



**Direction des déchets,  
des installations de recherche et du cycle**

N/Réf. : CODEP-DRC-2019-005828

Montrouge, le 28 mai 2019

**Monsieur le directeur général de l'Andra  
Parc de la Croix Blanche  
1-7, rue Jean Monnet  
92298 CHATENAY MALABRY Cedex**

**Objet : Étude PNGMDR 2016-2018 : comportement physico-chimique et thermique des colis de déchets bitumés en stockage**

**Références :** *in fine*

Monsieur le directeur,

Dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) 2016-2018, l'Autorité de sûreté nucléaire et l'Autorité de sûreté nucléaire de Défense ont instruit le rapport remis par le CEA [1] intitulé « *Comportement physico-chimique et thermique des colis de boîtes bitumées pendant les phases d'entreposages, puis de stockage réversible et au-delà* ». Ce document a été remis en application de l'article 46 de l'arrêté du 23 février 2017 [2], qui dispose que : « *Le CEA, en lien avec l'Andra et les propriétaires de déchets bitumés, poursuit les études sur le comportement des colis de déchets bitumés (notamment réactivité et vieillissement) en vue de disposer des données scientifiques et techniques nécessaires à l'évaluation de leur comportement physico-chimique et thermique pendant la phase réversible du stockage et au-delà. Si elle l'estime nécessaire, l'Andra communique au CEA en amont des études les éléments sur le comportement des colis bitumés dont elle souhaite disposer pour l'élaboration de la démonstration de sûreté de Cigéo. Pour le 30 juin 2017, le CEA remet un rapport décrivant l'ensemble des résultats disponibles aux ministres chargés de l'énergie, de la sûreté nucléaire et de la défense.* »

Cet article dispose également : « *Pour le 30 juin 2018, l'Andra remet aux ministres chargés de l'énergie, de la sûreté nucléaire et de la défense un rapport d'analyse sur l'impact de ces résultats sur les conditions d'accueil des colis de déchets bitumés dans Cigéo.* »

L'inventaire total des colis de déchets bitumés entreposés sur le site du CEA à Marcoule représente environ 62 000 colis, dont 29 000 de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et 33 000 de faible activité à vie longue (FA-VL). Ils ont été produits par la station de traitement des effluents liquides (STEL) de l'INBS de Marcoule depuis 1966. Orano entrepose également près de 13 000 colis de déchets bitumés MA-VL à La Hague, produits par les installations STE2 et STE3.

En conditions d'entreposage ou de stockage, le risque principal de ces déchets est la possibilité d'un amorçage de réactions exothermiques internes à un colis de déchets bitumés, par réactions d'oxydoréduction entre sels ou par réactions sels-bitume, à la suite d'un apport d'énergie d'activation externe (cas d'un incendie ou d'une montée en température) et en présence suffisante d'oxygène. Une fois ces réactions exothermiques amorcées, un emballement thermique peut se produire, pouvant entraîner une inflammation de la matrice bitumée. Cette inflammation peut entraîner la dégradation du colis, l'amorçage de réactions exothermiques dans les colis voisins, et l'altération des performances des ouvrages de stockage, pouvant générer une dissémination importante de radionucléides dans l'environnement

Ce sujet a fait l'objet d'un programme d'études quadripartite entre l'Andra, le CEA, EDF et Orano portant sur la connaissance du comportement physico-chimique des colis de déchets bitumés, en réponse à une demande de la commission nationale d'évaluation dans son rapport de novembre 2012. Les résultats de ce programme ont été analysés dans le cadre de l'instruction, en 2016, de la stratégie de gestion des déchets radioactifs anciens et de démantèlement de l'INBS du CEA de Marcoule [3], puis dans le cadre de l'instruction, en 2017, du dossier d'options de sûreté de Cigéo [4]. Ce programme a été complété par les documents transmis par le CEA à l'IRSN en décembre 2016 [5] et à l'ASND en décembre 2017 [6] à la suite de la lettre du 10 février 2017 [7].

Par lettre du [8], à la suite de l'instruction des études [1], [5] et [6], l'ASN et l'ASND ont fait part au CEA, à EDF et à Orano, de demandes permettant de préciser certains éléments du comportement physico-chimique et thermique des colis de déchets bitumés nécessaires à la démonstration de sûreté de Cigéo.

Veillez trouver ci-dessous les conclusions et demandes à prendre en compte pour la demande d'autorisation de création de Cigéo, dont la remise est prévue au premier semestre 2020.

#### I. Déclenchement de réactions exothermiques:

Dans l'étude de décembre 2017 [6], le CEA, à la suite d'essais de microcalorimétrie, présente une réinterprétation des thermogrammes obtenus précédemment, au travers des paramètres supplémentaires suivants :

- la température en dessous de laquelle les réactions exothermiques sont considérées non significatives, à savoir celles pour lesquelles la puissance est inférieure à 0,5 mW/g. Cette température est appelée « *température de déclenchement de réactions exothermiques* » ;
- la puissance et les énergies dégagées dans différents intervalles de température.

