

Fontenay aux Roses, le 7 juillet 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

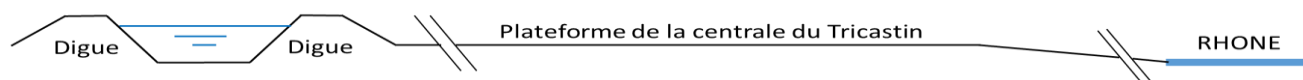
AVIS IRSN N° 2021-00124

Objet : EDF - REP - Centrale nucléaire du Tricastin - Stabilité au séisme de niveau noyau dur de la « digue en gravier » du canal de Donzère Mondragon – PT ECS 11.

Réf. : Lettre ASN CODEP-DCN-2019-022111 du 14 mai 2019.

Le centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) du Tricastin est situé à proximité immédiate du canal de Donzère Mondragon. Le niveau de la plateforme de cette installation étant situé à plusieurs mètres au-dessous du fil d'eau du canal, il existe un risque d'inondation du site en cas de dégradation, voire de rupture, de la digue située en rive droite de ce canal.

Canal de Donzère Mondragon



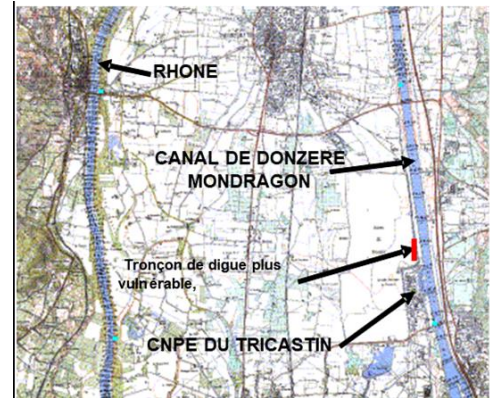
À la suite de l'accident de Fukushima et des **études complémentaires de sûreté** réalisées par EDF, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a prescrit à EDF un ensemble de dispositions ayant pour objectif de renforcer la résistance des centrales nucléaires à des événements extrêmes. L'ASN a notamment demandé à EDF, par sa prescription technique PT ECS 11, d'étudier le niveau de robustesse au séisme des digues du canal de Donzère Mondragon et des autres ouvrages de protection du CNPE du Tricastin contre l'inondation. Ce niveau de robustesse est jugé satisfaisant si les ouvrages conservent leur fonction de protection contre l'inondation à l'issue d'un séisme de niveau **noyau dur**¹ (SND).

À la suite de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi, un processus d'évaluation de la sûreté des installations nucléaires complémentaire aux réexamens périodiques a été engagé au niveau français et européen («stress tests»). En France, ce processus a pris le nom d'**évaluations complémentaires de sûreté**.

Le « **noyau dur** » est un ensemble de dispositions matérielles, humaines et organisationnelles permettant de gérer une situation accidentelle de perte totale des alimentations électriques et de la source froide potentiellement consécutive à une agression naturelle extrême (dite agression «noyau dur»).

¹ Le séisme noyau dur correspond au niveau de séisme à retenir pour l'étude du comportement des éléments du noyau dur défini au terme de l'analyse du retour d'expérience de l'accident de Fukushima-Daiichi.

Au terme de l'étude demandée, EDF a identifié les ouvrages de protection contre l'inondation comme étant les digues en rive droite du canal de Donzère Mondragon situées entre le point kilométrique (PK) 179,7 et le PK 185,2. EDF a également confirmé en 2013 la robustesse, à l'égard du SND, de l'ensemble des ouvrages, à l'exception d'un tronçon d'une longueur d'environ 500 m situé en limite nord du CNPE du Tricastin, appelé « **digue en gravier** ». Pour cette dernière, EDF a réalisé en 2015 et 2016 des **reconnaitances géotechniques**, puis une étude de la stabilité sismique qui a mis en évidence un défaut de stabilité de ce tronçon à l'égard du séisme majoré de sécurité² (SMS).



EDF a alors prévu de réaliser son confortement en deux phases :

- un confortement provisoire devant assurer la stabilité de l'ouvrage en cas de SMS. Il s'agit d'une recharge filtrante et drainante mise en place en octobre 2017 sur le talus aval³ ;
- un confortement pérenne devant assurer la stabilité de l'ouvrage en cas de SND. Dans ce cadre, des reconnaissances géotechniques complémentaires ont été réalisées en 2018, et les travaux correspondants seront effectués à partir de 2021.

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire a demandé l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le confortement pérenne de la « digue en gravier » du canal de Donzère Mondragon, en considérant le séisme de niveau noyau dur défini par EDF.

