ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Monsieur le Directeur de la direction des déchets, des installations de recherche et du cycle (DRC)

Fontenay-aux-Roses, le 17 juillet 2026

AVIS D'EXPERTISE Nº 2026-00079 DU 17 JUILLET 2026

Objet : Évaluation de la stabilité à long terme des ouvrages de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères - Site du Bernardan

Référence : Lettre ASNR CODEP-DRC-2024-036952 du 9 juillet 2024

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier géotechnique portant sur l'évaluation de la stabilité à long terme de l'ouvrage ceinturant le stockage des résidus miniers d'uranium du site du Bernardan, transmis par Orano Mining en septembre 2023, en réponse à une prescription du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR 2016-2018).

L'ASN demande que l'IRSN se prononce plus particulièrement sur :

- la cohérence de l'évaluation présentée par Orano Mining avec les travaux du groupe de travail (GT) mandaté par la DGPR et l'ASN dans le cadre du PNGMDR pour élaborer une méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium ;
- la pertinence des reconnaissances géotechniques, des hypothèses et des paramètres retenus par Orano Mining dans son évaluation de stabilité de l'ouvrage;
- la pertinence de la conclusion d'Orano Mining qui, compte tenu des conclusions de son évaluation, n'identifie pas le besoin d'en conforter la robustesse à long terme.

Au 1er janvier 2025, l'ASN et l'IRSN sont devenus l'ASNR. Dans la suite de cet avis, les acronymes ASN et IRSN sont maintenus lorsqu'il est fait référence à des documents ou positions émis par ces organismes avant leur fusion.

1. CONTEXTE ET CARACTÉRISTIQUES DU SITE DU BERNARDAN

Orano Mining a exploité entre 1978 et 2001 le site minier du Bernardan pour l'extraction d'uranium (cf. Annexe 1 au présent avis), par une mine à ciel ouvert (MCO) jusqu'en 1985 puis par travaux miniers souterrains (TMS). Les résidus miniers (1,95 millions de tonnes) issus de l'extraction de l'uranium sont stockés sur ce site, dans une installation de stockage relevant depuis 2007 de la rubrique 1735 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Adresse du siège social : 15 rue Louis Lejeune - 92120 Montrouge
Adresse postale : BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses cedex

Tél. : +33 (0)1 58 35 88 88 - Courriel : asnr-courrier@asnr.fr

Un ouvrage de ceinture retient mécaniquement le massif de résidus (cf. Annexes 2 et 3). Cet ouvrage est construit avec des stériles[1] granitiques, dont des arènes[2], issus du creusement de la MCO; il est formé d'environ 70% de blocs de granite (100 à 1000 mm de diamètre) et 30% de graviers et de sable (0,01 à 10 mm de diamètre). L'ensemble est appelé remblais dans la suite du présent avis. À la différence des ouvrages de ceinture d'autres stockages de résidus miniers, l'ouvrage de ceinture du Bernardan a été construit en une seule fois et de manière homogène. Sa hauteur est d'environ 5 à 10 m au nord et à l'ouest et atteint 24 m au sud-est, tandis que sa largeur en crête varie entre 10 et 15 m. La pente externe est égale à 2,5H/1V, excepté sur une section particulière de 100 m de longueur au sud-ouest du stockage où cette pente est plus inclinée (1,5H/1V). Cet ouvrage de ceinture s'étend sur un linéaire de 1,7 km.

Les terrains sous l'ouvrage de ceinture sont constitués, depuis la surface, par une couche d'arènes granitiques (quelques centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur), principal aquifère à surface libre, puis par un substratum granitique composé d'un rocher granitique fissuré (cf. Annexe 2) et, plus en profondeur, par ce rocher assimilable à un substratum imperméable.

La démarche mise en œuvre par Orano Mining pour évaluer la tenue de l'ouvrage de ceinture du Bernardan repose sur l'étude des risques d'érosion interne et externe, du risque de liquéfaction, du risque de rupture de sol en surface, ainsi que du risque de glissement. Pour ce dernier, Orano Mining retient cinq situations du stockage (cf. Annexe 4) combinant un niveau piézométrique dans l'ouvrage normal (correspondant à un drainage fonctionnel des eaux dans l'ouvrage), important (correspondant à un drainage fonctionnel dans des conditions de pluviométrie exceptionnelles) ou maximal (correspondant à un niveau d'eau affleurant dans les résidus à plusieurs mètres en amont de l'ouvrage et un niveau affleurant en pied de digue, en l'absence de maintenance effective de l'ouvrage) avec des conditions statique (situation normale) ou dynamique (situation sismique). Ce risque est évalué au niveau de trois profils de calcul[3] (cf. Annexe 3). **PSE-ENV estime, compte tenu des risques et des situations retenus par Orano Mining, que cette démarche est conforme aux préconisations issues du rapport du GT précité relatif à l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium.**

L'examen par PSE-ENV des éléments transmis par Orano Mining porte sur les données d'entrée utilisées pour les calculs de stabilité (chapitre 2) puis sur l'évaluation de la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des risques d'érosion interne (chapitre 3.1), d'érosion externe (chapitre 3.2), de liquéfaction (chapitre 3.3), de rupture en surface du sol en cas de séisme (chapitre 3.4), et enfin de glissement en conditions statique et dynamique (chapitre 3.5).

2. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée de l'évaluation de la stabilité de l'ouvrage de ceinture sont constituées des paramètres du modèle géotechnique, de données piézométriques et de l'aléa sismique. Elles reposent sur l'exploitation de documents d'archives, sur des campagnes de reconnaissance géotechnique et sur le suivi piézométrique du site.

