



Cahier des charges

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097

Indice : V2

Page : 1/10

Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume

Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux

	Acceptation Client ou CdP
Nom	CANTREL
Date	/
Signature	/

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s)	Référent Qualité	Approbateur
Nom	L. CANTREL	F. MILLET P. NERISSON	K. AMOUREUX	RIGOLLET
Date				
Visa				

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	Page : 2/10
Indice : V2		

Pôle sûreté des installations et des systèmes nucléaires

Service d'Etude et de Recherche Expérimentale

Bâtiment 328

B.P. 3, 13115 Saint Paul-lez-Durance Cedex

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Ind.	Date	Chapitre	Nature des modifications	Rédacteur	Vérificateur	Référent qualité	Approbateur
0							
1	25/05/2026				P. Nérissou	K. Amoureux	
2	02/06/2026						
3							
4							

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume <i>Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux</i>	Page : 3/10
Indice : V2		

TABLE DES MATIÈRES

1	OBJET.....	4
1.1	Contexte de la prestation.....	4
2	CONTENU DE LA PRESTATION ET SPECIFICATIONS TECHNIQUES.....	4
2.1	Essais en cône calorimètre en atmosphère contrôlée (volet 1)	5
2.1.1	Essais simplifiés en atmosphère libre.....	5
2.1.2	Essais détaillés en atmosphère contrôlée	6
2.2	Essais avec facteur d'échelle avec un calorimètre en atmosphère libre (volet 2) ...	7
2.3	Tranche optionnelle 1 – Essais optionnels (volet 3)	8
2.4	Délais de réalisation et planification.....	8
3	DESCRIPTION DES LIVRABLES.....	9
3.1	Rapports.....	9
4	ORGANISATION.....	10
4.1	Organisation du suivi à l'ASNR	10
4.2	Organisation du titulaire	10
5	DETAIL DE L'OFFRE TECHNIQUE ET COMMERCIALE	10

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume	Page : 4/10
Indice : V2	Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	

1 OBJET

1.1 Contexte de la prestation

Le conditionnement des déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL) dans une matrice bitumineuse a été mis en œuvre en France dès les années 1960, conduisant à la production de plusieurs dizaines de milliers de fûts d'enrobés bitumineux (FEB). Le procédé consiste à insolubiliser les radionucléides par précipitation, par ajouts successifs de sels qui ont une affinité chimique particulière avec ces radionucléides. La boue formée est enrobée avec du bitume, par extrusion, conduisant à une dispersion de sels inorganiques dans une matrice bitume. Ces déchets sont aujourd'hui entreposés, dans l'attente de leur stockage définitif dans le cadre du projet Cigéo après autorisation.

Dans le cadre du processus d'expertise lié à l'entreposage, au transport et au stockage de ces FEB, l'évaluation du risque d'emballement réactionnel et thermique et sa maîtrise constituent un enjeu de sûreté important. En effet, les FEB présentent un potentiel de réactions chimiques exothermiques, par réactions d'oxydo-réduction entre sels ou par réactions sels/bitume.

Le développement de compétences et connaissances, la production de données expérimentales de référence, l'évaluation fine des incertitudes associées et la compréhension des mécanismes réactionnels est un travail nécessaire pour appuyer et consolider les avis d'expertise de l'ASNR à venir sur les demandes d'autorisation de transport ou de stockage des FEB. Pour ce faire, le programme CIREE (Combustion et Interactions des Réactions Exothermiques des fûts d'Enrobés) a été lancé à l'ASNR, dont l'un des objectifs est l'étude de la combustion de mélanges sels/bitume afin d'évaluer les conséquences de l'emballement thermique d'un FEB au-delà de la pyrolyse du mélange.

Dans ce contexte, le Service d'étude et de recherche expérimentale (SEREX) a besoin de faire réaliser des expériences de combustion de mélanges sels/bitumes dans des cônes calorimètres. A savoir que ces réactions peuvent être plus ou moins exothermiques.

Le principe consiste à exposer un échantillon de matériau à un flux thermique contrôlé (de quelques dizaines de kW.m^{-2}) afin de mesurer les caractéristiques de la combustion.