De l'évaluation des documents transmis par EDF, tenant compte des informations apportées au cours de son expertise et de ses propres analyses, l'IRSN retient les éléments suivants.

Dans l'objectif de préciser la nature et le comportement mécanique des matériaux constituant la digue, l'exploitant réalise des **reconnaitances géotechniques** qui consistent à diagnostiquer les terrains sous la surface du sol avec des outils mécaniques de sondage, ou à l'aide de méthodes géophysiques. Ces reconnaissances peuvent comprendre des forages, des essais in situ et des prélèvements d'échantillons pour examens ou analyses en laboratoire, mais aussi des mesures des paramètres physiques des sols et des roches, par exemple les vitesses de propagation d'ondes.



Copyright : Frédéric Coppin/
Médiathèque IRSN

1. SOLUTION DE CONFORTEMENT PERENNE

Les résultats de ses reconnaissances géotechniques ont conduit EDF à définir au sein de la « digue en gravier » trois secteurs aux caractéristiques distinctes :

- un secteur amont situé entre le PK 183,37 et le PK 183,59, aux caractéristiques défavorables, qu'EDF a dû conforter en 2017 par un dépôt important de remblai sur son talus aval ;

² Le séisme majoré de sécurité est le niveau sismique retenu pour le dimensionnement au séisme des installations nucléaires. Il est défini en ajoutant conventionnellement 0,5 à la magnitude du séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV). Ce dernier correspond au séisme le plus pénalisant susceptible de se produire sur une durée d'environ 1000 ans, évalué sur la base des séismes historiquement connus.

³ Le talus aval et les autres éléments d'une digue sont présentés sur la figure 1 en annexe.

- un secteur central situé entre le PK 183,59 et le PK 183,80, constitué de matériaux non liquéfiables⁴, dont la robustesse sismique a été confirmée lors d'une première expertise liée à la PT ECS 11 ;
- un secteur aval situé entre le PK 183,80 et le PK 183,90, considéré par EDF comme stable en cas de séisme de niveau SMS.

Une digue en terre telle que la « digue en gravier » ne peut se rompre à la suite d'un séisme que si une part suffisante de ses matériaux s'est liquéfiée. Dans ce cas, la chute de la résistance mécanique des matériaux liquéfiés permet le développement de surfaces de rupture (glissements) dans l'ouvrage. Une brèche se forme alors dans la digue si une surface de rupture emporte une fraction suffisante de la crête de la digue.

Dans les secteurs amont et aval de la « digue en gravier », les corps de digue sont principalement constitués de sables et de graviers de compacité variable et généralement non liquéfiables, mais ils reposent sur une ou deux couches de sable ou de sable limoneux susceptibles de se liquéfier en cas de SND.

Le projet de confortement pérenne retenu par EDF vise à assurer la stabilité du talus aval de la digue et à maîtriser les conséquences d'une défaillance de l'étanchéité du talus amont à la suite de l'occurrence d'un séisme de niveau noyau dur. Mettant en œuvre les techniques de confortement présentées sur la figure 2 en annexe, il se décline de la façon suivante :

- le secteur amont sera conforté par des colonnes ballastées en pied aval, apportant un drainage et une densification des matériaux alluvionnaires de fondation ;
- le secteur central ne nécessite pas de confortement. Toutefois, par homogénéité de traitement avec les secteurs amont et aval et pour drainer les éventuelles **percolations** en cas de défaut local de l'étanchéité du talus amont, un complexe filtrant et drainant sera mis en œuvre sur le talus aval de ce secteur. Le cas échéant, des **limons** seront déposés sur le talus aval de ce secteur ;
- le secteur aval sera conforté par une densification du corps de digue à l'aide de la technique d'injection solide, par un élargissement de la crête à l'aide d'une recharge filtrante et drainante placée sur le talus aval, ainsi que par des colonnes ballastées apportant un drainage des matériaux en pied aval.

La **percolation** désigne le passage d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable. Elle se fait majoritairement sous l'effet de la pesanteur, donc de haut en bas.

Le **limon** est produit par l'érosion fluviale des roches. Ses grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables c'est-à-dire entre 2 et 63 micromètres.

La faisabilité et l'efficacité des techniques de colonnes ballastées et d'injections solides ont été confirmées à l'aide de plots d'essai réalisés en 2020 dans les zones des confortements projetés.

Durant la phase de travaux de confortement du secteur aval, la recharge provisoire placée en 2017 sera déposée et la stabilité en cas de séisme de niveau SMS devra être maintenue.