2.1. PARAMETRES GEOTECHNIQUES

Orano Mining a réalisé deux campagnes de reconnaissance de l'ouvrage de ceinture et de la couche d'arènes granitiques, en 1996 et en 2022, qui comprennent notamment des sondages carottés en pied et en crête de l'ouvrage, des sondages destructifs réalisés en crête permettant la mesure de paramètres à l'avancement puis la réalisation d'essais pressiométriques *in situ*, ainsi que des tranchées à la pelle mécanique au sein des remblais de l'ouvrage de ceinture et dans les arènes granitiques. En complément, des essais en laboratoire et des analyses granulométriques ont été réalisés à partir de prélèvements issus des sondages carottés et des tranchées.

Pour ce qui concerne la couche d'arènes granitiques, Orano Mining retient, sur la base des résultats des sondages carottés précités, une épaisseur d'au plus 2 m dans son modèle géotechnique à l'échelle du site. PSE-ENV relève, d'une part, que certains documents d'archives recensés par Orano Mining rapportent une épaisseur des arènes supérieure à 7 m non loin du profil de calcul n°1 (cf. Annexe 3) et de 10 à 15 m localement à l'échelle du site minier

[1] L'extraction de minerais nécessite généralement l'extraction des roches environnantes, dites stériles miniers. Ils sont issus par exemple du creusement d'une mine à ciel ouvert

[2] Les arènes, sol d'altération, sont issues de l'altération physique et chimique du rocher granitique sous-jacent

[3] Il s'agit de coupes transversales perpendiculaires au linéaire de l'ouvrage de ceinture

et, d'autre part, qu'un seul sondage carotté a atteint le toit du substratum granitique. En conséquence, **PSE-ENV estime que l'épaisseur retenue par Orano Mining pour les calculs de stabilité n'est pas représentative des épaisseurs de la couche d'arènes.**

Par ailleurs, à partir de prélèvements issus des sondages carottés, Orano Mining mène une analyse granulométrique afin d'identifier le potentiel de liquéfaction de ces arènes (cf. chapitre 3.3). PSE-ENV observe que cette analyse repose sur 4 prélèvements issus de sondages espacés de plus de 400 m. En outre, Orano Mining réalise, au sein de 8 sondages, des essais pressiométriques contribuant également à l'analyse du risque de liquéfaction. Parmi les 70 mesures issues de ces essais, PSE-ENV note que seules 4 mesures ont effectivement été réalisées dans la couche d'arènes granitiques. Ainsi, **PSE-ENV relève que le nombre de mesures en appui à la caractérisation de la couche d'arènes granitiques, en particulier pour analyser le risque de liquéfaction sous l'ouvrage de ceinture, est faible au regard du linéaire de cet ouvrage** (**1,7 km).** Ce point est repris au chapitre 3.3 ci-après.

En outre, Orano Mining évalue les caractéristiques mécaniques de rupture intrinsèques des arènes granitiques sur la base des 4 mesures pressiométriques et d'essais en laboratoire à partir de prélèvements issus de 4 sondages carottés mentionnés ci-avant. Les différents essais analysés montrent des plages de variation de 0 à 28 kPa pour la cohésion effective et de 33 à 42° pour l'angle de frottement. Orano Mining retient les valeurs **c'**= 5 kPa et φ' = 33°. PSE-ENV considère que ces valeurs, si elles sont basses, ne sont pas les plus pénalisantes et ne tiennent pas compte de la variabilité au sein même de ce sol d'altération qui se présenterait, d'après les quelques courbes granulométriques disponibles et les résultats d'essais, tantôt comme un sol fin cohésif tantôt comme un sol purement granulaire à cohésion nulle. Ainsi, **PSE-ENV estime que le caractère enveloppe des valeurs retenues pour la cohésion et l'angle de frottement des arènes granitiques n'est pas pleinement acquis.** Ce point est repris dans le cadre de l'analyse de stabilité au risque de glissement (chapitre 3.5).

S'agissant des remblais de l'ouvrage de ceinture, l'identification des matériaux constitutifs repose sur des échantillons issus des tranchées réalisées en 3 points de l'ouvrage de ceinture. Comme ci-avant, PSE-ENV estime que le nombre d'échantillons est faible au regard du linéaire de l'ouvrage de ceinture. Cependant, PSE-ENV considère que les archives relatives à la constitution de l'ouvrage de ceintures sont suffisamment documentées pour couvrir cette incertitude et sont bien valorisées par Orano Mining, **ce qui est satisfaisant**. Les autres paramètres géotechniques de l'ouvrage de ceinture n'appellent **pas de remarque de la part de PSE-ENV**.

2.2. NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

Les niveaux d'eau du site sont suivis via des piézomètres positionnés au sein des résidus et, à l'aval de l'ouvrage de ceinture, dans les arènes granitiques et dans le substratum granitique. Aucun piézomètre n'est installé directement dans l'ouvrage de ceinture. Les niveaux piézométriques y sont estimés par simulation numérique sur la base des données issues des points de mesure existants et d'hypothèses relatives à la perméabilité des différents milieux (*i.e*. résidus stockés, massif drainant positionné le long du parement amont de l'ouvrage, matériaux de l'ouvrage eux-mêmes, milieu géologique).