Le cône calorimètre permet de mesurer la quantité de chaleur libérée par un matériau lorsqu'il brûle sachant que cette chaleur dépend de la quantité d'oxygène consommée.

Ainsi, ces essais apporteront des éléments de réponse en fournissant principalement des données telles que :

- La perte de masse de l'échantillon au cours du temps ;
- La mesure de certains gaz produits (comme CO_2 et CH_4) ;
- La température de la flamme ;
- La puissance dégagée (HRR – Heat Release Rate) et la quantité de chaleur produite.

Cette liste est non exhaustive, des informations plus détaillées sont fournies ci-après.

Les données produites permettront d'alimenter les modèles de simulation incendie et de prévoir les conséquences d'un point chaud qui s'appliquerait à un FEB dit réactif.

2 CONTENU DE LA PRESTATION ET SPECIFICATIONS TECHNIQUES

La présente prestation consiste à la réalisation d'une matrice d'essais avec les analyses associées. Les échantillons de matière seront fournis par l'ASNR au T1 2027. Ces échantillons sont constitués d'un

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	Page : 5/10
Indice : V2		

mélange de bitume AZALT 70/100 et de sels inorganiques type NaNO_3 , CoS , BaSO_4 (liste non exhaustive). La proportion de sel dans le bitume peut atteindre au maximum 50% massique.

La prestation se décompose en 2 parties distinctes, la première concernera des échantillons de taille réduite (quelques centaines de cm^3) tandis que la seconde impliquera des échantillons plus volumineux pour évaluer l'effet d'échelle. L'ASNR produira et fournira les échantillons mis en forme à condition sur la base des portes échantillons fournis par le titulaire du marché.

Chaque partie donnera lieu à mi-parcours à une réunion d'avancement pour présenter les résultats obtenus, des livrables spécifiques, cf. paragraphe 3.1, et un rapport de synthèse sera produit à la fin. Les essais seront initiés en appliquant un flux thermique externe par panneaux radiants infrarouge ou autres.

2.1 Essais en cône calorimètre en atmosphère contrôlée (volet 1)

Ce volet d'étude se décompose en deux parties distinctes comme décrit ci-après.

Les essais seront conduits au sein d'un cône calorimètre à atmosphère contrôlée (ISO 5660-5 ou présentant des performances équivalentes.).

Les mesures seront réalisées sur des échantillons de petites dimensions (typiquement porte-échantillon carré de 10 cm de côté ou cylindrique). Les essais seront réalisés sur des échantillons présentant une épaisseur constante, de manière à garantir la comparabilité des résultats.

Les conditions aux limites, la nature et les dimensions des porte-échantillons seront validés par l'ASNR. La concentration en oxygène de l'atmosphère sera également modulée, afin de simuler divers environnements (atmosphère sous-ventilée) et d'analyser leur impact sur la réactivité, les phénomènes d'inflammation et d'extinction.

2.1.1 Essais simplifiés en atmosphère libre

L'objectif de ces essais dits « simplifiés » est de faire un screening pour évaluer le comportement au feu de différents mélanges.

La matrice d'essais est indiquée dans le Tableau 1. La composition des échantillons sera précisée lors de la réunion d'enclenchement de la prestation. L'objectif est d'évaluer de manière ciblée l'influence des sels et leurs teneurs.

La densité de flux thermique pourra être un paramètre variable dans la gamme allant de 10 à 100 kW.m^{-2} avec deux valeurs de référence, les valeurs d'étude seront discutées et fixées lors de la réunion d'enclenchement.

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	Page : 6/10
Indice : V2		

Tableau 1 : Grille d'essais simplifiés du volet 1.