Ces paramètres supplémentaires permettent d'évaluer de manière effective la température de déclenchement des réactions exothermiques pour chaque essai, et d'apprécier les énergies libérées sur différents intervalles de température.

À partir de modèles mathématiques développés sur la base de lois des mélanges, le CEA évalue les quantités d'intérêt précitées pour les différentes périodes de production des colis de déchets bitumés.

Les principaux résultats expérimentaux et de la loi des mélanges obtenus à partir de la réinterprétation des thermogrammes au regard des paramètres d'intérêt précités sont que :

- les températures de déclenchement des réactions exothermiques se situent en grande majorité entre 150 et 250 °C (pour 93 des 97 échantillons exploitables). Cependant, un nombre restreint d'essais (4) présente des températures de début de réaction exothermiques proches ou inférieures à 100 °C (88 °C et 91 °C pour une composition représentative de colis de déchets bitumés produits pendant la période 2, 104 °C pour une composition représentative de colis de déchets bitumés produits pendant les périodes 3 et 4, et 123 °C pour une composition représentative de colis de déchets bitumés produits pendant la période 5) ;
- la réactivité de l'ensemble des échantillons testés est moindre entre 20 et 150 °C qu'entre 150 et 200 °C ;
- les énergies maximales dégagées par les réactions exothermiques sont de 48 J/g sur la plage 50 - 150 °C et de 91 J/g sur la plage 50 - 200 °C ;
- les puissances maximales à 200 °C<sup>1</sup> ne dépassent pas 4 mW/g.

A la suite de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS), l'ASN a indiqué dans son avis du 11 janvier 2018 [9] que « *la recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés doit être privilégiée. En parallèle, des études visant à modifier la conception pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques doivent être conduites. En tout état de cause, la caractérisation dans les meilleurs délais de ces colis de déchets bitumés par leurs producteurs est un préalable indispensable.* »

Dans l'état actuel des études et concernant Cigéo, l'ensemble de ces résultats (expérimentaux et issus de modèles) permet de retenir que la possibilité de déclencher des réactions exothermiques pouvant conduire à un emballement peut raisonnablement être considérée comme très faible en dessous d'une température de l'ordre de 100 °C. Par ailleurs, une énergie de 90 J/g est une valeur majorante de l'exothermicité des enrobés bitumés pour les compositions retenues. Ces valeurs pourront être utilisées dans le cadre de la démonstration de la maîtrise des risques liées à l'incendie.

Cependant, bien que cette démarche permette de fournir un cadre utile pour apprécier la réactivité thermique des colis de déchets bitumés et de définir les paramètres à considérer dans les études de sûreté, elle ne peut garantir que les domaines de compositions évalués soient représentatifs de la totalité de l'inventaire des colis de déchets bitumés. En effet la connaissance détaillée de la composition chimique des colis de déchets bitumés et de leurs hétérogénéités sont soumises à une variabilité importante induite par :

- les conditions de fabrication,
- le vieillissement (agrégation/sédimentation de sels),
- les méthodes de mesures et de caractérisations des colis de déchets bitumés, notamment dans le cadre des opérations de reprise et de reconditionnement des colis (RCD) de déchets bitumés entreposés dans les casemates 1 et 2 de la STEL. Les caractérisations réalisées pendant ces opérations n'étaient pas destinées à caractériser la réactivité chimique des colis en RCD et ont concerné seulement 1 % de la population des colis de déchets en RCD, avec une seule prise d'échantillons.

---

<sup>1</sup> Température de début de pyrolyse de l'enrobé

**Par conséquent, même si les paramètres retenus ci-dessus sont pertinents dans les études de sûreté, les résultats obtenus à ce jour à la suite de la réinterprétation des thermogrammes (température seuil et énergie majorante) ne permettent pas d'apporter la démonstration de l'exclusion du risque d'emballement.**

L'article 3.9 de l'arrêté du 7 février 2012 [10] précise en effet que *« la démonstration de sûreté nucléaire doit justifier que les accidents susceptibles de conduire à des rejets importants de matières dangereuses ou à des effets dangereux hors du site avec une cinétique qui ne permettrait pas la mise en œuvre à temps des mesures nécessaires de protection des populations sont impossibles physiquement ou, si cette impossibilité physique ne peut être démontrée, que les dispositions mises en œuvre sur ou pour l'installation permettent de rendre ces accidents extrêmement improbables avec un haut degré de confiance. »*