PSE-ENV considère que le réseau piézométrique mis en place à l'échelle de l'ancien site minier fournit une couverture satisfaisante pour le suivi des niveaux d'eau en amont et en aval de l'ouvrage de ceinture. PSE-ENV relève toutefois que l'absence de piézomètre implanté directement dans les remblais du corps de l'ouvrage de ceinture ne permet pas de vérifier la pertinence des profils piézométriques qui y sont simulés. A cet égard, PSE-ENV constate que le secteur sud-est de l'ouvrage présente, en amont du bassin de collecte B7 (cf. Annexe 3), des émergences non mises en évidence par la simulation[4], qu'Orano Mining justifie par des eaux de surface infiltrées plus en amont au niveau de l'ouvrage. PSE-ENV estime que l'absence de piézomètre dans cette zone ne permet pas d'exclure que cette émergence soit liée à un niveau piézométrique plus important. Aussi, **PSE-ENV estime qu'Orano Mining devrait installer un piézomètre dans les remblais de l'ouvrage de ceinture du Bernardan dans le secteur sud-est en amont du bassin de collecte B7 pour consolider les niveaux piézométriques dans cet ouvrage retenus pour les évaluations de stabilité.** De manière plus générale, PSE-ENV considère que l'évaluation des futurs dossiers géotechniques des autres sites de stockage de résidus à remettre dans le cadre du PNGMDR doit s'appuyer sur des mesures représentatives, et non uniquement des simulations des niveaux d'eau dans les ouvrages de ceinture. **Aussi, il appartiendra à Orano Mining, dans le**

[4] Profil de calculs n°1

cadre de l'analyse géotechnique présentée dans les futurs dossiers, de s'appuyer sur des mesures piézométriques pour estimer les niveaux d'eau au sein des ouvrages.

S'agissant des niveaux piézométriques retenus dans les calculs de stabilité, PSE-ENV constate que les niveaux piézométriques retenus pour les situations de piézométrie normale et importante sont fondés sur le suivi piézométrique des niveaux d'eau du site. S'agissant de la situation de piézométrie maximale (cf. situations 4 et 5 en Annexe 4), Orano Mining considère un niveau d'eau extrême (affleurant) au sein des résidus, mais pas dans l'ouvrage. PSE-ENV observe que cette hypothèse n'est pas pleinement conforme à la préconisation du GT de retenir, pour l'évaluation relative à la phase d'absence de maintenance à partir de laquelle on ne peut plus compter sur une efficacité des dispositifs de drainage, le niveau piézométrique maximal dans l'ouvrage et au sein des résidus stockés. Néanmoins, PSE-ENV estime que l'ouvrage de ceinture, constitué majoritairement de remblais de granulométrie grossière (amas de blocs rocheux), permettra de maintenir un écoulement de l'eau et ainsi de limiter la mise en charge du fait du contraste de perméabilité entre ces matériaux et les résidus stockés; une absence totale de drainage sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage lui-même demeure ainsi très peu probable, même à long terme. Aussi, **PSE-ENV considère que le niveau piézométrique maximal retenu par Orano Mining pour l'ouvrage du Bernardan est acceptable pour l'évaluation des situations considérant un niveau d'eau maximal préconisées par le GT.**

2.3. ALEA SISMIQUE

Orano Mining retient, pour caractériser le niveau de l'aléa sismique, une valeur d'accélération nommée PGA (peak ground acceleration). Le calcul de cette valeur s'appuie sur la démarche de l'Eurocode 8 consistant à définir un zonage parasismique divisant le territoire français en zones correspondant à des niveaux de sismicité variant de 1 (très faible) à 5 (forte), le site du Bernardan étant en zone 2 de faible sismicité. À chaque zone est associée une valeur de PGA correspondant à une période de retour de 475 ans. Sur la base du niveau de sismicité correspondant du site du Bernardan issu de ce zonage parasismique, de la valeur du PGA pour une période de retour de 475 ans et de la méthode de conversion de l'Eurocode 8, Orano Mining évalue la valeur du PGA pour une période de retour de 10 000 ans, recommandée par le GT.

PSE-ENV relève que l'Eurocode 8 établit la validité de cette méthode d'évaluation du PGA pour des périodes de retour inférieures à 5 000 ans, retenue habituellement pour les ICPE. De plus, des études de l'aléa sismique réalisées à l'échelle spécifique de plusieurs villes (Nantes, Lourdes, Clermont-Ferrand, Briançon, Nice and Strasbourg) indiquent que les coefficients de conversion entre les accélérations à 475 et 5 000 ans diffèrent de ceux calculés à l'échelle du zonage parasismique précité ; ces différences sont liées d'une part aux caractéristiques des sites et d'autre part aux hypothèses et modèles mis en œuvre dans le calcul de l'aléa probabiliste, et s'accentuent pour des périodes de retour de 10 000 ans. Compte tenu de ces réserves, PSE-ENV a réalisé des contre-calculs probabilistes intégrant des données[5] propres à l'échelle spécifique du site du Bernardan. Il en ressort que la valeur moyenne du PGA pour une période de retour de 10 000 ans, évaluée à l'échelle spécifique du site du Bernardan, est de 0,28 g, soit une fois et demie supérieure à celle évaluée par Orano Mining (0,19 g) sur la base du zonage parasismique et du coefficient de conversion précités. En outre, le calcul déterministe de l'aléa sismique du site, réalisé par PSE-ENV sur la base de la règle fondamentale de sûreté RFS 2001-01 (cf. extrait en Annexe 5 au présent avis), aboutit à un spectre de séisme majoré de sécurité[6] (SMS) conduisant aussi à une valeur de PGA de 0,28 g. Au vu des éléments qui précèdent, **PSE-ENV estime que le coefficient de conversion retenu par Orano Mining dans son étude probabiliste ne permet pas d'aboutir à une évaluation enveloppe du PGA à 10 000 ans. A cet égard, PSE-ENV souligne la nécessité de tenir compte de données propres au contexte sismotectonique du site du Bernardan.** Ce point est repris dans le cadre de l'analyse de la stabilité au risque de liquéfaction et au risque de glissement aux chapitres 3.3 et 3.5.

