



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 8 novembre 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00163

---

**Objet :** Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)  
Centre de stockage de l'Aube (CSA) – INB n°149  
Engagement pris dans le cadre du second réexamen de l'INB n° 149 (E35 relatif à la  
couverture)

---

**Réf. :** Lettre ASN CODEP-DRC-2022-036228 du 18 novembre 2022

---

Par lettre citée en référence, vous avez demandé l'avis de l'IRSN sur les éléments transmis par l'Andra en réponse à l'engagement E35 pris en 2018 à l'issue de l'instruction du second réexamen de sûreté du centre de stockage de l'Aube (CSA) et visant à compléter les études portant sur la couverture définitive de ce centre. L'Andra prévoyait dans le cadre de cet engagement d'approfondir des aspects relatifs à la mise en charge de la couche drainante (E35-1), aux caractéristiques géomécaniques des matériaux (E35-2), à la stabilité élémentaire de chaque couche (E35-3), aux adoucissements possibles des pentes des talus (E35-4), aux dispositions de maîtrise des tassements et à leur compatibilité avec le bon fonctionnement de la couverture (E35-5) ainsi qu'à la stabilité globale de la couverture en tenant compte de son évolution dans le temps (E35-6).

Selon le référentiel de sûreté du CSA, la couverture définitive qui sera mise en place au-dessus des ouvrages de stockage à l'issue de la phase d'exploitation aura pour fonctions de sûreté de limiter l'infiltration d'eau dans le stockage et de le protéger contre l'érosion et les intrusions animales et végétales pendant la phase de surveillance prévue pour 300 ans. La couverture devra ainsi demeurer stable mécaniquement durant cette phase, que ce soit vis-à-vis de glissements au niveau des talus périphériques y compris en cas de séisme ou en cas d'éventuels tassements en toiture.

### 1. PRESENTATION DU CONCEPT DE COUVERTURE

Le concept de référence retenu par l'Andra consiste en une couverture multicouche de 3,4 m d'épaisseur totale minimale avec des pentes en toiture de 1 % dans la longueur et de 8 % dans le sens transversal. Au niveau des talus, l'Andra retient une pente de 33 % (3 de largeur pour 1 de hauteur ; pente dite de 3H/1V). Le concept retenu à ce jour comporte, des couches inférieures aux couches supérieures (cf. figure ci-après) : une couche de forme en remblai d'une épaisseur supérieure ou égale à 0,4 m d'épaisseur posée sur les ouvrages et constituée de sable de l'Aptien supérieur, une barrière imperméable (ou couche « d'étanchéité ») d'1,5 m constituée d'argile de l'Aptien inférieur, une couche de drainage constituée de 0,4 m de matériau concassé (grave), une couche de

MEMBRE DE  
**ETSON**

0,1 m de filtre en sable de l'Aptien supérieur, une couche de protection de 0,8 m constituée de matériaux grossiers à base d'argile de l'Albien altérée et enfin une couche de 0,2 m de terre végétale.