À cet égard je vous rappelle la demande [2018-D-10] issue de la lettre de suite du DOS de Cigéo [9] : *« Je vous demande, si vous envisagez le stockage en l'état de tout ou partie des colis de déchets bitumés de présenter, dans le dossier de demande d'autorisation de création, des modifications de conception pour exclure le risque d'emballement des réactions exothermiques, concernant notamment :*

- *les dispositions de surveillance permettant de détecter au plus tôt une montée progressive de la température ;*
- *les dispositions prévues en cas d'incendie pour empêcher des réactions exothermiques des colis de déchets bitumés et la propagation à un ou d'autres colis ;*
- *les mesures de limitation des conséquences vis-à-vis de la dissémination de matière radioactive à la suite d'une dégradation thermique des colis. »*

Dans ce cadre, je considère que **l'Andra pourra retenir comme base de conception une température seuil de 100 °C en peau de colis primaire et une valeur maximale d'énergie de 90 J/g, afin de disposer de marges de sûreté importantes, eu égard à la variabilité de composition des colis de déchets bitumés.**

**[Andra-Art46-1] Je vous demande de définir et de considérer un scénario d'emballement et de perte de confinement d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage, afin d'identifier les dispositions nécessaires pour limiter les conséquences de ce scénario et pour garantir l'absence de propagation de l'emballement aux colis de stockage voisins.**

La demande **[Andra-Art46-1]** est à considérer dans la réponse que vous apporterez aux points deux (pour la propagation) et trois de la demande [2018-D-10] issue de la lettre de suite du DOS de Cigéo [9].

L'article 3.1 de l'arrêté du 7 février 2012 [10] précise que *« l'exploitant applique le principe de défense en profondeur, consistant en la mise en œuvre de niveaux de défense successifs et suffisamment indépendants visant, pour ce qui concerne l'exploitant, à : - maîtriser les accidents n'ayant pu être évités ou, à défaut, limiter leur aggravation, en reprenant la maîtrise de l'installation afin de la ramener et de la maintenir dans un état sûr [...] ».*

**[Andra-Art46-2] Je vous demande de prévoir les dispositions qui permettent, après extinction d'un incendie, de surveiller l'état thermique des colis de déchets bitumés.**

Je vous rappelle par ailleurs que, dans son avis du 11 janvier 2018 [9], l'ASN estime nécessaire que *« l'Andra présente, dans sa demande d'autorisation de création les enjeux de sûreté, en exploitation comme à long terme, liés au rétablissement des diverses fonctions du stockage à la suite d'une situation accidentelle ainsi que leur prise en compte et leur déclinaison dans la conception de l'installation, en distinguant en particulier :*

- *la possibilité de poursuivre les opérations de stockage,*
- *la possibilité de retirer des colis, impliqués ou non dans la situation accidentelle,*

- *la possibilité de mise en œuvre des opérations de fermeture du stockage.* »

## II. Radiolyse et évaluation du gonflement induit :

Le CEA présente, dans sa note de juin 2017 [1], la synthèse des calculs<sup>2</sup> de production d'hydrogène de radiolyse et du gonflement induit, pour les enrobés de la STEL de Marcoule.

**Le débit maximal annuel de production d'hydrogène estimé par colis de déchets bitumés produit à Marcoule permet, à ce stade des évaluations, de respecter le critère d'acceptation des colis primaires à Cigéo, à ce jour égal à 10 NL/an/colis primaire<sup>3</sup>. Ce point devra être confirmé ultérieurement.**

Par ailleurs, lors de calculs préliminaires, le CEA a évalué que le gonflement maximal induit par radiolyse n'était pas de nature à remettre en cause la résistance mécanique des colis de stockage retenus à ce jour dans le cadre du projet Cigéo.

**[Andra-Art46-5] Je vous demande de confirmer l'absence d'impact d'un gonflement des colis de déchets bitumés induit par radiolyse pour le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, en tenant compte des choix de dimensionnement des colis de stockage et des exigences de sûreté qui leur sont associées.**

## III. Reprise d'eau à long terme et évaluation du gonflement induit :

La mise à la pression atmosphérique des argilites du Callovo-Oxfordien lors du creusement des galeries et alvéoles entraîne une désaturation des ouvrages de Cigéo durant sa phase d'exploitation. À long terme, le stockage se resature en eau jusqu'à l'atteinte d'un équilibre hydrostatique au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce phénomène conduit à une reprise d'eau des colis de déchets bitumés à long terme, qui pourrait en particulier se traduire par un gonflement de la matrice bitumée, du fait de la formation de poches de solutions salines consécutives à la diffusion de l'eau dans la matrice.