[5] Il s'agit d'un zonage sismotectonique, de l'utilisation de taux de sismicité et d'un jeu d'équations de prédiction du mouvement sismique adaptés à la sismicité de la zone d'appartenance du site du Bernardan et à sa classe de sol

[6] Caractérisé par une magnitude supérieure de +0,5 par rapport aux caractéristiques de magnitude du Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable

3. EVALUATION DE LA STABILITE DE L'OUVRAGE DE CEINTURE

3.1. ÉVALUATION DU RISQUE D'EROSION INTERNE

L'érosion interne correspond au départ progressif de particules constituant un ouvrage ou un sol sous l'action d'écoulements d'eau internes à travers des parties non visibles de cet ouvrage ou de ses couches de fondation et peut conduire à sa ruine. Ce risque concerne autant les remblais de l'ouvrage de ceinture que les arènes granitiques sous-jacentes. Orano Mining a présenté, conformément aux préconisations du GT, une évaluation des 4 mécanismes existants d'érosion interne (érosion de conduit, érosion de contact, érosion régressive et suffusion). Selon l'évaluation d'Orano Mining, certains de ces mécanismes pourraient s'initier, mais leur propagation dans l'ouvrage de ceinture ou ses fondations resterait limitée. PSE-ENV considère que les évaluations présentées par Orano Mining sont conformes à l'état de l'art et cohérentes avec ses propres calculs. **PSE-ENV estime ainsi que le risque d'érosion interne a été correctement évalué et peut être écarté pour l'ouvrage du Bernardan.**

3.2. ÉVALUATION DU RISQUE D'EROSION EXTERNE

L'érosion externe regroupe les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure d'un ouvrage (surverse, effets de courant sur les pentes ou les pieds de pente (affouillement), ruissellement des eaux météoritiques). Pour évaluer ce risque, le rapport du groupe de travail PNGMDR relatif à l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium [2] préconise de considérer un scénario de ruissellement résultant d'une pluie centennale sur le bassin versant situé en amont de l'ouvrage de ceinture, en majorant le débit issu de cette pluie d'un facteur 2, et d'apprécier l'érodabilité des matériaux situés proches de la surface en tenant compte de ce débit de ruissellement.

Orano Mining indique qu'en l'absence de bassin versant amont sur le site du Bernardan[7], les ruissellements qui affecteraient l'ouvrage de ceinture ne proviendraient que des précipitations sur la couverture des résidus et sur l'ouvrage de ceinture lui-même, **ce dont PSE-ENV convient**. Les seuls risques d'érosion externe identifiés par Orano Mining sont au droit de goulottes situées au nord du site (cf. Annexe 7), mais la configuration de ces goulottes (cunettes bétonnées protégées latéralement par des enrochements) serait suffisante pour prévenir tout développement d'érosion externe par débordement sur la pente aval, ainsi qu'en pied de l'ouvrage de ceinture. Orano Mining précise ainsi que l'enjeu principal en phase de maintenance est le dimensionnement suffisant des canalisations pour collecter ces eaux dans le bassin approprié et, en cas de mise en charge, d'assurer qu'elles pourront bien se déverser dans le ruisseau du Rigeallet (cf. Annexe 3) sans impacter les bassins de traitement des eaux de stockage. PSE-ENV constate que pour cette évaluation Orano Mining ne majore pas d'un facteur 2 le débit issu de la pluie centennale, tel que préconisé par le GT. Orano Mining a indiqué en cours d'expertise que des études hydrauliques seraient menées ultérieurement afin de répondre à cette préconisation, pour l'ouvrage du Bernardan et plus globalement pour les autres ouvrages de stockage de résidus, **ce qui est satisfaisant sur le principe**.

En outre, sur le long-terme, Orano Mining n'apporte pas de justification sur sa conclusion quant au risque limité d'érosion externe des matériaux situés proches de la surface en l'absence de maintenance de l'ouvrage. Aussi, en cohérence avec les préconisations du GT, **PSE-ENV considère qu'il appartiendra à Orano Mining de justifier le caractère limité de l'érodabilité des matériaux proches de la surface.**

A ce stade, PSE-ENV convient que le risque d'érosion externe ne constitue pas un enjeu fort vis-à vis de la stabilité de l'ouvrage de ceinture.

3.3. ÉVALUATION DU RISQUE DE LIQUEFACTION

La liquéfaction d'un sol sous séisme est un phénomène qui correspond à une augmentation de la pression d'eau dans le matériau pouvant amener à un affaiblissement significatif de sa résistance voire à son écoulement. Le GT [2] préconise de procéder à l'évaluation du risque de liquéfaction sur la base d'une approche qualitative reposant sur une analyse granulométrique et des essais pénétrométriques[8]. Dans le cas où ce risque est identifié, cette approche qualitative peut être complétée d'une évaluation quantitative du risque consistant à calculer un

[7] Le point haut topographique du site est positionné approximativement au milieu de la couverture

[8] Outil géotechnique dit pénétrométrique par enfoncement d'une pointe pour mesurer la résistance du sol

coefficient de sécurité (FS) défini comme le rapport entre la résistance au cisaillement du sol et la contrainte exercée par un séisme de périodes de retours de 475 et de 10 000 ans. Le risque de liquéfaction est avéré pour FS inférieur à 1 ou 1,25 si une marge de sécurité est considérée conformément à l'Eurocode 8.