Echantillon	Taille de l'échantillon	Atmosphère	Densité de flux thermique	Nombre d'essais
Sel1(teneur 1)/bitume	~500 cm ³	Air (Atmosphère libre)	2 valeurs à définir	2 essais par configuration pour s'assurer de la répétabilité, total de 36 essais
Sel1(teneur 2)/bitume				
Sel2(teneur 1)/bitume				
Sel2(teneur 2)/bitume				
Sel3(teneur 1)/bitume				
Sel3(teneur 2)/bitume				
Sel4(teneur 1)/bitume				
Sel4(teneur 2)/bitume				
Composition multi-sels/bitume				

Les mesures/déterminations à réaliser sont :

- évolution massique et résiduelle : analyser le taux de perte de masse et le pouvoir calorifique associé et à la réactivité chimique ;
- analyse de la température au sein de l'échantillon et la composition gazeuse de l'effluent de combustion (oxygène, CO₂, NOx ...) ;
- propriétés d'inflammation et de combustion : analyser le potentiel fumigène, incluant le taux de production de fumée (Smoke Production Rate) et la nature des fumées émises.

2.1.2 Essais détaillés en atmosphère contrôlée

La matrice d'essais est indiquée dans le Tableau 2. La composition des échantillons sera précisée après les premiers résultats obtenus sur les essais dits simplifiés.

Les essais seront conduits au sein d'un cône calorimètre couplé à un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). Les essais sont réalisés en modifiant la sollicitation thermique externe et la teneur en oxygène au sein de l'atmosphère pour évaluer les caractéristiques des phases solides et gazeuses.

Tableau 2 : Grille d'essais détaillés du volet 1.

Echantillon	Taille de l'échantillon	Atmosphère	Densité de flux thermique	Nombre d'essais
Sel1/bitume	~500 cm ³	Air (Atmosphère libre)	2 valeurs	3 par échantillons et par configuration soit 18 au total
sel2/bitume				
Sel1-sel2/bitume				
Sel1-sel2/bitume		Miieu sous-ventilé (taux de O ₂ < 20%) 3 teneurs en O ₂		3 par échantillons et par configuration soit 18 au total

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume	Page : 7/10
Indice : V2	Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	

Les mesures/déterminations à réaliser sont :

- évolution massique et résiduelle : Analyse de l'évolution de la masse au cours des essais et détermination de la fraction résiduelle, indicateur clé du degré de dégradation ou de conversion du produit ;
- analyse de la température au sein de l'échantillon pour suivre les gradients thermiques et les phénomènes internes ;
- propriétés d'inflammation et de combustion : détermination des conditions d'inflammation (température, délai, conditions critiques). Analyse des mécanismes d'extinction de flamme ;
- analyse chimique : Identification de la nature des espèces chimiques générées et notamment des gaz. Suivi de la cinétique de formation et de concentration de ces espèces au cours du temps ;
- caractéristiques énergétiques : étude de l'évolution du dégagement énergétique, en tenant compte notamment de la présence éventuelle de sels comburants dans le calcul ;
- caractéristiques physiques et structurales : détermination des propriétés de gonflement après essais, permettant d'évaluer les modifications dimensionnelles du matériau. Mesure de la masse volumique apparente, à l'état initial puis après essai, afin d'identifier les variations liées aux transformations internes.

Sur quelques essais ciblés (9 au total), la granulométrie des aérosols/suies produits sera déterminée grâce à un système de prélèvement dédié.

Si le soumissionnaire ne peut répondre à l'ensemble de ces points, il devra le mentionner clairement dans son offre pour juger de l'acceptabilité de son offre et de la qualité technique de celle-ci.

A l'inverse si le soumissionnaire juge pertinent de proposer des mesures complémentaires, elles devront être mentionnées en expliquant la motivation et en faisant apparaître le coût supplémentaire.

La liste des gaz mesurés devra figurer dans l'offre mais il est souhaité la mesure des gaz usuels de combustion O₂ nécessairement, CO, CO₂, Nox et possiblement certains hydrocarbures.

2.2 Essais avec facteur d'échelle avec un calorimètre en atmosphère libre (volet 2)

Ces essais portent sur la caractérisation de l'influence de la taille de l'échantillon, pour cela un calorimètre de plus grandes dimensions sera nécessaire par rapport à celui mis en œuvre dans le volet 1. Un échantillon sera de l'ordre du kilogramme.