Afin d'évaluer ces effets potentiels sur la roche hôte, des essais de gonflement sous eau d'enrobés bitumés de synthèse de compositions représentatives des colis de déchets bitumés de la STEL de Marcoule sont menés par le CEA. Ces essais, réalisés à volume contraint dans une solution représentative des conditions de l'environnement cimentaire des alvéoles de stockage MA-VL, amènent, à ce stade, à considérer une pression de gonflement d'au moins 20 MPa<sup>4</sup>.

**Je note dès à présent que des effets mécaniques importants pourraient s'exercer sur la roche hôte, puisque la pression lithostatique de la roche sur la galerie est évaluée par l'Andra à environ 12 MPa.** Cependant, les essais actuellement réalisés ne sont pas complètement représentatifs des conditions opérationnelles de l'environnement de stockage, dans la mesure où la présence de vides résiduels, notamment dans l'alvéole de stockage, qui pourraient faire diminuer la pression de gonflement, n'est pas prise en compte. Le CEA poursuit des études à cet égard, en lien notamment avec EDF pour modéliser les phénomènes physiques mis en jeu. Par ailleurs, la demande [Producteurs-Art46-8] de la

---

<sup>2</sup> Ces calculs intègrent le terme source en hydrogène, en fonction du spectre radiologique et du rendement radiolytique estimé des espèces radiolysables, l'évolution de la viscosité avec la dose et l'évaluation du gonflement induit en fonction du terme source gazeux et de la viscosité.

<sup>3</sup> NL = Normo litre : volume occupé par un gaz dans des conditions normales de température et de pression.

<sup>4</sup> Le CEA précise toutefois que la poursuite de ces essais est nécessaire sur de plus longues échéances, la valeur maximale d'asymptote n'étant pas encore atteinte.

lettre ASN - ASND [8] demande des compléments sur les échantillons de synthèses utilisés pour ces essais de gonflement.

**[Andra-Art46-6] Je vous demande ainsi de tenir compte, de manière raisonnablement prudente, du phénomène de gonflement induit par la reprise d'eau à long terme, et ce en lien avec l'avancement des études complémentaires menées par les producteurs, lors de la remise du dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo.**

IV. Informations complémentaires à venir :

L'ASN et l'ASND, dans leur lettre [8], ont formulé plusieurs demandes sur la caractérisation et le comportement des colis de déchets bitumés (caractérisation complémentaire de certaines familles de colis de déchets bitumés, évolution des propriétés physiques des colis de déchets bitumés gouvernant les mécanismes de transfert de chaleur, caractère confinant de la matrice bitume, détermination des incertitudes). Les réponses du CEA à ces demandes devront être prises en considération dans la démonstration de sûreté.

Par ailleurs, la revue sur la gestion des déchets bitumés, dont les travaux ont débuté le 6 septembre 2018, rendra ses conclusions au deuxième semestre 2019, au regard notamment des évolutions de conception que vous pourriez envisager pour le stockage des colis de déchets bitumés, et des résultats de caractérisation et de comportement des déchets bitumés obtenus par leurs propriétaires. Ces conclusions devront aussi être prises en considération dans la démonstration de sûreté.

**[Andra-Art46-7] Je vous demande de prendre en compte les éléments pertinents à la démonstration de sûreté du projet de stockage Cigéo issus des réponses aux demandes formulées par l'ASN et l'ASND, et des conclusions de la revue sur la gestion des déchets bitumés et, en lien avec les propriétaires de déchets bitumés, de présenter sous 6 mois un calendrier sur la disponibilité et l'intégration de ces nouveaux éléments.**

Je vous prie d'agréer, Monsieur le directeur général, l'expression de ma considération distinguée.

**La directrice générale adjointe,**

*signé par*

**Anne-Cécile RIGAIL**

## RÉFÉRENCES

- [1] Note technique CEA/DEN/DPSN/DIR 2017-281 du 29 juin 2017 : Comportement physico-chimique et thermique des colis de boues bitumées pendant les phases d'entreposages, puis de stockage réversible et au-delà
- [2] Arrêté du 23 février 2017 pris pour application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017 établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs
- [3] Rapport IRSN/PDS-DEND/DR/2016-075 de juillet 2016 relatif à l'EPNDM de Marcoule
- [4] Rapport IRSN n° 2017-00013 du 19 mai 2017 : Projet de stockage Cigéo – Examen du dossier d'options de sûreté
- [5] Note technique CEA/DEN/DANS/SP2S/NT/16-040/A du 2 décembre 2016
- [6] Note technique CEA/DEN/DANS/SP2S/NT/17-085-B du 19 décembre 2017 - Évaluation de la réactivité des fûts d'enrobés de boues bitumées de la STEL de Marcoule sous sollicitation thermique extérieure
- [7] Lettre ASND/201-00133 du 10 février 2017
- [8] Lettre ASN CODEP-DRC-2019-007552 - ASND/2019-00392
- [9] Avis n° 2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde
- [10] Arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base