Orano Mining présente une étude du risque de liquéfaction des arènes granitiques et des remblais de l'ouvrage de ceinture sur la base d'une analyse granulométrique et d'une analyse d'essais pressiométriques :

- l'analyse granulométrique, conduite par Orano Mining sur 5 échantillons d'arènes granitiques et sur 3 échantillons de remblais de l'ouvrage de ceinture (cf. chapitre 2.1), conclut que seul un échantillon d'arènes granitiques représente un sol potentiellement liquéfiable. Cependant, Orano Mining précise que, compte tenu de l'hétérogénéité de ces arènes sur le linéaire de l'ouvrage de ceinture, il ne peut être exclu de rencontrer des arènes granitiques potentiellement liquéfiables ailleurs sur ce linéaire. Par conséquent, Orano Mining a complété cette analyse par celle des sondages pressiométriques (cf. chapitre 2.1) réalisés à d'autres emplacements (cf. Annexe 3) ;
- l'analyse conduite sur les sondages pressiométriques met localement en évidence des horizons liquéfiables à la base des remblais (au niveau d'1 sondage) et dans les arènes (au niveau de 3 sondages). Orano Mining a alors réalisé une évaluation quantitative (calcul des coefficients de sécurité) confirmant ces résultats pour un séisme de période de retour de 10 000 ans.

Toutefois, Orano Mining conclut, sur la base de l'analyse granulométrique précitée, que le risque de liquéfaction est extrêmement faible.

En premier lieu, PSE-ENV convient que le risque de liquéfaction est limité aux arènes granitiques et qu'il peut être écarté pour les remblais de l'ouvrage de ceinture compte tenu de leur perméabilité et de leur granulométrie grossière empêchant toute surpression d'eau dans ce type de matériau.

Concernant la démarche retenue pour analyser le risque de liquéfaction, PSE-ENV constate qu'Orano Mining s'appuie sur les résultats de l'analyse granulométrique de prélèvements issus des sondages carottés afin de discriminer les résultats issus des sondages pressiométriques alors que ces sondages ne sont pas positionnés aux mêmes emplacements. Par ailleurs, PSE-ENV rappelle que le nombre d'échantillons prélevés en appui à la caractérisation des arènes granitiques est faible au regard du linéaire de l'ouvrage de ceinture (cf. chapitre 2.1). Par conséquent, sur la base du faible nombre de mesures et de l'emplacement différents des sondages carottés et pressiométriques, **PSE-ENV estime que l'interprétation des résultats des analyses du risque de liquéfaction est entachée de fortes incertitudes.**

En outre, s'agissant de l'analyse granulométrique, PSE-ENV constate, sur la base d'un critère pour les sols à granulométrie étalée[9] différent de celui retenu par Orano Mining, que les arènes granitiques seraient sensibles à la liquéfaction. S'agissant enfin de l'approche quantitative, PSE-ENV constate qu'Orano Mining évalue la résistance des arènes granitiques au cisaillement par corrélation avec les essais pressiométriques. PSE-ENV rappelle que, d'après le GT, cette méthode peut conduire à des erreurs d'interprétation. A ce titre, le GT préconise de privilégier des essais pénétrométriques pour cette évaluation.

En conclusion, **PSE-ENV estime que l'évaluation du risque de liquéfaction dans les arènes granitiques présentée par Orano Mining comporte plusieurs faiblesses méthodologiques conduisant à des incertitudes importantes. Ainsi, PSE-ENV estime qu'Orano Mining devrait compléter son analyse sur le potentiel à liquéfier des arènes granitiques selon les règles de l'art et en considérant :**

- **un aléa sismique tenant compte des données propres au contexte sismotectonique du site du Bernardan ;**
- **des reconnaissances complémentaires pour caractériser la couche d'arènes granitiques sous l'ouvrage de ceinture à l'échelle du stockage de résidus.**

Enfin, au-delà des préconisations du GT, PSE-ENV estime que la liquéfaction des résidus eux-mêmes pourrait affecter la stabilité de l'ouvrage de ceinture dans le seul cas où les arènes granitiques seraient liquéfiées. Aussi,

[9] Fuseau de Iwasaki

PSE-ENV considère que le risque de liquéfaction des résidus serait à prendre en compte si le risque de liquéfaction des arènes était confirmé.

3.4. EVALUATION DU RISQUE DE RUPTURE DE SOL SOUS SEISME

La rupture du sol en surface, au droit de l'ouvrage, pourrait être produite par une faille présente dans l'environnement du site en cas de séisme. Cet aléa n'est pas couvert par celui associé au zonage sismotectonique et implique d'identifier la présence potentielle de faille, dans l'environnement très proche du site. Le GT préconise ainsi, pour les ouvrages des sites de stockage situés en zone de sismicité dites « modérée » à « forte », d'évaluer cette probabilité de rupture. Orano Mining indique que la démarche retenue pour l'ensemble de ses sites s'appuie sur l'utilisation d'une carte géologique au 1/50 000 pour répertorier les failles potentiellement présentes et le recours à une loi mathématique[10] datant de 1994.

