblai avec une moyenne à 4.4 %. La fraction fine moyenne est inférieure à 5%. Le calcul est donc réalisé avec la courbe du CRR<sub>7.5</sub> correspondant à des sables propres. Dans le calcul, la fraction fine considérée est donc nulle. En pratique, les fines présentes, même en faible quantité dans les sols, participent à réduire le risque de liquéfaction.

Par ailleurs, la procédure de calcul n'intègre pas les caractéristiques granulométriques (critères granulométriques présentés ci-dessus) des sols considérés. En combinant les deux approches, il apparaît donc que **le risque de liquéfaction est négligeable**.

## 7.3. Autres hypothèses

Les hypothèses hydrauliques et la méthodologie de calcul restent identiques à celles proposées dans les paragraphes précédents.

## 7.4. Résultats

Les résultats obtenus sont présentés ci-après, sous forme de schéma et de tableau.

Le zonage obtenu correspond au facteur de sécurité minimum obtenu pour un cercle de glissement émergent dans la zone désignée.

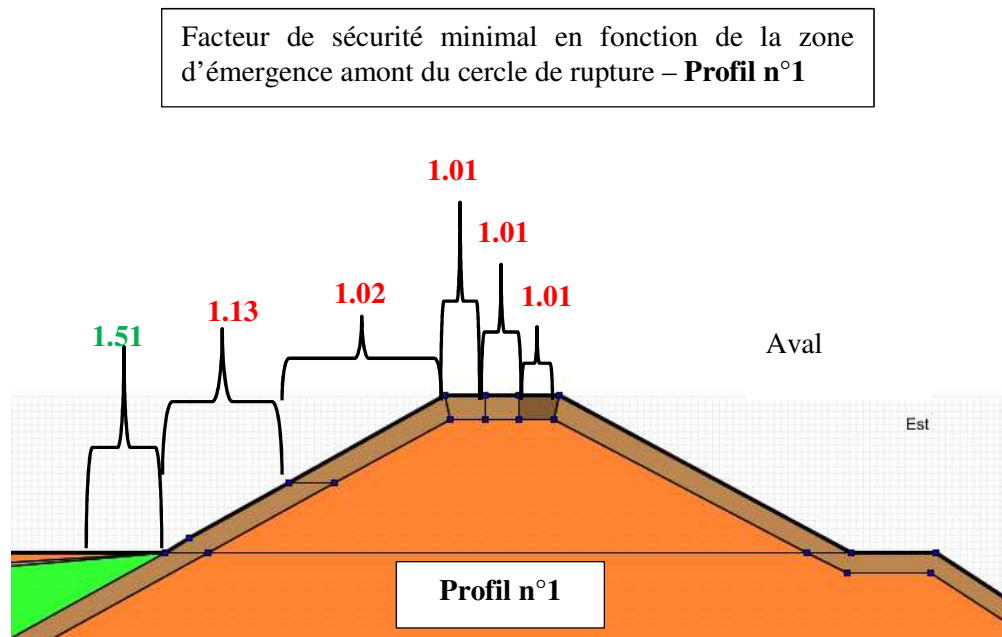


Figure 8 : Etude sensibilité au séisme – Zonage des facteurs de sécurité – P1

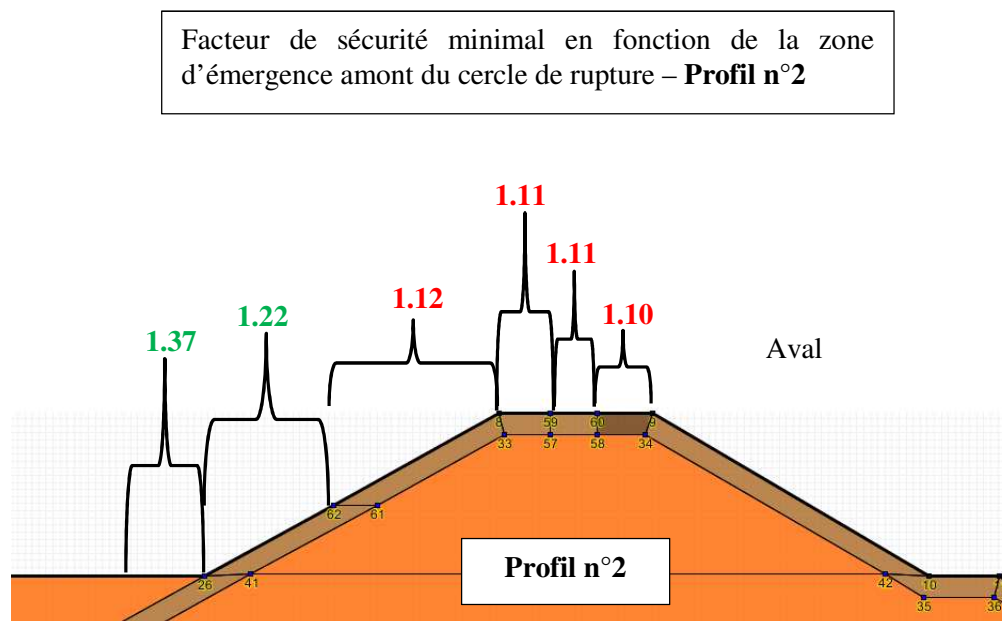


Figure 9 : Etude sensibilité au séisme – Zonage des facteurs de sécurité – P2



Facteur de sécurité minimal en fonction de la zone d'émergence amont du cercle de rupture – Profil n°3

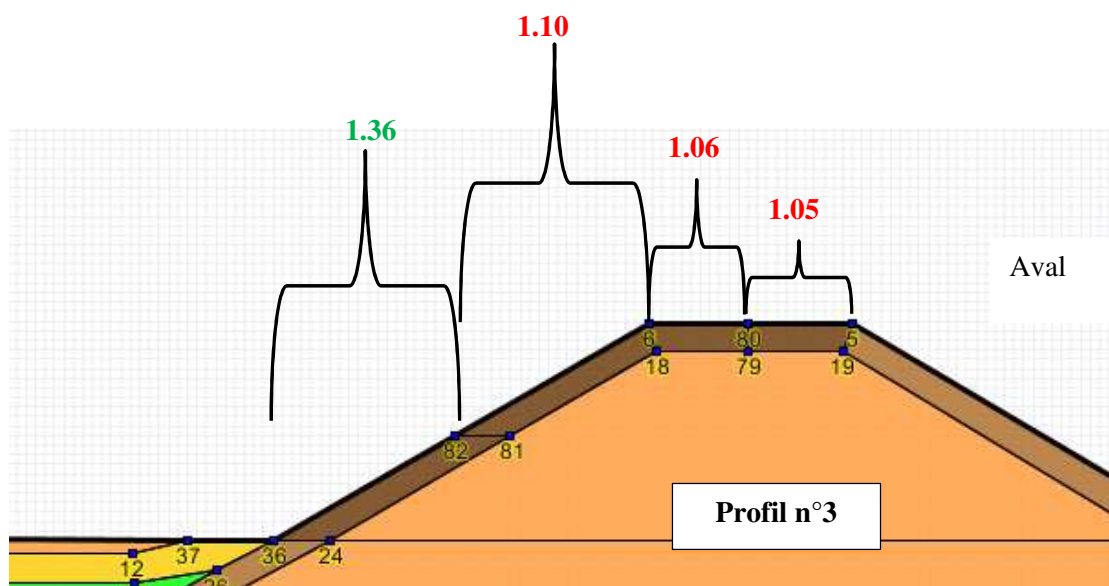


Figure 10 : Etude de sensibilité au séisme – Zonage des facteurs de sécurité – P3