L'objectif principal est d'évaluer l'effet du changement d'échelle sur le comportement physico-chimique et énergétique du produit, en comparaison avec les essais du volet 1. L'analyse sera réalisée sur 2 tailles de contenants différents.

Les essais seront réalisés à masse équivalente, la masse est maintenue constante entre les différents contenants, ce qui implique des épaisseurs variables.

Les épaisseurs exactes seront définies avec le titulaire du marché lors de la réunion d'enclenchement en fonction des possibilités techniques.

La matrice d'essais est indiquée dans le Tableau 3. La composition des échantillons sera précisée en fonction des résultats du volet 1.

Deux contenants seront étudiés, les tailles exactes possibles seront précisées par le soumissionnaire. Un cas test avec une attaque thermique localisée (initiation thermique par brûleur) sera réalisé afin de simuler un scénario réaliste de feu. Cette configuration permet d'évaluer les modifications du comportement du produit en situation d'agression thermique directe.

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	Page : 8/10
Indice : V2		

Les termes sources (panneau radiant, brûleur) feront l'objet d'une calibration préalable, afin de quantifier précisément les sollicitations thermiques appliquées.

Les essais seront filmés (vidéo), permettant une analyse a posteriori des phénomènes (cinétique de flamme, gonflement, instabilités, etc.).

Tableau 3 : Grille d'essais du volet 2.

Echantillon	Taille de l'échantillon	Atmosphère	Densité de flux thermique	Nombre d'essais
<i>Sel1/bitume</i>	2 volumes différents à définir, de l'ordre de quelques litres (Même masse)	Air	1 valeur	3 par échantillons /contenant soit 24 essais au total
<i>sel2/bitume</i>				
<i>Sel1-sel2/bitume</i>				
<i>Sel1-sel2/bitume + solvant</i>			Attaque par brûleur au lieu de panneaux radiants	3 par échantillons /contenant soit 6 essais au total
<i>Sel1-sel2/bitume</i>				

Les mesures/déterminations à réaliser sont :

- évolution massique et résiduelle : analyse de l'évolution de la masse au cours des essais et détermination de la fraction résiduelle ;
- l'évolution de la température de l'échantillon (température de surface) et températures des gaz ;
- cartographie thermique ;
- caractéristiques physiques et structurales : déformation du matériau ;
- caractéristiques énergétiques : étude de l'évolution du dégagement énergétique.

2.3 Tranche optionnelle 1 – Essais optionnels (volet 3)

Ce volet optionnel comportera :

- 1 configuration d'échantillon additionnelle pour les essais dits détaillés, cf. Tableau 2 ce qui impliquera la réalisation de 9 essais supplémentaires ;
- 1 configuration d'échantillon additionnelle pour les essais dits facteur d'échelle, cf. Tableau 3, ce qui impliquera la réalisation de 6 essais supplémentaires.

Le besoin de ces essais optionnels sera discuté avant fin 2027 (levée ou non de l'option) pour une réalisation en 2028, le cas échéant.

2.4 Délais de réalisation et planification

La notification du marché par le Titulaire constitue le T₀ dans le planning d'exécution du marché. Une réunion est ensuite organisée par l'ASNR, en présence du chargé d'affaire, et du titulaire du marché soit en visio soit en présentiel, à convenir. Son objectif est de passer en revue l'ensemble des points techniques ou relevant de la qualité posant question avant de passer à la réalisation de l'affaire. Le compte-rendu de cette réunion est établi par l'ASNR et contresigné par le Titulaire.

Les délais de réalisation sont les suivants :

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume	Page : 9/10
Indice : V2	Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	

- Phase 0 : Notification du marché T_0
- Phase 1 : Après le démarrage de la prestation à T_0 , tenue de la réunion d'enclenchement avant 1 mois après T_0 . Approbation par l'ASNR et le titulaire du compte rendu de la réunion d'enclenchement à T_1 , $T_1 = T_0 + 2$ mois
- Phase 2 : Réalisation des volets 1 et 2, $T_2 = T_1 + 14$ mois
- Phase 3 : Réalisation du volet optionnel 3 si levée de l'option avant T_2 , réalisation dans un délai inférieur à 6 mois après le T_2

Le planning fera mention des jalons suivants : réunion d'enclenchement, livrables et réunion de clôture de la prestation.