Orano Mining a mené cette démarche sur le site du Bernardan malgré sa localisation en zone de sismicité faible dans l'objectif de tester la méthodologie à appliquer ultérieurement aux autres stockages. Il conclut pour l'analyse du Bernardan que le déplacement moyen pouvant se produire est suffisamment faible pour ne pas remettre en cause la stabilité de l'ouvrage si une rupture du sol survient, **ce qui n'appelle pas de commentaire de la part de PSE-ENV.**

S'agissant plus globalement de la méthodologie d'évaluation mise en œuvre par Orano Mining, PSE-ENV relève qu'il existe des bases de données de failles actives plus récentes et plus détaillées que celles fournies par la carte géologique retenue par Orano Mining, ainsi que des lois d'échelle plus récentes que celle de 1994. **Aussi, il appartiendra à Orano Mining d'apprécier, pour l'évaluation qui sera présentée dans les futurs dossiers géotechniques des sites de stockage de résidus miniers situés en zones de sismicité modérée à forte, la probabilité d'une rupture du sol en surface en considérant des données plus détaillées que la carte géologique au 1/50 000 et un modèle plus récent que celui de 1994 afin de s'assurer que l'impact des déplacements sur l'ouvrage, le cas échéant, reste acceptable.**

3.5. EVALUATION DU RISQUE DE GLISSEMENT

Le glissement d'un sol ou d'un ouvrage de ceinture consiste en une rupture de ce sol ou de cet ouvrage le long de plans de faiblesse attribuables aux sollicitations statiques ou dynamiques. Pour vérifier la stabilité de l'ouvrage au glissement, Orano Mining a établi un modèle géotechnique représentant la géométrie de l'ouvrage de ceinture et des premières couches géologiques du sol (cf. figure en Annexe 2), les matériaux composant cet ouvrage et ces couches, ainsi que leurs paramètres géotechniques (cf. chapitre 2.1 ci-avant). Sur la base de ce modèle géotechnique, des niveaux d'eau fournis par la surveillance piézométrique du stockage (cf. chapitre 2.2) et du niveau d'aléa sismique retenu (cf. chapitre 2.3), Orano Mining évalue la stabilité au glissement au niveau de trois profils de calculs (cf. Annexe 3). Ces évaluations sont réalisées pour les cinq situations étudiées (cf. Annexe 4) et comparées aux critères de sécurité préconisés par le GT pour chacune de ces situations. **PSE-ENV estime que cette approche est conforme à l'état de l'art issu du rapport du GT.**

Orano Mining conclut de son analyse de stabilité que les facteurs de sécurité calculés présentent des marges importantes pour toutes les situations. Selon Orano Mining, ceci est principalement dû à une position de nappe très basse[11] dans l'ouvrage de ceinture quel que soit le niveau piézométrique considéré en amont de cet ouvrage.

PSE-ENV considère que la démonstration par Orano Mining de la stabilité de l'ouvrage de ceinture est entachée d'incertitudes compte tenu du manque de caractérisation de l'épaisseur de la couche d'arènes granitiques (cf. chapitre 2.1), du niveau d'aléa sismique actuellement retenu (cf. chapitre 2.3) et de la méconnaissance de la piézométrie au niveau du bassin de collecte B7 (cf. chapitre 3.2). Cependant, PSE-ENV relève que les calculs d'Orano Mining conduisent effectivement à des facteurs de sécurité présentant des marges importantes à l'égard des critères de sécurité issus du GT pour l'ensemble des situations étudiées (cf. Annexe 6). Aussi, **PSE-ENV estime que ces incertitudes ne sont pas de nature à remettre en cause la stabilité au glissement de l'ouvrage.** En revanche, afin de conforter ces marges, PSE-ENV estime qu'Orano Mining pourrait actualiser son analyse de stabilité de l'ouvrage de ceinture au glissement sur la base de l'aléa sismique mis à jour (cf. chapitre

[10] Cette loi établit des relations entre la longueur d'une rupture en surface et la magnitude d'un séisme

[11] Du fait de l'important contraste (rapport 1000) de perméabilité entre les résidus et les remblais constituant le corps de cet ouvrage

2.3) ainsi que des reconnaissances complémentaires identifiées *supra* (cf chapitre 2.2 relatif aux niveaux piézométriques dans l'ouvrage de ceinture et chapitre 3.3 relatif au risque de liquéfaction).

Enfin, s'agissant de la méthode d'analyse pseudo-statique[12] utilisée par Orano Mining pour évaluer la stabilité au glissement en condition dynamique, le rapport du groupe de travail PNGMDR relatif à l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium [2] précise que celle-ci n'est plus applicable en contexte de liquéfaction. En outre, il convient de rappeler que le GT préconise également de réaliser, en cas de survenue d'un séisme ayant affecté une zone incluant un ouvrage de ceinture, une étude de stabilité en situation post-sismique afin de vérifier que les éventuelles dégradations de matériaux ou modifications des conditions hydrauliques dans l'ouvrage ne remettent pas en cause sa stabilité statique. Aussi, **il appartiendra à Orano Mining, si le risque de liquéfaction dans les arènes granitiques était avéré à la suite des compléments identifiés au chapitre 3.3 ci-avant, de mener une analyse de stabilité par des méthodes adaptées, ainsi qu'une étude de stabilité en situation post-sismique.**

4. CONCLUSION

PSE-ENV estime que la démarche suivie par Orano Mining pour évaluer la stabilité de l'ouvrage de ceinture du site du Bernardan est bien cohérente avec les préconisations du GT, en termes de risques et de situations à retenir ainsi que d'approche d'évaluation à appliquer (construction d'un modèle géotechnique, paramètres à déterminer…). S'agissant des conclusions d'Orano Mining, PSE-ENV convient que l'ouvrage de ceinture du stockage du Bernardan est stable vis-à-vis des risques d'érosion interne ainsi que de glissement en conditions statique et dynamique. L'évaluation du risque d'érosion externe, de même que la piézométrie dans l'ouvrage de ceinture, restent à consolider sans toutefois remettre en cause la stabilité de l'ouvrage. En revanche, le risque de liquéfaction ne peut être écarté à ce stade. Aussi, PSE-ENV estime que la conclusion d'Orano Mining n'identifiant pas le besoin de conforter la robustesse à long terme de cet ouvrage est justifiée sous réserve de la confirmation de l'absence de risque de liquéfaction des arènes granitiques.

