

Fontenay-aux-Roses, le 29 avril 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2021-00065

---

**Objet :** CEA / Centre de Cadarache  
Mise à jour de la PGSE à l'indice F - Hydrologie, Hydrogéologie et Géologie

---

**Réf. :** [1] Lettre ASN CODEP-DRC 2019-026294 du 18 juin 2019.  
[2] Lettre ASN Dep-DRD-n°0454-2008 du 12 août 2008.  
[3] Lettre ASN CODEP-DRC-2015-041353 du 3 novembre 2015.

---

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) sollicite l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la mise à jour des chapitres 2 (Hydrologie) et 3 (Géologie et Hydrogéologie) du volume 2 (Rapport Site) de la Présentation Générale de Sûreté de l'Établissement (PGSE) du centre de Cadarache (à l'indice F), transmise par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables (CEA).

Cette mise à jour fait suite aux demandes de l'ASN formulées par lettres citées en deuxième et troisième références, pour notamment prendre en compte l'actualisation des connaissances dans les domaines de la géologie et l'hydrogéologie et apporter des justifications complémentaires relatives au risque d'inondation d'origine externe sur le centre de Cadarache.

Par ailleurs, les nouveaux éléments relatifs à l'hydrologie et l'hydrogéologie présentés par le CEA dans cette mise à jour de la PGSE sont également examinés dans le cadre de cette expertise.

De l'évaluation des documents transmis, en tenant compte des éléments apportés par l'exploitant CEA au cours de l'expertise, l'IRSN retient les principaux points suivants.

### 1. GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE

En 2015, l'instruction de l'indice B du chapitre 3 du Volume 2 de la PGSE a mené l'ASN à formuler des demandes (annexe 1 de [3]) relatives au contexte géologique et au risque de liquéfaction des sols sur le centre de Cadarache (demandes n° 2.1, n° 2.2 et n° 4). **L'IRSN estime que les éléments de réponse apportés par le CEA relatifs à ces thématiques permettent de répondre de manière satisfaisante aux demandes de l'ASN précitées.**

S'agissant de la géologie du site, le CEA a présenté, au cours de l'expertise, une carte actualisée de la fracturation tectonique du centre de Cadarache, **ce qui satisfaisant**. À cet égard, l'IRSN estime que les failles, qui jouent un rôle important dans les circulations hydrauliques, devront être localisées sur la carte géologique du centre de Cadarache de manière exhaustive. **Ceci fait l'objet de l'attente n° 1 en annexe 2 au présent avis.**

S'agissant des risques de liquéfaction, la méthode proposée pour l'évaluation des remontées de nappe permet de disposer d'une approche commune pour l'ensemble des installations du centre, **ce qui est satisfaisant**. À cet égard, l'IRSN estime que cette méthode devra être référencée dans la PGSE du centre de Cadarache. **Ceci fait l'objet de l'attente n° 2 en annexe 2 au présent avis.**

## 2. HYDROGEOLOGIE

### 2.1. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES NAPPES

L'IRSN considère que l'exploitant a amélioré ses connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique des nappes du site en tenant notamment compte notamment des nouvelles investigations réalisées sur le centre de Cadarache, **ce qui est satisfaisant**.

Toutefois, les nouveaux éléments relatifs à l'hydrologie et à l'hydrogéologie présentés dans la mise à jour à l'indice C du chapitre 3 du Volume 2 de la PGSE, examinés par l'IRSN, appellent les remarques suivantes.