Les conclusions de l'IRSN concernant la solution de confortement pérenne de la « digue en gravier » sont les suivantes. Pour les secteurs amont et aval, la présence des colonnes ballastées limite les phénomènes de liquéfaction en pied de talus aval, donc les risques de glissement de ce talus. Pour le secteur aval, le traitement par injections solides du corps de digue empêche la liquéfaction étendue de la couche de sable au sein de ce corps de digue, qui pourrait favoriser la formation d'instabilités simultanées des talus amont et aval. Par ailleurs, les recharges filtrantes et drainantes placées sur les talus aval des différents secteurs concourent au même objectif de préservation de l'intégrité de la crête de digue.

En conséquence, l'IRSN estime que le confortement pérenne proposé par EDF est de nature à améliorer sensiblement le comportement de la « digue en gravier » en cas de séisme.

⁴ La liquéfaction est un phénomène dû à l'augmentation de la pression interstitielle dans un sol saturé en eau lorsque celui-ci est soumis à un cisaillement statique, cyclique rapide ou sismique en l'absence de drainage. Cela conduit à une perte de résistance du sol et à son écoulement.

2. MODELISATION DE LA DIGUE

Pour ce qui concerne la connaissance et la modélisation des deux secteurs de la « digue en gravier » à conforter, l'IRSN considère d'une part que les reconnaissances complémentaires réalisées en 2018 sont suffisantes, d'autre part que la **stratigraphie** et les caractéristiques mécaniques des matériaux retenues par EDF dans ses études sont cohérentes avec les résultats de ces reconnaissances et des données supplémentaires recueillies lors de la réalisation des plots d'essai. De plus, l'IRSN estime que les études, présentées par EDF, de la susceptibilité à la liquéfaction des matériaux de la « digue en gravier », notamment celles relatives aux limons du secteur aval, sont conformes à l'état de l'art et cohérentes avec les données géotechniques disponibles.

Enfin, l'IRSN observe que les niveaux d'eau dans la digue retenus par EDF pour ses différentes études correspondent à une **piézométrie** haute au regard des valeurs mesurées, ce qui est satisfaisant.

La **stratigraphie** correspond à la succession et à la description de la nature des différentes couches géologiques ou strates.



Copyright : Geneviève Baumont/Médiathèque IRSN

La **piézométrie** est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine.

3. STABILITE DE LA DIGUE EN CAS DE SND

EDF justifie la stabilité de la digue sur la base d'analyses dynamiques non linéaires de l'ouvrage soumis au chargement sismique de niveau SND, et de calculs statiques en situation post sismique dans le cas où une partie des matériaux de la digue aurait été liquéfiée durant quelques secondes. Dans la situation post sismique, il est supposé que le niveau de la nappe dans la digue s'est élevé jusqu'à la saturation complète, à la suite d'un **décolmatage** total du parement du talus amont dû aux sollicitations sismiques. **L'IRSN estime acceptable la démarche de justification adoptée par EDF. Notamment, les critères de stabilité retenus par EDF sont conformes à l'état de l'art dans le domaine des ouvrages hydrauliques.**

Les résultats des études présentées par EDF font exclure tout risque d'instabilité de la digue de nature à conduire à une brèche dans l'ouvrage, bien qu'à la suite d'un séisme de niveau noyau dur des désordres limités soient envisageables. Enfin, l'amélioration du drainage de l'ouvrage, surtout pour le talus et le pied aval, conduit à une diminution rapide des pressions interstitielles après la fin du séisme. L'IRSN n'a pas de remarque à formuler sur ces résultats.

L'IRSN souligne que l'état de l'art relatif aux digues et barrages conduit à la prise en compte d'une réplique du séisme retenu pour la justification de l'ouvrage, quand l'importance de ce dernier le justifie. EDF ne présente pas d'analyse de ce type mais, en se fondant sur ses **calculs dynamiques** de la digue, observe que les pressions interstitielles susceptibles d'engendrer une liquéfaction de certains matériaux se dissipent suffisamment rapidement après l'occurrence du SND pour que ces matériaux retrouvent leurs propriétés initiales avant une réplique éventuelle. Ainsi, cette dernière ne serait pas de nature à mettre en danger la « digue en gravier » confortée pour un séisme de niveau noyau dur. L'IRSN note la position d'EDF, mais estime souhaitable d'évaluer la stabilité de cette digue en cas de

Pour retenir l'eau, une digue doit être suffisamment étanche. Pour cela, trois options : soit elle est intrinsèquement étanche (car faite d'argiles par exemple), soit on pose sur son talus amont (intérieur) un revêtement étanche, soit on laisse ce talus se colmater naturellement sur une certaine profondeur, avec les particules argileuses et limoneuses que charrient les eaux du canal. Les digues du canal de Donzère relèvent de cette dernière catégorie. En cas de séisme suffisamment fort pour déformer ce talus, la continuité de la couche colmatée risque d'être affectée. On parle alors de **décolmatage**.