Les résultats sont repris dans le tableau ci-après :

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

Tableau 8 : Résultats – Sensibilité au séisme – Bois Noirs

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).

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.

## 8. PROJET D'ARRASEMENT DUBARRAGE DES BOIS NOIRS

Un projet d'arasement du barrage des Bois Noirs est en cours d'étude par AREVA. Dans le cas où cette configuration serait adoptée, une étude similaire à celle ci-avant a été réalisée.

Les principaux résultats concernant cette configuration sont présentés en **annexe 1**.

## 9. CONCLUSION

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.

## Annexe 1 : Projet d'arasement de la crête de l'ouvrage des Bois Noirs.

Les hypothèses de calcul sont identiques à celle du texte ci-avant.

La géométrie de l'ouvrage modélisé est telle que la crête est arasée au niveau de la plus haute risberme (élévation correspondante à la limite d'entreposage des résidus des mines à ciel ouvert), soit un arasement d'environ 10 mètres.

L'arasement de la digue a pour conséquence une amélioration de la réserve de sécurité, diminuant les efforts moteurs à la déstabilisation des talus et modifiant favorablement la ligne de rupture. Ainsi seul les cas de charge ou la réserve de sécurité n'est pas atteinte sont réétudiés ici, à savoir le cas du séisme.

Seuls les profils P1 et P2 sont étudiés, l'étude du profil P3 de faible hauteur, n'est plus pertinente après arasement.