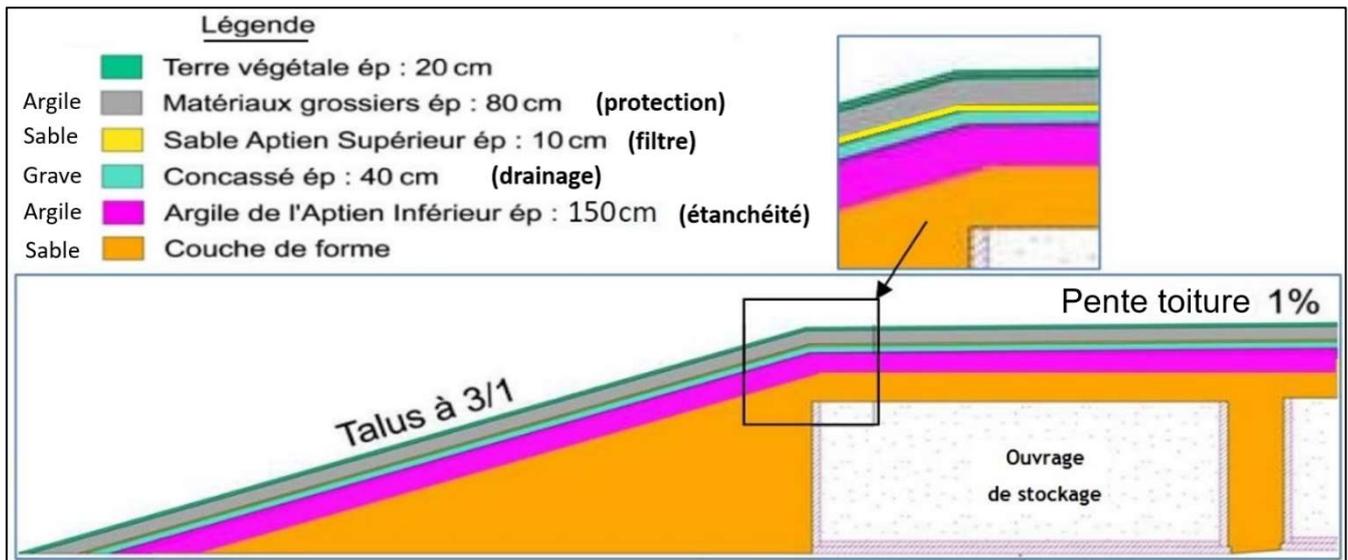


Figure 1 – Illustration de la couverture définitive retenue par l'Andra pour le CSA, d'après le dossier du second réexamen de sûreté. Echelle non respectée.

## 2. MISE EN CHARGE DE LA COUCHE DRAINANTE (E35-1)

Au sein de la couverture multicouche, la conception à base de matériau argileux de la couche de protection, lui conférant *a priori* une faible perméabilité, ne permettait pas d'exclure, au stade du dossier de réexamen de sûreté de 2016, la possibilité d'une mise en charge hydraulique « extrême » de la couche drainante de matériau concassé sous-jacente. En effet, en cas de colmatage de cette dernière et en considérant une potentielle infiltration d'eau suite à une fissuration de la crête du talus, la faible perméabilité de la couche de protection pourrait empêcher l'eau de s'évacuer. La charge maximale pouvant alors théoriquement être atteinte équivaut à la cote de la crête du talus. L'Andra s'était donc engagée à « prendre en compte une mise en charge extrême de la couche drainante » (E35-1).

L'Andra a apporté dans le présent dossier de nouveaux éléments visant à exclure la possibilité d'une mise en charge hydraulique de la couche drainante correspondant à la hauteur totale du talus (mis en charge dite « extrême »). En premier lieu, l'Andra indique que la couche de filtre en sable comprise entre la couche de protection et la couche drainante contribuera à éviter, pendant toute la durée de la phase de surveillance, l'entraînement de particules fines d'argile depuis la couche de protection vers la couche drainante. L'Andra justifie ce point par un calcul basé sur les diamètres des grains des couches respectives, qui montre que les particules de la couche de protection ne peuvent pas migrer vers la couche de filtre de sable et que les particules de la couche de filtre de sable ne peuvent pas non plus migrer vers la couche de grave. Dans la mesure où l'entraînement de ces particules constitue l'unique moteur d'une potentielle obstruction de la couche drainante, l'IRSN convient que l'éventualité d'un colmatage de la couche drainante est peu plausible pendant toute la durée de la phase de surveillance. En second lieu, l'IRSN note que l'Andra a précisé au cours de l'expertise que la perméabilité de la couche de protection pourrait être prescrite de telle sorte qu'un débit de fuite minimum soit garanti en vue d'éviter une mise en charge de la couche drainante.

L'Andra présente néanmoins, en réponse à son engagement, l'étude d'un « effet piston » représentatif d'une mise en charge extrême de la couche drainante. Cette étude concluant à une instabilité des talus, l'Andra l'a complétée en déterminant à partir de quelle hauteur d'eau pourrait survenir une instabilité et aboutit à une hauteur d'eau correspondant approximativement au quart de la hauteur totale du talus. L'Andra décrit alors les conséquences de cette instabilité en précisant qu'en cas de colmatage total de l'exutoire de la couche drainante,

la pression hydraulique en son sein conduirait à une rupture par soulèvement du pied du talus, et que celle-ci se produirait bien avant sa mise en charge totale (et ce, quelle que soit la pente de talus prise en compte). Selon l'Andra, ce type de rupture, locale et sans conséquence majeure sur la stabilité du talus, conduirait à un rééquilibrage hydraulique qui rendrait impossible une mise en charge extrême, ce dont convient l'IRSN.