Tout d'abord, l'IRSN estime qu'il existe encore des incertitudes concernant les relations existantes entre les nappes du Quaternaire et du Miocène, lorsque ces deux nappes peuvent être clairement différenciées, et localement avec la nappe du Crétacé à la limite des formations Quaternaire et Crétacé. Aussi, l'IRSN estime que le CEA devrait poursuivre ses études pour compléter les connaissances sur le fonctionnement de la nappe du Quaternaire, dans l'objectif de consolider les données relatives aux transferts de pollution entre nappes ou vers les eaux superficielles à considérer lors des réexamens périodiques des installations du centre de Cadarache. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 1 en annexe 3 au présent avis.**

S'agissant des connaissances sur la nappe du Miocène, celles-ci restent limitées sur la partie aval du centre de Cadarache, ce qui entraîne des incertitudes sur les directions d'écoulement indiquées sur les cartes piézométriques. Lors de l'expertise, le CEA a indiqué qu'une étude a été initiée afin d'améliorer la compréhension des écoulements souterrains à l'échelle du centre de Cadarache. À cet égard, l'IRSN estime que le CEA devrait notamment compléter la connaissance hydrogéologique en aval de l'installation nucléaire de base (INB) n° 123 (LEFCA) et à la limite Ouest du centre de Cadarache. **Ces éléments conduisent l'IRSN à formuler l'observation n° 2 en annexe 3 au présent avis.**

S'agissant des cartes piézométriques, l'IRSN note que celles-ci sont relativement anciennes et présentent des sens d'écoulement parfois erronés. Aussi, l'IRSN estime que le CEA doit présenter des cartes piézométriques récentes pour les nappes du Miocène et du Crétacé. De plus, l'IRSN estime que les vitesses d'écoulement de la nappe du Miocène et du Crétacé devraient être mentionnées dans la PGSE du centre de Cadarache. **Ces éléments conduisent l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 en annexe 1 et l'observation n° 3 en annexe 3 au présent avis.**

Enfin, lors de l'expertise, l'IRSN a relevé que plusieurs piézomètres captant la nappe du Quaternaire sur le secteur Nord du centre de Cadarache ne sont pas mentionnés ou sont identifiés à tort comme des piézomètres captant la nappe du Miocène. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 4 en annexe 3 au présent avis.**

### 2.2. MODELISATION ET TRANSFERT DE NAPPE

Le CEA indique dans la PGSE que des outils sont mis en œuvre pour modéliser les écoulements au sein de chaque aquifère et simuler des transferts de substances radioactives. Toutefois, il n'apporte aucune information précise sur le modèle géologique et hydrogéologique de site, ainsi que sur les modélisations hydrogéologiques locales qui en découlent et qui sont utilisées pour évaluer les transferts en nappe dans le cadre des réexamens

périodiques des INB du centre de Cadarache. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 5 en annexe 3 au présent avis.**

À cet égard, lors de son expertise du dossier de réexamen périodique de l'INB n° 56 (Parc d'entreposage des déchets solides), l'IRSN a relevé que les valeurs de rétention des radionucléides considérés pour la modélisation des transferts dans la nappe du Miocène, issues de la bibliographie, présentent parfois des écarts avec le retour d'expérience de la surveillance radiologique effectuée sur le centre de Cadarache. De plus, d'une manière générale, le retour d'expérience de la surveillance radiologique relative aux installations nucléaires de base permet d'identifier une mobilité des radionucléides souvent plus forte que celle déduite de la bibliographie. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 6 en annexe 3 au présent avis.**

## 2.3. REPONSES AUX DEMANDES DE L'ASN

En 2015, l'instruction de l'indice B du chapitre 3 du Volume 2 de la PGSE a mené l'ASN à reconduire des demandes de 2008 [2] et à formuler des demandes complémentaires [3] relatives à l'état des connaissances du fonctionnement des nappes du Miocène et du Crétacé (piézométrie, vitesses d'écoulement, relation avec les eaux de surface), ainsi qu'à l'état radiologique des eaux souterraines (demandes n° 1.3.6 et n° 1.3.7 (annexe 2 de [2]) et demandes n° 1.1, n° 3.1, n° 3.2 et n° 5 (annexe 1 de [3])).