L'effet d'un séisme sur un ouvrage (bâtiment, digue, ou autre) est d'imposer un mouvement alterné à sa base. Lorsque l'on veut représenter par des calculs (forcément complexes) ce que subit l'ouvrage au cours du séisme, on impose à la base d'un modèle représentant cet ouvrage, le mouvement du séisme, qui varie au cours du temps. On parle alors de **calcul dynamique**, par opposition à un calcul statique dans lequel la sollicitation imposée au modèle est fixe.

réplique de niveau SMS suivant un séisme de niveau noyau dur. En se fondant sur ses propres études qui comprennent le cas d'une réplique de niveau SMS intervenant après la dissipation des surpressions interstitielles dans les matériaux ayant subi une liquéfaction pendant le séisme de niveau noyau dur, l'IRSN estime que la stabilité post-sismique de la « digue en gravier » confortée de manière pérenne est vérifiée.

4. STABILITE DE LA DIGUE DURANT LA PHASE DE TRAVAUX

Pour ce qui concerne le secteur aval de la « digue en gravier », le projet de réalisation du confortement pérenne comprend une période d'environ deux mois pendant laquelle la recharge de remblai mise en place en 2017 sur le talus aval sera déposée et les colonnes ballastées ne seront pas encore réalisées, ce qui affectera défavorablement les conditions de stabilité de ce talus. Toutefois, les injections solides du corps de digue auront déjà été réalisées, ce qui favorise la stabilité d'ensemble de l'ouvrage. EDF présente donc une justification en cas de séisme de niveau SMS de la stabilité du secteur aval, sans remblai aval mais en tenant compte des injections solides.

La méthodologie retenue par EDF pour ses études de stabilité à l'égard d'un séisme de niveau SMS est analogue à celle présentée pour le séisme de niveau noyau dur. Les résultats de ces études permettent de confirmer la stabilité en cas de SMS, ainsi que pour une situation post-sismique où les matériaux ayant pu être liquéfiés sont affectés de caractéristiques mécaniques réduites.

De plus, EDF présente un calcul dynamique de l'ouvrage soumis à une réplique sismique de niveau égal au séisme maximum historiquement vraisemblable (SMHV), en supposant un niveau de la nappe correspondant à la saturation complète dans la digue, à la suite d'une dégradation de l'étanchéité du parement amont due aux sollicitations du SMS. Les résultats de ce calcul font apparaître une absence de liquéfaction des matériaux de la digue et de sa fondation, ainsi que des déplacements centimétriques dans l'ouvrage. En conséquence, EDF considère que la stabilité sismique de la digue durant la phase des travaux est assurée en cas de SMS suivi d'une réplique.

L'IRSN estime satisfaisante la vérification par EDF du comportement du secteur aval de la digue en gravier durant la phase de travaux en cas de séisme de niveau SMS, le cas échéant suivi d'une réplique de niveau SMHV.

5. RISQUES D'EROSION INTERNE

Dans son dossier de justification du confortement pérenne de la « digue en gravier », EDF ne présente pas d'analyse du risque **d'érosion interne**. Toutefois, l'IRSN rappelle que ce risque a déjà été examiné en 2017 et écarté pour un séisme de niveau SMS, et que le projet de confortement pérenne comporte des dispositions, notamment des filtres, des recharges et des drainages placés sur le talus et le pied aval de l'ensemble de la « digue en gravier », qui sont de nature à prévenir tout développement d'une éventuelle amorce d'érosion interne. **En conséquence, l'IRSN considère que le risque d'une érosion interne survenant dans la « digue en gravier » à la suite d'un séisme de niveau noyau dur est exclu, sous réserve que la surveillance et l'entretien des ouvrages soient adaptés.**

L'érosion interne se caractérise par l'entraînement de grains d'un sol sous l'effet d'un écoulement d'eau dans ce sol à l'intérieur de l'ouvrage. Dans certaines conditions, ce phénomène peut conduire à une rupture d'une digue en terre.

Ce phénomène est la première cause connue de rupture de barrages ou de digues en terre.

6. SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DE L'ENSEMBLE DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE L'INONDATION

EDF présente le dispositif d'auscultation et les programmes de surveillance visant, d'une part la « digue en gravier » durant la phase de travaux de confortement pérenne, d'autre part l'ensemble des digues en rive droite du canal de Donzère Mondragon constituant les ouvrages de protection du CNPE contre l'inondation. Le dispositif d'auscultation est composé de près d'une centaine de piézomètres⁵ et de quelques appareils de mesure de débit placés en des pieds de talus où des suintements ont été observés. **L'IRSN estime que ces dispositions sont de nature à garantir le bon comportement dans le temps des ouvrages concernés.**

Pour ce qui concerne les documents de surveillance, l'IRSN souligne qu'un registre de l'ouvrage est tenu à jour par le CNPE et qu'un rapport de surveillance du CNPE, un avis technique relatif aux données d'auscultation et un rapport de l'examen visuel approfondi sont établis annuellement, ce qui est satisfaisant.

7. CONCLUSION

En conclusion de son expertise, l'IRSN estime que le confortement pérenne de la « digue en gravier » proposé par EDF permet de garantir l'absence de brèche dans cet ouvrage, et donc de protéger le CNPE du Tricastin d'une inondation en cas de séisme de niveau noyau dur.

De plus, l'IRSN estime suffisantes les dispositions prévues par EDF pour garantir la résistance au SMS de cette digue durant la phase de travaux de confortement.

Enfin, l'IRSN estime que le dispositif d'auscultation et les programmes de surveillance présentés par EDF pour l'ensemble des digues en rive droite du canal de Donzère Mondragon constituant les ouvrages de protection du CNPE du Tricastin contre l'inondation sont de nature à garantir le bon comportement dans le temps de ces ouvrages.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

⁵ Un piézomètre est un tube vertical placé dans la digue et permettant de mesurer le niveau de l'eau souterraine dans l'ouvrage.

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00124 DU 07 JUILLET 2021

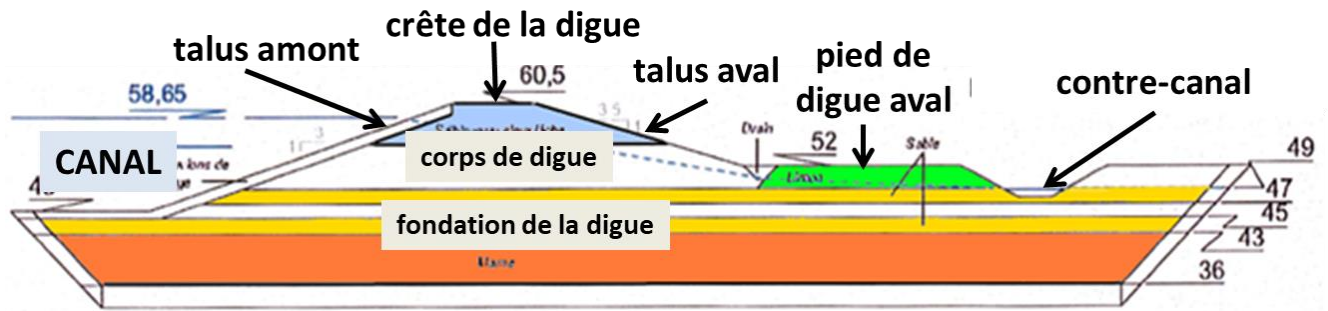


Figure 1. Coupe type d'une digue en rive droite du canal de Donzère Mondragon

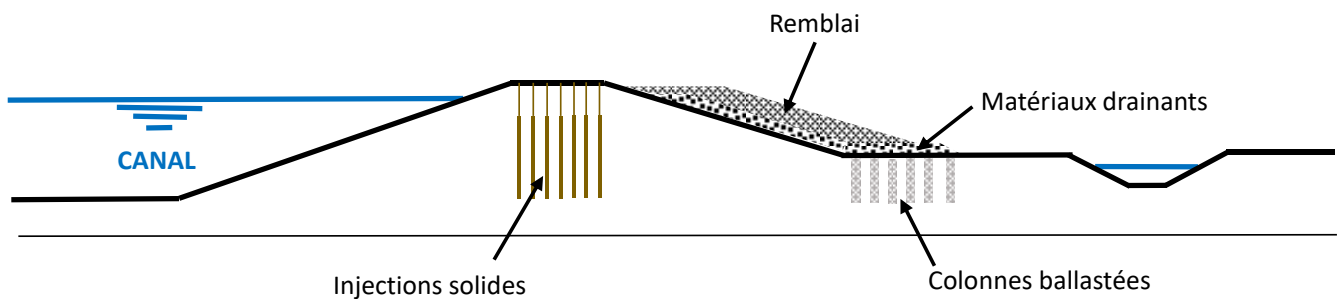


Figure 2. Techniques de confortement utilisées pour la « digue en gravier »