**L'IRSN considère, au vu de l'ensemble des éléments présentés ci-avant, que l'Andra a bien pris en compte dans ses études une mise en charge extrême de la couche drainante de la couverture et sur cette base, a justifié de manière satisfaisante son exclusion pour l'évaluation de la stabilité de la couverture.**

### **3. CARACTERISTIQUES GEOMECANIQUES DES MATERIAUX (E35-2)**

A l'issue de l'expertise du dossier de réexamen de sûreté de 2016, l'Andra s'était engagée à justifier le caractère enveloppe des caractéristiques géomécaniques (cohésion, angle de frottement) des matériaux constitutifs des sols (couches) retenues dans les modélisations en support à l'évaluation de la stabilité des talus (E35-2).

L'IRSN observe que l'Andra retient des caractéristiques drainées pour tous les matériaux constitutifs de la couverture. Pour justifier les valeurs retenues pour les sols non cohérents ou faiblement cohérents (couche de forme, couche de drainage et couche de filtre), l'Andra retient, pour les calculs présentés en réponse à l'engagement E35-3, les mêmes valeurs qu'au stade du réexamen de sûreté de 2016, qu'elle considère conservatives, à savoir une cohésion nulle et un angle de frottement plus faible (25 ° dans les sables et 35 ° dans les graves) que les valeurs usuelles (respectivement comprises entre 32 ° et 35 ° et entre 38 ° et 42 °). **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

S'agissant des valeurs retenues pour les sols cohérents (couche d'étanchéité et couche de protection), l'Andra retient des valeurs dites « moyennes basses » pour son évaluation et, dans le cadre d'études de sensibilité, des caractéristiques dites « dégradées » en les justifiant sur la base de mesures :

- les valeurs « moyennes basses » (angle de frottement égal à 21,8 ° et cohésion de 10 kPa, déjà retenues au stade du réexamen de sûreté de 2016) ont été obtenues à l'aide de 22 essais ayant permis de mesurer, sur une période de trente ans, les caractéristiques mécaniques des argiles de l'Aptien remaniées,
- les caractéristiques « dégradées » (valeurs respectivement de 20 ° et 5 kPa) correspondent aux valeurs minimales issues de ces essais.

L'IRSN estime que le couple de valeurs minimales retenu dans les études de sensibilité peut être considéré comme enveloppe des couples de valeurs mesurées par l'Andra dans les argiles de l'Aptien, qui constitueront la couche d'étanchéité, et que ce couple est représentatif de caractéristiques mécaniques peu performantes vis-à-vis de la stabilité. S'agissant des « moyennes basses » que l'Andra retient dans son modèle de référence pour évaluer la stabilité de la couverture, **l'IRSN estime que celles-ci sont raisonnablement enveloppes des valeurs mesurées.**

**L'IRSN considère néanmoins qu'au titre des bonnes pratiques l'Andra pourrait, dans les futures études prévues au niveau APD<sup>1</sup> retenir les valeurs minimales pour les sols cohérents dans tous les cas de modélisation et non uniquement dans le cadre d'études de sensibilité.** S'agissant de la couche de protection, l'IRSN constate que l'Andra ne dispose pas de mesures sur les argiles de l'Albien qui la constitueront. Aussi, **l'IRSN estime que l'Andra pourrait s'assurer, lors des études ultérieures, que ses caractéristiques réelles ne mettent pas en cause le caractère conservatif des valeurs retenues pour évaluer sa stabilité.**

---

<sup>1</sup> Étude d'Avant-Projet Détaillé (APD)

## 4. STABILITE ELEMENTAIRE DE CHAQUE COUCHE (E35-3)

Au stade du dossier de réexamen de sûreté de 2016, l'Andra avait transmis des analyses de stabilité globale des talus mais l'analyse des glissements susceptibles de se produire aux différentes interfaces internes du système multicouche de la couverture était manquante. Afin de vérifier que de tels glissements ne pourraient pas conduire à des désordres au sein de la couverture et *in fine* de la couche d'étanchéité, l'Andra s'était engagée à « *justifier la stabilité élémentaire de chaque couche intervenant dans la constitution de la couverture définitive* » (E35-3).