En réponse à la demande de l'ASN relative à l'origine des sources de l'Abéou, le CEA indique qu'elles peuvent constituer un des exutoires de la nappe du Crétacé circulant sous le centre, mais sans apporter d'éléments démonstratifs. Aussi, dans l'attente de compléments relatifs au risque de transfert de la nappe du Crétacé vers les sources de l'Abéou, **l'IRSN estime que la demande n° 1.3.6 de l'ASN (annexe 2 de [2]) ne peut être soldée.**

En réponse à la demande de l'ASN relative à l'hydrogéochimie du centre de Cadarache, l'IRSN relève que les informations présentées par le CEA dans la PGSE n'ont pas été mises à jour et **sont donc insuffisantes pour répondre à la demande n° 1.3.7 (annexe 2 de [2]) de l'ASN.** À cet égard, l'IRSN rappelle que cette demande vise à disposer d'un état des lieux complet de l'hydrogéochimie du centre de Cadarache qui ne se limite pas à la différenciation des signatures géochimiques des nappes. L'IRSN estime que les analyses physico-chimiques, désormais réalisées régulièrement dans le cadre des réexamens périodiques des INB du centre de Cadarache, pourraient être en partie réutilisées pour répondre à cette demande dans les secteurs non couverts par l'étude géochimique de 1999.

**Concernant les autres demandes de l'ASN relatives à l'hydrogéologie, l'IRSN estime que les réponses apportées par le CEA sont satisfaisantes et que les demandes n° 1.1, n° 3.1, n° 3.2 et n° 5 (annexe 1 de [3]) de l'ASN peuvent donc être soldées.**

## 3. RISQUE D'INONDATION EXTERNE

### 3.1. INONDATION HORS REMONTEE DE NAPPE

En 2015, l'instruction de l'indice B des chapitres 2 et 3 du Volume 2 de la PGSE a conduit l'ASN à formuler des demandes (annexe 1 de [3]) relatives au risque inondation d'origine externe (demandes n° 1.2, n° 6.1 et n° 6.2) visant à présenter dans la PGSE l'ensemble des situations à risque d'inondation (SRI) définies par le guide ASN n° 13. **L'IRSN estime que les réponses apportées par le CEA à ces demandes sont satisfaisantes dans le principe.**

Toutefois, les pluies de référence, présentées par le CEA dans la PGSE et retenues pour les situations de risque d'inondation (SRI) dues aux pluies locales (SRI PLU) et à la crue du Ravin de la bête (SRI CPB), n'ont pas été réévaluées depuis 2009. Aussi, l'IRSN estime que le CEA doit s'assurer que les pluies de référence retenues dans le cadre de l'évaluation des scénarii du risque d'inondation restent conservatives au regard des nouvelles

données météorologiques acquises et des nouvelles méthodes statistiques développées. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 2 en annexe 1 au présent avis.**

De plus, s'agissant de la SRI PLU, la méthode mise en œuvre par le CEA pour vérifier le bon dimensionnement des réseaux d'eaux pluviales se fonde sur la comparaison des débits ruisselés sur les bassins aux débits maximaux pouvant transiter au travers de ces réseaux. Dans ce cadre, le CEA ne mentionne pas dans la PGSE le scénario de ruissellement de surface, alors que ce dernier est présenté systématiquement dans les études spécifiques aux INB n° 22 et n° 56 et fait partie des scénarii à prendre en compte dans le cadre de la SRI PLU tel que préconisé par le guide ASN n° 13. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 3 en annexe 1 au présent avis.**

Par ailleurs, concernant le coefficient de ruissellement des bassins versants naturels (sols forestiers), le CEA a présenté, dans le cadre du dossier de réexamen périodique de l'INB n° 22, une étude visant à justifier le caractère conservatif de la valeur de 0,1 à l'échelle globale du centre de Cadarache, pour les pluies observées sur le site. Or, l'IRSN note que les épisodes pluvieux étudiés dans ce cadre sont caractérisés par des périodes de retour (5 ans au plus) bien inférieures à la période de retour de 100 ans préconisée par le guide ASN n° 13. De plus, l'IRSN estime que cette valeur ne permet pas de couvrir des hétérogénéités spatiales d'infiltration qui peuvent apparaître à l'échelle de sous-bassins versants de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares, notamment en cas d'évènements pluvieux extrêmes. À cet égard, le CEA a indiqué que, depuis le réexamen périodique de l'INB n° 22, une étude de sensibilité des coefficients de ruissellement est systématiquement réalisée, notamment en cas de sous dimensionnement des réseaux collecteurs ou de marges limitées en termes de capacité d'évacuation vis-à-vis du débit de ruissellement calculé. Ceci est satisfaisant dans le principe. Néanmoins, pour l'IRSN, ces études de sensibilité devraient également être appliquées à l'évaluation des risques d'inondation liés à une crue du ruisseau du Ravin de la Bête. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 7 en annexe 3 au présent avis.**