La livraison des échantillons est prévue au 1^{er} trimestre 2027. Tout retard de livraison entrainera un allongement en conséquence du planning.

La langue utilisée pour la prestation et pour les livrables (documents) est le français. L'anglais pourra être utilisé pour des comptes rendus de réunion ou certains documents techniques.

3 DESCRIPTION DES LIVRABLES

3.1 Rapports

Le titulaire aura à sa charge la rédaction des livrables suivants :

- **Livrable 1** : rapport détaillé avec description des dispositifs expérimentaux, des conditions d'essais et des données acquises (résultats bruts, résultats traités et incertitudes) pour le volet 1 du programme
- **Livrable 2** : rapport détaillé avec description des dispositifs expérimentaux, des conditions d'essais et des données acquises (résultats bruts, résultats traités et incertitudes) pour le volet 2 du programme
- **Livrable 3** : rapport détaillé avec description des dispositifs expérimentaux, des conditions d'essais et des données acquises (résultats bruts, résultats traités et incertitudes) pour le volet 3 si la levée d'option a lieu

Ces livrables seront délivrés sous forme numérique (word et pdf). L'ASNR sera vérificateur de ces livrables et les approuvera ; cette approbation valant acceptation.

Les données brutes seront aussi fournies sous forme numérique dans un format restant à définir, type tableur ou autre.

A noter que le titulaire organisera obligatoirement, à la fin de la prestation, une réunion pour présenter, de manière synthétique, l'ensemble des résultats obtenus. Cette réunion donnera lieu à un compte rendu validé par les deux parties. Cette réunion aura lieu, de préférence, sur le site de Cadarache, le coût de déplacement devra être inclus dans l'offre.

Référence : ASNR/PSN-RES/SEREX/ 2026-00097	Prestation pour réaliser des essais de combustion en cônes calorimètres pour des mélanges sels/bitume Programme CIREE sur les feux d'enrobés bitumeux	Page : 10/10
Indice : V2		

4 ORGANISATION

4.1 Organisation du suivi à l'ASNR

Un chargé d'affaires est désigné, à l'ASNR, responsable de l'affaire. À ce titre, dans le cadre du marché, il est l'interlocuteur principal pour les interfaces contractuelles et techniques avec le titulaire du marché. En son absence, cette responsabilité sera assurée par un suppléant désigné par l'ASNR.

Les interlocuteurs ASNR pour cette affaire sont :

- Le chargé d'affaire : Laurent CANTREL, tél : 04 42 19 94 50, laurent.cantrel@asnr.fr
- Le chargé d'affaire suppléant : Faoulat MIRADJI, tél : 04 42 19 92 61, faoulat.miradji@asnr.fr
- Le référent qualité : Karine AMOUREUX, tél : 04 42 19 96 05, karine.amoureux@asnr.fr
- Le chef de laboratoire : Jean DENIS, tél : 04 42 19 96 93, jean.denis@asnr.fr

4.2 Organisation du titulaire

L'organisation mise en place par le titulaire pour gérer les relations avec l'ASNR devra être précisée dans l'offre.

Le titulaire devra désigner un chargé d'affaire qui sera l'interlocuteur unique de l'ASNR.

Le rôle du chargé d'affaires est de veiller à la bonne exécution du marché selon les termes du contrat. Il a le devoir de rendre compte au chargé d'affaire ASNR de l'avancement de la prestation et des difficultés éventuelles rencontrées.

En cas de changement, temporaire (absence) ou définitif, de celui-ci au cours de l'exécution du marché, le titulaire devra en informer aussitôt par écrit le chargé d'affaires ASNR et le remplacer par une personne de même niveau de compétence et sans délai.

5 DETAIL DE L'OFFRE TECHNIQUE ET COMMERCIALE

Si le soumissionnaire juge pertinent de proposer des mesures complémentaires, elles devront être mentionnées en expliquant la motivation et en faisant apparaître les coûts supplémentaires pour être en mesure de juger du bien-fondé de celles-ci.