En réponse à cet engagement, l'Andra présente les résultats de la modélisation de la stabilité élémentaire de la couche de forme, de la couche d'étanchéité, de la couche de drainage, de la couche de filtre en sable et enfin de la couche de protection. Ces calculs de stabilité sont réalisés selon deux approches, à savoir la « pondération unitaire », telle que retenue pour les calculs en condition statique lors du dossier de réexamen de sûreté de 2016, et la « pondération Eurocodes » en conditions statique et sismique. A cet égard, bien que les Eurocodes s'appliquent à des ouvrages ayant une durée de vie comprise entre 50 et 100 ans, bien plus courte que celle visée pour la couverture définitive du CSA (300 ans), l'IRSN note que selon l'Andra, l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux sur cette durée devrait être limitée, dans la mesure où une éventuelle évolution du frottement des sols serait étroitement liée à celle de leur teneur en argile qui ne devrait pas être modifiée sur 300 ans. Sur cette base, l'IRSN considère que l'utilisation de l'approche Eurocodes dans les études de stabilité de la couverture du CSA est acceptable.

En considérant les caractéristiques géomécaniques « moyennes basses » obtenues à l'aide des 22 essais évoqués *supra*, les résultats des calculs de stabilité permettent à l'Andra de conclure, quelle que soit l'approche retenue, à la stabilité de chaque couche constituant la couverture (sols cohérents ainsi que non ou faiblement cohérents) en conditions statique et sismique.

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les résultats obtenus sur la base des valeurs minimales des essais permettent également de justifier la stabilité de la couche d'étanchéité en condition statique quelle que soit l'approche et en condition sismique en considérant l'approche de « pondération unitaire » avec des caractéristiques drainées, ce qui peut être considéré comme conservatif. L'Andra indique en effet que, compte tenu de la très faible perméabilité des sols cohérents, l'eau ne peut pas y circuler rapidement. Sous sollicitations sismiques, les argiles de l'Aptien ont alors un comportement non drainé se traduisant par une cohésion six fois plus grande que leur cohésion drainée (cette comparaison ayant été établie sur la base de quelques résultats d'essais), ce dont convient l'IRSN. En revanche, la stabilité de la couche d'étanchéité n'est pas démontrée en condition sismique par l'approche de « pondération Eurocodes ».

La stabilité élémentaire de chaque couche de la couverture étant justifiée en statique, et malgré l'absence de justification de la stabilité de la couche d'étanchéité en application de l'approche de « pondération Eurocodes » en condition sismique pour les valeurs minimales des caractéristiques géomécaniques des couches, l'IRSN considère, dans la mesure où la stabilité élémentaire de chaque couche de la couverture est justifiée sous sollicitations sismiques par l'une des deux approches, **que l'ensemble des éléments transmis par l'Andra répondent de manière suffisante à son engagement E35-3.**

## 5. PENTE DES TALUS (E35-4)

La stabilité des talus à 3H/1V du concept de référence de la couverture ne pouvant être considérée comme entièrement justifiée au stade du dossier de réexamen de sûreté de 2016, l'Andra avait étudié l'impact d'un adoucissement à 4H/1V de leur pente sur l'emprise de la couverture au sol. Cet adoucissement pouvait conduire à dépasser légèrement le périmètre de l'INB ; l'Andra indiquait néanmoins qu'il était possible d'envisager un tel dépassement du fait que son emprise foncière s'étendait au-delà de ce périmètre, et s'était engagée à « *préciser la valeur de la pente la plus faible possible atteignable pour les talus tout autour de la couverture compte tenu des emprises foncières dont elle disposerait [en 2020] au-delà des limites de l'INB* » (E35-4).

En réponse à son engagement, l'Andra a fourni 17 coupes régulièrement réparties tout autour du centre et représentant les pentes de talus du concept de référence de la couverture si elles s'étendaient jusqu'aux limites de sa propriété. Ces pentes sont comprises entre 6H/1V et 50H/1V. L'Andra a également précisé, au cours de la présente instruction, qu'un léger adoucissement des pentes demeurait possible à l'intérieur des limites de l'INB (pentes jusqu'à 3,5H/1V pour un talus s'arrêtant avant la route périphérique afin de préserver un passage permettant la surveillance du centre et pentes jusqu'à 4H/1V au-delà de cette route).