S'agissant du risque d'inondation lié à une crue du ruisseau du Ravin de la bête, le CEA a apporté des éléments soulignant les marges importantes observées entre les cotes de fil d'eau du Ravin de la Bête et les cotes topographiques des INB du centre à proximité du Ravin de la bête (entre 5 et plus de 30 m de différence). Compte tenu de ces marges, l'IRSN considère que le risque d'inondation des INB par débordement du ruisseau peut être écarté sur l'ensemble du linéaire du Ravin de la Bête. À cet égard, l'IRSN estime que les marges altimétriques permettant de justifier l'absence de risque d'inondation des INB du centre de Cadarache, présentées au cours de l'expertise, devront être intégrées dans la PGSE. **Ceci fait l'objet de l'attente n° 3 en annexe 2 au présent avis.**

### 3.2. INONDATION PAR REMONTEE DE NAPPE

Le CEA présente deux méthodes pour déterminer les niveaux de nappe extrêmes, adaptées à la dynamique de la nappe considérée, conformément aux préconisations du guide ASN n° 13. Dans les deux cas, l'initiateur est la pluviométrie considérée sur des durées différentes. Les remontées de la nappe du Miocène (cinétique lente) résultent de cumuls pluviométriques sur plusieurs dizaines de jours, alors que des cumuls sur quelques jours pilotent celles de la nappe du Crétacé (cinétique rapide).

En réponse à la demande de l'ASN relative à la détermination des niveaux extrêmes de la nappe du Miocène, le CEA a présenté dans la PGSE la méthode et son application aux INB concernées. **L'IRSN estime que ceci répond dans le principe à la demande de l'ASN n° 1.1 (annexe 2 de [3]). À cet égard, l'IRSN considère notamment que la démarche mise en œuvre par le CEA pour déterminer la chronique piézométrique de référence est satisfaisante.**

Toutefois, au regard des éléments examinés, l'IRSN identifie des améliorations à apporter à cette méthode pour les futures évaluations de niveaux extrêmes de la nappe du Miocène réalisées dans le cadre des réexamens périodiques des INB du centre de Cadarache. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 8 en annexe 3 au présent avis.**

De plus, au vu des éléments présentés dans le cadre de cette expertise, l'IRSN estime que le CEA devrait poursuivre l'acquisition de données piézométriques au titre de la surveillance de l'évolution des niveaux de la nappe du Miocène au droit des INB et en présenter un retour d'expérience lors des prochains réexamens périodiques des INB du centre implantées sur la nappe du Miocène. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 9 en annexe 3 au présent avis.**

Enfin, en réponse à la demande de l'ASN relative à la détermination des niveaux extrêmes de la nappe du Crétacé, le CEA a présenté une évolution de la méthode utilisée, notamment pour ce qui concerne la détermination de l'évapotranspiration potentielle. **L'IRSN estime que ceci répond dans le principe à la demande de l'ASN n° 1.2 (annexe 2 de [3]).** Toutefois, l'IRSN estime que le CEA devrait compléter la méthode présentée dans la PGSE pour ce qui concerne, d'une part la reconstitution des chroniques piézométriques avec une analyse comparative entre les niveaux de nappe mesurés et simulés, d'autre part la méthode d'extrapolation statistique. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 10 en annexe 3 au présent avis.**

## 4. CONCLUSION

Sur la base des documents examinés et en tenant compte des informations apportées par le CEA au cours de l'expertise, l'IRSN estime que le CEA a répondu de manière satisfaisante aux demandes de l'ASN, à l'exception de deux demandes (demandes n° 1.3.6 et n° 1.3.7 de l'annexe 2 de [2]), pour lesquelles des éléments restent à apporter.