### 1. Analyse des résultats

Les facteurs de sécurité obtenus après modélisation de l'ouvrage sous sollicitation au séisme sont présentés dans le tableau ci-après :

COEFFICIENT DE STABILITE		GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)	GLOBAL (F>1,2)	LOCAL (F>1,2)
<b>Séisme – Période de retour 3 000 ans</b>					
sous séisme en fonctionnement normal (F>1.2)	Profil 1	1.35	1.40	1.35	1.4
	Profil 2	1.47	1.48		
	Profil 3	Sans Objet	Sans Objet		

Tableau 1 : Résultats – Profils non modifié – Bois Noirs

Les critères de sécurité sont respectés au séisme pour la configuration actuelle de l'ouvrage.

### 2. Etude de sensibilité au séisme

Les résultats obtenus sont présentés ci-après, sous forme de schéma et de tableau.

Le zonage obtenu correspond au facteur de sécurité minimum obtenu pour un cercle de glissement émergent dans la zone désignée.

Facteur de sécurité minimal en fonction de la zone d'émergence amont du cercle de rupture – Profil n°1 arasé

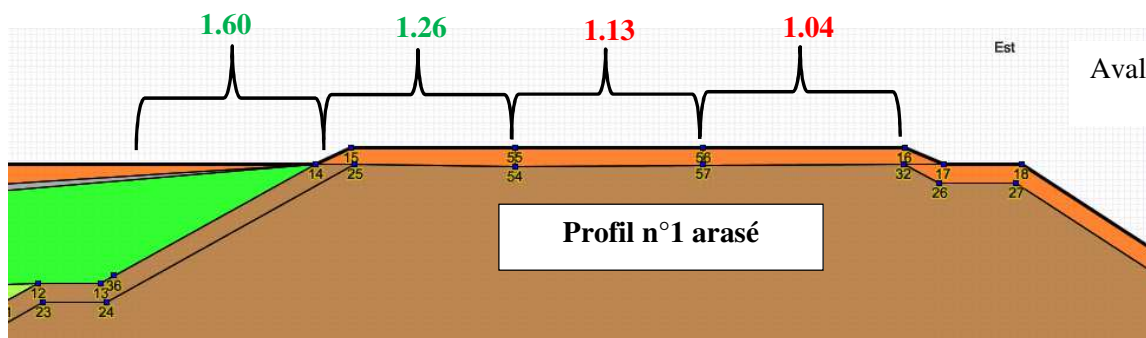


Figure 1 : Etude sensibilité au séisme – Zonage des facteurs de sécurité – P1 arasé

Facteur de sécurité minimal en fonction de la zone d'émergence amont du cercle de rupture – Profil n°2 arasé

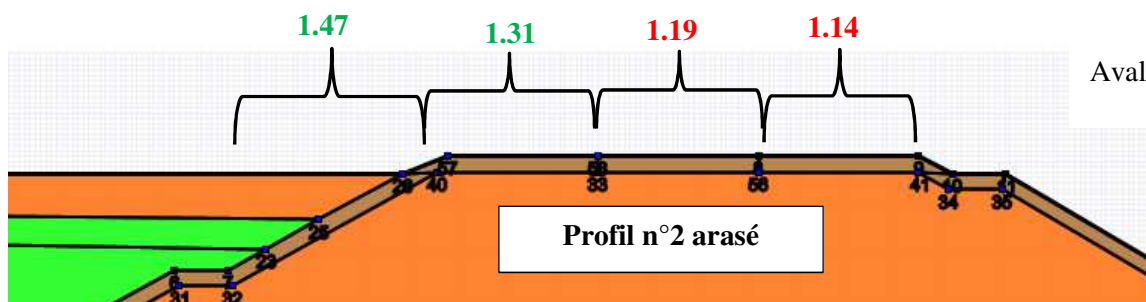


Figure 1 : Etude sensibilité au séisme – Zonage des facteurs de sécurité – P2 arasé

COEFFICIENT DE STABILITE – Séisme 30 000 ans		GLOBAL (F>1,2)
<b>SEISME – Profil n°1</b>	<b>Zone d'émergence des cercles de glissement</b>	<b>Facteur de sécurité</b>
Stabilité du parement aval :	Tiers 1	<b>1.04</b>
	Tiers 2	<b>1.13</b>
	Tiers 3	<b>1.26</b>
	Résidus	<b>1.60</b>
<b>SEISME – Profil n°2</b>		
Stabilité du parement aval :	Tiers 1	<b>1.14</b>
	Tiers 2	<b>1.19</b>
	Tiers 3	<b>1.31</b>
	Résidus	<b>1.47</b>