L'IRSN constate qu'il est possible, dans un objectif d'amélioration de la robustesse de la couverture le cas échéant, d'envisager la mise en place d'une couverture présentant des pentes adoucies par rapport au concept de référence dont les talus présentent des pentes de 3H/1V et **estime que l'engagement E35-4 peut être considéré comme soldé.**

## 6. MAITRISE DES TASSEMENTS ET COMPATIBILITE AVEC LE FONCTIONNEMENT DE LA COUVERTURE (E35-5)

Des tassements des matériaux sous-jacents à la couche d'étanchéité risqueraient, selon leur ampleur, d'une part, de générer des contrepentes sur les pans longitudinaux de la couverture (limités pour rappel à 1 %) susceptibles d'entraver le bon fonctionnement des dispositifs de collecte des eaux de ruissellement et, d'autre part, de conduire à la fissuration des argiles de l'Aptien constitutives de la couche d'étanchéité et par conséquent à une diminution de son étanchéité. L'ampleur des tassements attendus en toiture et en crête de talus n'avait pas été présentée au stade du dossier de réexamen de sûreté de 2016 et l'Andra s'était engagée à « *présenter les dispositions techniques envisageables permettant de maîtriser les tassements susceptibles de se produire sur la couverture à des niveaux demeurant compatibles avec le maintien des propriétés d'étanchéité de la couche d'argile et avec le bon fonctionnement des dispositifs de collecte des eaux de ruissellement* » (E35-5).

### Dispositions techniques envisageables pour maîtriser les tassements

Selon l'Andra, pour maîtriser les tassements susceptibles de se produire, il est nécessaire, d'une part, de minimiser les déformations des matériaux de la couche de forme en remblai et, d'autre part, de vérifier l'ampleur des déformations du sol d'assise (sous les ouvrages et les talus) par des simulations numériques s'appuyant sur l'évolution des tassements mesurés sous les lignes d'ouvrages déjà remplis du CSA.

S'agissant des remblais, l'Andra précise que les déformations de ces matériaux sont directement dépendantes de la qualité du compactage puisque leurs caractéristiques géomécaniques évoluent peu avec le temps, ainsi qu'indiqué *supra*. Or, l'Andra indique qu'il existe un retour d'expérience important concernant le compactage de terrain, en particulier au droit d'ouvrages en béton (*e.g.* culées de ponts, galeries du RSGE du CSA...). L'Andra présente également les dispositions techniques possibles pour maîtriser ces tassements (adaptation des épaisseurs des couches à compacter, taille des engins, ajout d'un liant hydraulique dans le remblai à proximité des ouvrages et au niveau des talus pour assurer la raideur de la couche de forme, etc.). Sur cette base, l'Andra estime que les tassements différentiels seront très limités, voire complètement évités, **ce qui n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

S'agissant du sol d'assise, l'Andra indique, sur la base d'observations des tassements au droit des ouvrages déjà construits au CSA et de simulations des tassements additionnels liés à la mise en place de la couche de forme puis de la couverture, que les tassements potentiellement attendus dans les zones inter-ouvrages ou au niveau des talus n'excéderont pas quelques dizaines de millimètres localement et engendreront une déformation maximale de la couche d'argile de 0,03 %. **L'estimation par l'Andra de la déformation du sol d'assise n'appelle pas de remarque à ce stade.**

### **Compatibilité des tassements attendus avec le bon fonctionnement de la couverture**

S'agissant de la collecte des eaux de ruissellement, l'Andra conclut sur la base des éléments présentés ci-dessus que les très faibles tassements différentiels attendus ne généreront pas des contrepenches des dispositifs de collecte des eaux de ruissellement. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