Par ailleurs, si l'IRSN estime que la mise à jour de la PGSE à l'indice F constitue une avancée significative dans l'actualisation des connaissances dans les domaines de l'hydrologie, la géologie et l'hydrogéologie du centre de Cadarache, l'expertise des nouveaux éléments relatifs à ces thématiques conduit l'IRSN à formuler les recommandations et les attentes en annexes 1 et 2 au présent avis, que le CEA devra prendre en compte dans la PGSE du centre de Cadarache.

Enfin, afin d'améliorer ou de conforter les connaissances dans ces domaines, le CEA devrait tenir compte des observations formulées en annexe 3 au présent avis.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Eric LETANG

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

## **ANNEXE 1 A L'AVIS IRSN N° 2021-00065 DU 29 AVRIL 2021**

### **Recommandations de l'IRSN**

#### **Recommandation n° 1**

L'IRSN recommande que le CEA présente, dans la PGSE du centre de Cadarache, des cartes piézométriques récentes :

- de la nappe du Miocène en période de basses, moyennes et hautes eaux ;
- de la nappe du Crétacé au minimum en période de basses et hautes eaux.

#### **Recommandation n° 2**

L'IRSN recommande que le CEA justifie, dans la PGSE du centre de Cadarache, le caractère conservatif des pluies de référence retenues dans le cadre de l'évaluation des scénarii du risque d'inondation, au regard des nouvelles données météorologiques acquises au droit du centre et des stations avoisinantes et au regard des nouvelles méthodes statistiques développées notamment par Météo France.

#### **Recommandation n° 3**

L'IRSN recommande que le CEA présente, dans la PGSE du centre de Cadarache, pour la situation à risque d'inondation par les pluies locales (SRI PLU), la méthode mise en œuvre pour évaluer le ruissellement de surface en cas d'indisponibilité du réseau pluvial au droit des INB du centre de Cadarache.

## **ANNEXE 2 A L'AVIS IRSN N° 2021-00065 DU 29 AVRIL 2021**

### **Attentes de l'IRSN**

#### **Attente N° 1**

Il est attendu que le CEA intègre, dans la PGSE du centre de Cadarache, une cartographie actualisée de la fracturation tectonique et la représente sur la carte géologique du centre.

#### **Attente N° 2**

Il est attendu que le CEA référence, dans la PGSE du centre de Cadarache, la méthode mise en œuvre pour définir le niveau de nappe à considérer dans l'évaluation du risque de liquéfaction.

#### **Attente N° 3**

Il est attendu que le CEA intègre, dans la PGSE du centre de Cadarache, les éléments de justification, notamment les marges altimétriques, permettant d'écarter un risque d'inondation des INB du centre par débordement du Ravin de la Bête.

## ANNEXE 3 A L'AVIS IRSN N° 2021-00065 DU 29 AVRIL 2021

### Observations de l'IRSN

#### Observations relatives à la PGSE du centre de Cadarache

##### Observation n° 1

L'IRSN estime que le CEA devrait préciser, dans la PGSE du centre de Cadarache, le fonctionnement de la nappe du Quaternaire en :

- identifiant les zones où cette nappe est présente et en y évaluant les circulations locales ;
- caractérisant les relations existantes de cette nappe avec les nappes du Crétacé et du Miocène, notamment en fond de vallée (Ravin de la bête et Mourre Frais) et à la limite des formations du Crétacé et du Miocène (notamment au droit de la zone des tranchées de l'INB n° 56 et des INB situées dans le vallon de Mourre Frais).

##### Observation n° 2

L'IRSN estime que le CEA devrait compléter la connaissance hydrogéologique en aval de l'INB n° 123 et à la limite Ouest du centre de Cadarache afin de disposer de données plus précises sur les vitesses, les directions d'écoulement et les exutoires de la nappe du Miocène. Ces données devraient être présentées dans la PGSE du centre de Cadarache.