S'agissant des futurs dossiers d'Orano Mining relatifs à la stabilité à long terme des ouvrages de stockage de résidus miniers prévus dans le cadre du PNGMDR, PSE-ENV encourage Orano Mining à reproduire la démarche présentée pour l'évaluation de la stabilité de l'ouvrage de ceinture du Bernardan, en se basant toutefois sur un aléa sismique tenant compte des données propres au contexte sismotectonique ainsi que sur des valeurs de paramètres issues de mesures sur site réalisées en nombre suffisant pour établir la robustesse de leur représentativité.

Pour le Directeur de la recherche et
de l'expertise en environnement

Delphine PELLEGRINI

Adjointe au Directeur de la recherche et
de l'expertise en environnement

SIGNATURE ÉLECTRONIQUE ASNR

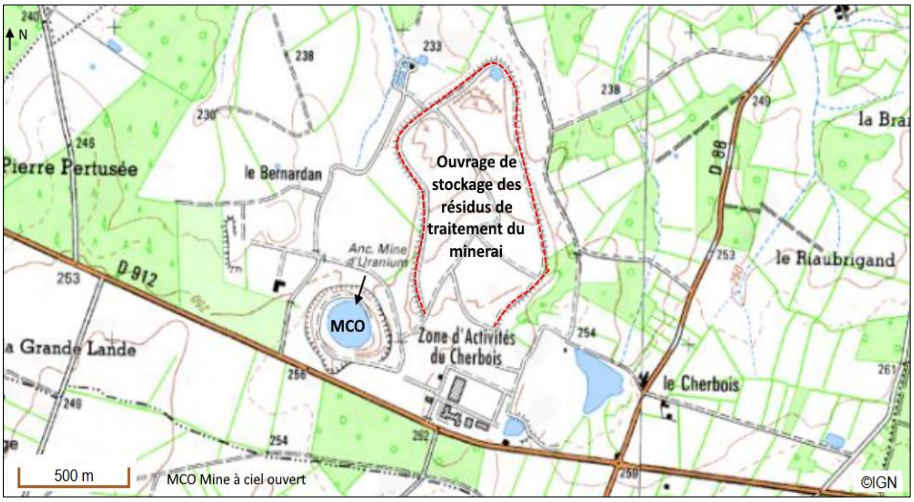
Signature numérique de Delphine PELLEGRINI

[12] Pour rappel, l'analyse pseudo-statique consiste à transformer un problème dynamique en un problème statique en retenant une force statique équivalente proportionnelle à la valeur maximale de l'accélération du sol (PGA)