S'agissant du maintien des propriétés de la couche d'étanchéité à base d'argile de l'Aptien, l'Andra a présenté, au cours de l'expertise, les résultats d'une expérimentation *in situ* menée au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) et visant à déformer les argiles de l'Aptien afin de déterminer le taux de déformation à partir duquel des fissures sont susceptibles d'apparaître dans ces argiles. Ces essais ont été conduits, selon l'Andra, dans des conditions défavorables par rapport à celles qui prévaudront au sein de la couverture du CSA. En effet, la couche d'argile de l'expérimentation n'était pas confinée par d'autres couches de matériaux et la vitesse de déformation provoquée était très rapide. Les résultats concluent à une déformation admissible de 1,5 % avant l'apparition de fissures. L'IRSN note que cette déformation est près de 50 fois supérieure à la déformation maximale estimée de l'argile de l'Aptien dans les conditions de la future couverture du CSA en cas de tassements. En outre, l'IRSN convient du caractère pénalisant des conditions de l'essai réalisé sur les argiles de l'Aptien et relève que la taille de l'expérimentation (déformation sur une zone de 2,40 m<sup>2</sup>) peut être considérée comme suffisamment représentative des tassements qui pourront être rencontrés au CSA. Aussi, pour l'IRSN, les éléments de justification présentés par l'Andra **donnent une confiance suffisante en la capacité de la couche d'argile à assurer sa fonction d'étanchéité en tenant compte des différents tassements attendus au sein de la couverture.**

## **7. STABILITE GLOBALE DE LA COUVERTURE EN TENANT COMPTE DE SON EVOLUTION (E35-6)**

Dans l'objectif d'étudier les potentielles altérations de la stabilité globale de la couverture sur le long terme, l'Andra s'est engagée, à l'issue de l'instruction du dossier de réexamen de sûreté de 2016, à présenter « *une analyse de cette stabilité en tenant compte des effets du vieillissement, du gel, de la température, de la dessiccation et de l'absence d'impact des contraintes mécaniques* » (E35-6).

S'agissant des effets du gel, de la température et de la dessiccation sur la stabilité globale de la future couverture du CSA, l'Andra suit le comportement de la Structure Expérimentale de Couverture (SEC) déployée sur le centre. Cette structure, de type multicouche et dont les matériaux présentent une pente de toiture de 8 %, a été soumise à différentes conditions météorologiques (naturelles sur une période de plusieurs années comprenant une alternance d'étés très chauds et d'hivers très froids, puis forcées de manière pénalisante avec une augmentation des pluies par arrosage l'été suivie de 11 années consécutives de sécheresse extrême à l'abri d'une toiture). Les mesures réalisées sur les propriétés des matériaux mis en place et le calage du modèle numérique du comportement hydrique et hydraulique de la couverture multicouche ont permis à l'Andra, sur la base de simulations numériques prédictives, de justifier l'absence d'effet sur la stabilité pendant 300 ans dû au gel, à la température et à la dessiccation. L'IRSN considère que les conditions météorologiques testées depuis le début du suivi sur la SEC sont bien pénalisantes. L'IRSN constate néanmoins que les conclusions de l'Andra s'appuient sur une période d'observation qui demeure limitée par rapport à la durée de vie pluriséculaire envisagée pour la couverture du CSA. A cet égard, l'IRSN estime que l'Andra pourrait, via une surveillance adaptée de la couverture après sa mise en place, s'assurer que le comportement de l'ouvrage est en accord avec celui issu des simulations numériques prédictives.

S'agissant des effets du vieillissement des sols (couches) sur la stabilité globale de la couverture, l'Andra indique, comme mentionné précédemment (cf. réponse à l'engagement E35-3), que ceux-ci seront négligeables tout au long de sa durée de vie de 300 ans. L'Andra précise en outre que l'éventuel impact de ce vieillissement sur les contraintes mécaniques a bien été pris en compte dans la démonstration de la stabilité de la couverture en utilisant des valeurs conservatives pour les caractéristiques mécaniques des sols non cohérents et des valeurs

« moyennes basses » pour les sols cohérents (cf. réponse à l'engagement E35-2). **L'IRSN convient du bien fondé de cet argumentaire, mais rappelle qu'il pourrait être renforcé par la prise en compte, dans les futures études de l'Andra, des « valeurs minimales » des caractéristiques mécaniques obtenues sur les essais cités précédemment.**

## **8. CONCLUSION**

L'Andra a complété, conformément à l'engagement pris à l'issue de l'instruction du second réexamen de sûreté du CSA, ses études relatives à la couverture portant sur la justification de la pente des talus et à sa stabilité mécanique. L'IRSN estime que les éléments présentés par l'Andra sont satisfaisants à ce stade pour démontrer qu'il est possible de concevoir une couverture qui demeurera stable tout au long de la phase de surveillance du CSA. Aussi, l'engagement E35 peut, selon l'IRSN, être considéré comme soldé.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Delphine PELLEGRINI

Adjointe au Directeur de l'environnement