##### Observation n° 3

L'IRSN estime que le CEA devrait présenter, dans la PGSE du centre de Cadarache, les ordres de grandeur des vitesses observées dans la nappe du Miocène, ainsi que celles relatives à la nappe du Crétacé.

##### Observation n° 4

L'IRSN estime que le CEA devrait mettre à jour la liste des piézomètres du centre de Cadarache présentée en annexe 1 du chapitre 3 du volume 2 de la PGSE en tenant compte des investigations réalisées sur les différentes installations et en excluant les puisards T00 à T05 de l'INB n° 56.

##### Observation n° 5

L'IRSN estime que le CEA devrait présenter, dans la PGSE du centre de Cadarache, une description du modèle hydrogéologique du centre et des méthodes mises en œuvre pour la modélisation hydrogéologique à l'échelle des INB du centre de Cadarache.

##### Observation n° 6

L'IRSN estime que le CEA devrait identifier les paramètres de rétention des radionucléides d'intérêt pour la nappe du Miocène, en tenant compte des observations *in situ* et du retour d'expérience de la surveillance radiologique de cette nappe au droit du centre de Cadarache. Une synthèse de ces paramètres devrait être présentée dans la PGSE.

**Observation n° 10**

L'IRSN estime que le CEA devrait compléter la méthode de détermination des niveaux extrêmes de la nappe du Crétacé, présentée dans la PGSE du centre de Cadarache, par :

- pour ce qui concerne la reconstitution des chroniques piézométriques : une analyse comparative entre les niveaux de nappe mesurés depuis la dernière évaluation des niveaux extrêmes de la nappe du Crétacé (2012) et les niveaux de nappe simulés avec les modèles pluie - niveaux piézométriques à partir des nouvelles observations climatologiques et des paramètres de calage définis lors de la dernière évaluation ;
- pour ce qui concerne la méthode d'extrapolation statistique :
  - une vérification de la validité des ajustements mis en œuvre pour la méthode GP/MLM au moyen d'outils équivalents éprouvés,
  - la prise en compte des outils graphiques tels qu'utilisés dans le cadre de la méthode de la nappe du Miocène afin de conforter le seuil défini pour les ajustements réalisés à l'aide de la loi GP (approches statistiques GP/MOM et GP/MLM).

**Observations relatives aux prochains réexamens périodiques des INB du centre de Cadarache****Observation n° 7**

L'IRSN estime que le CEA devrait inclure des études de sensibilité aux valeurs de coefficients de ruissellement dans l'évaluation des risques d'inondation liés à une crue du ruisseau du Ravin de la Bête.

**Observation n° 8**

L'IRSN estime que, pour les futures évaluations de niveaux extrêmes de la nappe du Miocène réalisées dans le cadre des réexamens périodiques des INB du centre de Cadarache, le CEA devrait :

- s'assurer de l'indépendance des événements retenus dans les échantillons utilisés pour l'ajustement statistique à l'aide de la loi GEV ;
- considérer des valeurs d'ETP observées à la date de l'injection choisie et sur l'ensemble de la durée maximale de cumul testée (soit 200 jours) ;
- évaluer la pertinence de retenir, pour l'ensemble des durées de cumuls testés, une séquence d'intensité pluviométrique « type » après le dernier jour d'injection dans le modèle pluie - niveaux piézométriques, qui dépendrait de la durée et de l'intensité de la séquence centennale précédemment injectée, afin de pouvoir comparer l'influence des différentes durées de cumul de pluie sur les niveaux de nappe simulés.

**Observation n° 9**

L'IRSN estime que, dans le cadre des prochains réexamens périodiques des INB du centre de Cadarache implantées sur la nappe du Miocène, le CEA devrait présenter, au titre du retour d'expérience, une analyse comparative des niveaux de nappe mesurés et simulés avec le modèle pluie - niveaux piézométriques retenu pour évaluer le niveau de nappe extrême.