Tableau 2 : Résultats – Sensibilité au séisme – Bois Noirs

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

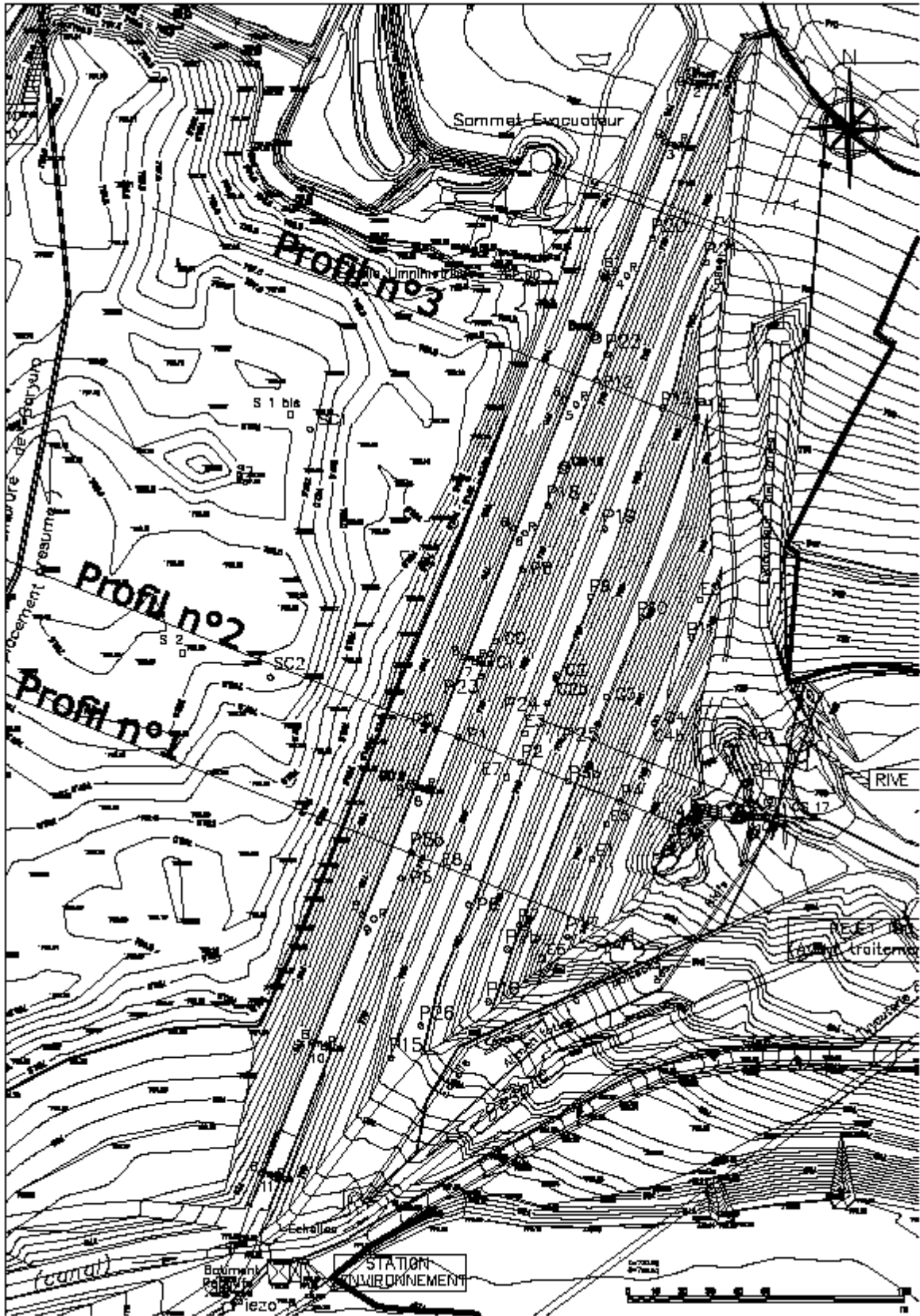
### 3. Conclusion

L'arasement de la digue des Bois Noirs, lorsque la sollicitation sismique considérée est supérieure aux recommandations en vigueur, ne permet d'atteindre la réserve de sécurité souhaitée de 1.2.

La modélisation permet de constater que dans cette configuration, un coefficient de 1.1 est atteint dans la majorité des cas.

De la même façon que pour l'ouvrage actuel, les dégradations restent localisées sur la partie aval de l'ouvrage. Néanmoins, l'arasement de la digue permet d'augmenter significativement la réserve de sécurité vis-à-vis de la stabilité au glissement.

## Annexe 2 : Vue en plan de l'ouvrage



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

## Annexe 3 : Cercles de rupture – TALREN 4

## Annexe 4 : Liquéfaction - Feuilles de calcul