ANNEXES A l'AVIS Nº 2026-00079 DU 17 JUILLET 2026

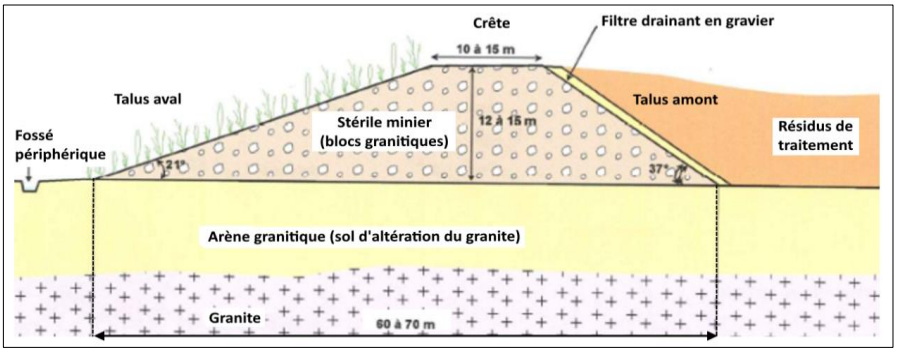
Annexe 1

Localisation de l'ouvrage du Bernardan sur la carte IGN au 1/25 000



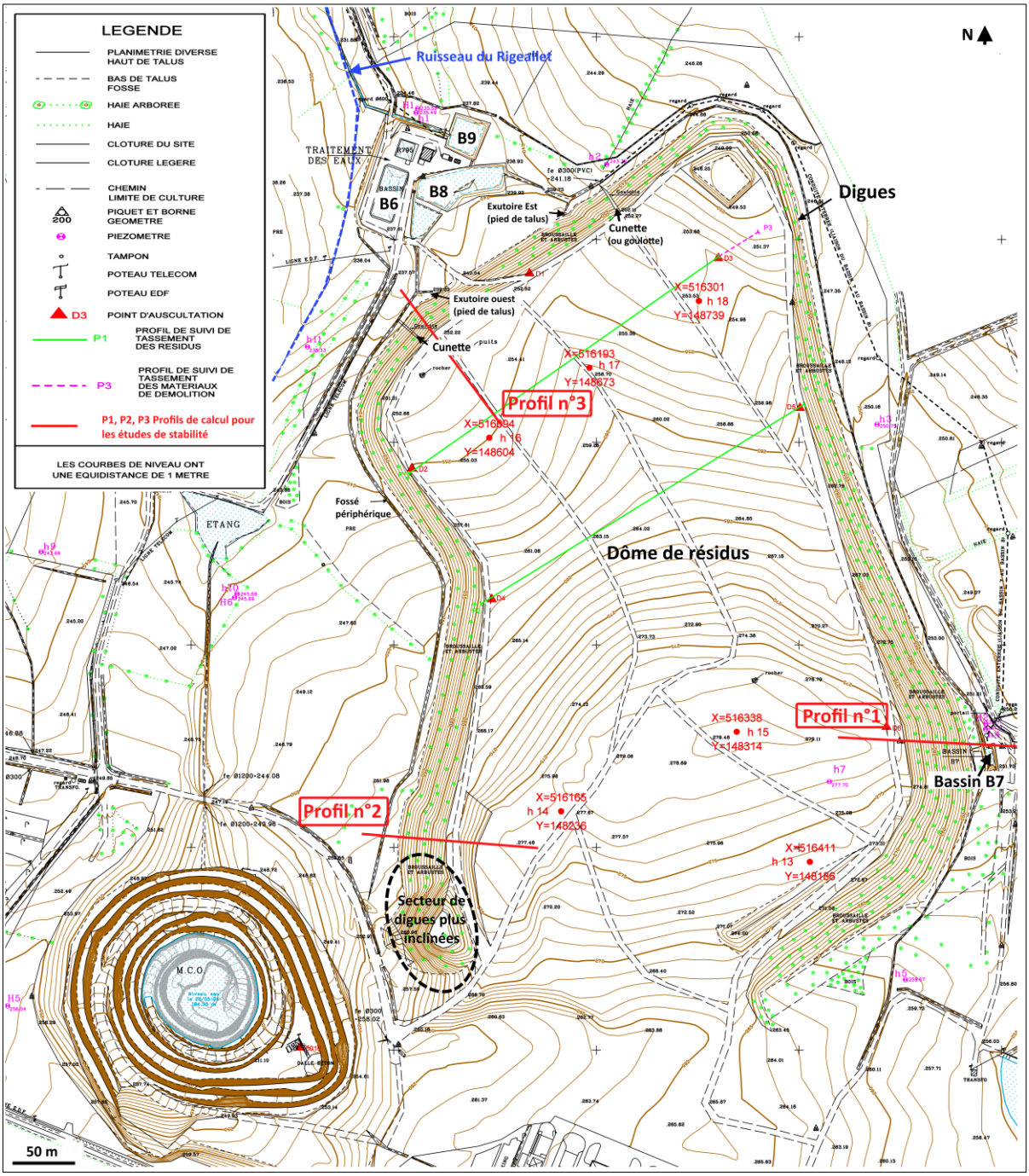
Annexe 2

Schéma de principe du stockage de l'ouvrage du Bernardan



Annexe 3

Plan topographique - situation en juin 2024



Annexe 4

Situations et aléas à considérer pour les études de stabilité

Situation	Phase de vie du stockage	Niveau d'eau dans l'ouvrage	Aléas naturels
1	« Maintenance effective »	**Normal** (drains fonctionnels)	**Sans aléa**
2		**Normal** (drains fonctionnels)	**Séisme** associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)
3		Piézométrie **importante** (niveau d'eau élevé lié aux infiltrations très importantes)	**Pluviométrie exceptionnelle** débit de ruissellement, calculé à partir des pluies centennales, majoré d'un facteur 2
4	« Absence de maintenance »	Piézométrie **maximale** (liée à l'inefficacité des drains)	**Sans aléa**
5 (en sensibilité)		Piézométrie **maximale** (liée à l'inefficacité des drains)	**Séisme** associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)

Annexe 5

Rappel de la RFS 2011-01

Pour rappel, la RFS 2001-01 précise les différentes étapes de la démarche à suivre pour élaborer les séismes majorés de sécurité (SMS).

En synthèse, cette démarche est la suivante : un zonage sismotectonique est défini pour identifier et sélectionner les séismes de référence à partir de la base de données de sismicité historique de la France métropolitaine. Les séismes de référence retenus dans chaque zone sont ensuite translatés au plus près du site. Le séisme de référence ayant l'impact le plus fort au site est alors retenu comme étant le « séisme maximal historiquement vraisemblable » (SMHV). Dans certaines configurations, plusieurs séismes peuvent être retenus. L'intensité macrosismique au site et la magnitude de ce séisme sont ensuite majorées pour définir le SMS, caractérisé par une magnitude supérieure de +0,5 par rapport aux caractéristiques de magnitude du SMHV. Les spectres de réponse (SMHV et SMS) de ces séismes sont calculés avec la loi de prédiction du mouvement sismique définie par la RFS 2001-01. La RFS 2001-01 préconise que le spectre retenu pour définir le SMS ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire (SMF) calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie.

Annexe 6

Valeurs minimum des coefficients de sécurité obtenus

	Coefficient de sécurité requis	Résultat profil 1	Résultat profil 2	Résultat profil 3
Situation 1	1,5	2,08	2,67	2,02
Situation 2	1,1	1,45	1,77	1,45
Situation 3	1,1	2,07	2,27	2,02
Situation 4	1,3	2,01	2,44	1,90
Situation 5	1,1	1,4	1,61	1,36

Annexe 7

Circulation des eaux de ruissellement sur le site

