

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (CCTP)

Réf. : CCTP/PSE-ENV/SPDR/ 2025-025

Objet : Acquisition d'un instrument d'analyse thermique ATG/DSC et réalisation de prestations de service connexes

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS DU DOCUMENT		
Indice	Date	Nature de la modification
0	27/02/2025	Version initiale du document
1	10/06/2025	Version finale du document

Nom et visa du rédacteur : Georges MATTA  Date : 10/06/2025	Nom et visa du vérificateur : Alexandre DAUZERES  Date : 10/06/2025	Nom et visa de l'approbateur : Christophe DEBAYLE  Date : 10/06/2025
---	--	--

SOMMAIRE

1	OBJET DU MARCHE	4
2	PRESENTATION DE L'ASNR ET DESCRIPTION DU CADRE GENERAL DE LA PRESTATION ..	4
2.1	CADRE GENERAL	4
2.2	CADRAGE DU MARCHE	5
3	SPECIFICATIONS TECHNIQUES	7
3.1	PLAGE DE TEMPERATURE	7
3.2	VITESSE DE CHAUFFAGE/REFROIDISSEMENT	7
3.3	CAPACITE ET COMPATIBILITE DES PORTE-ECHANTILLONS	7
3.4	CONTROLE ATMOSPHERIQUE	7
4	SPÉCIFICATIONS FONCTIONNELLES	7
4.1	MESURES SIMULTANÉES	7
4.2	PROGRAMMATION DES CYCLES	7
4.3	ANALYSE EN ATMOSPHERE CONTRÔLÉE	7
4.4	INTERFACE UTILISATEUR	7
4.5	ANALYSES CINÉTIQUES	7
5	LIVRABLES DE LA PRESTATION	8
5.1	BON DE LIVRAISON	8
5.2	RECEPTION	8
5.3	JEUX DE DONNÉES	8
5.4	CONNECTIVITÉ	8
5.5	RAPPORT DE VALIDATION	8
5.6	DOCUMENTATION TECHNIQUE	8
5.7	RAPPORT D'INTERVENTION	9
6	LIVRAISON, VÉRIFICATIONS ET ADMISSION DE L'EQUIPEMENT	9
6.1	MODALITES DE LIVRAISON	9
6.2	VÉRIFICATIONS ET ADMISSION DE L'EQUIPEMENT	9
7	FORMATION	9
8	GARANTIE COMPLÉMENTAIRE	10
8.1	OBJET DE LA GARANTIE COMPLÉMENTAIRE	10
8.2	ÉTENDUE DE LA GARANTIE COMPLÉMENTAIRE	10
8.3	MODALITES D'INTERVENTION	10

8.4	PIECES DE RECHANGE	10
9	MAINTENANCE PREVENTIVE.....	10
10	INTERLOCUTEURS ASNR	11

1 OBJET DU MARCHÉ

Les spécifications techniques du présent CCTP concernent la fourniture, l'installation, la mise en service, la formation, la garantie complémentaire et la maintenance préventive d'un instrument d'analyse thermique couplé ATG/DSC (ci-après dénommé « l'équipement »), destiné à réaliser des analyses thermiques sur des matériaux utilisés pour le conditionnement des déchets radioactifs, tels que les bitumes, bétons, argiles et géopolymères.

Cet équipement devra permettre d'étudier les propriétés thermiques, les réactions de décomposition et les transitions de phase afin d'évaluer le comportement de ces matériaux tout au long de leur cycle de vie.

Cet achat s'inscrit dans le cadre des activités de recherche menées par l'ASNR sur le stockage géologique des déchets radioactifs de moyenne et haute activité à vie longue. Ces travaux sont réalisés au sein du laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et interactions dans les sous-sols (LETIS) et de la plateforme analytique LUTÈCE à Fontenay-aux-Roses (92262).

L'objectif est de sélectionner un instrument d'analyse thermogravimétrique (ATG) couplée à une calorimétrie différentielle à balayage (DSC) répondant à nos exigences de performance, de fiabilité et de fonctionnalités, tout en respectant les contraintes budgétaires du projet.

2 PRESENTATION DE L'ASNR ET DESCRIPTION DU CADRE GENERAL DE LA PRESTATION

2.1 CADRE GENERAL

L'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR) est une autorité administrative indépendante créée le 1 janvier 2025 pour accompagner la relance de la filière nucléaire. Elle assure, au nom de l'État, le contrôle des activités nucléaires civiles tout en menant des missions de recherche, d'expertise, de réglementation et de formation.

L'ASNR conduit des programmes de recherche pour maintenir les compétences en sûreté nucléaire et radioprotection, explorer les effets des rayonnements ionisants sur la santé et l'environnement, et expertiser des solutions pour la gestion des déchets radioactifs. Elle évalue les risques tout au long du cycle de vie des installations nucléaires, instruit les demandes d'autorisation, et veille à l'application des réglementations.

En cas d'urgence radiologique, l'ASNR analyse la situation, conseille les autorités, surveille les mesures prises par l'exploitant et informe le public. Elle propose également des formations spécialisées, informe la population sur l'état de la sûreté nucléaire en France et encourage le dialogue avec la société civile pour renforcer la culture de radioprotection.

Le Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sous-sols (LETIS) regroupe huit chercheurs permanents aux expertises variées ainsi que plusieurs doctorants et post-doctorants.

Situé sur le site de Fontenay-aux-Roses (92260, France), il est rattaché au Service des Pollutions et Déchets Radioactifs (SPDR), qui agit en tant que consultant dans le cadre des expertises menées. Le SPDR fait partie de la Direction de la Recherche et de l'Expertise en Environnement (DREE), dont la mission est d'assurer la protection des populations et de l'environnement. Pour cela, il intervient à travers trois axes complémentaires : la surveillance, l'expertise et la recherche.

Les activités de recherche du LETIS couvrent l'analyse des mécanismes fondamentaux, le développement de protocoles expérimentaux (en laboratoire et sur le terrain) et la modélisation numérique des phénomènes étudiés. Ces travaux visent à soutenir l'expertise scientifique et technique nécessaire à

l'évaluation des dossiers de sûreté des stockages en formation géologique profonde. Les recherches portent notamment sur les processus thermiques, chimiques et hydromécaniques susceptibles d'impacter les performances de la roche d'accueil et des colis de déchets radioactifs.

Le LETIS s'appuie sur des infrastructures expérimentales de pointe : le laboratoire unifié d'expérimentation et de caractérisation LUTECE, dédié à la chimie, la caractérisation pétrophysique et minéralogique sur le site de Fontenay-aux-Roses, et le laboratoire souterrain de recherche de Tournemire (LRST), permettant des études in situ en conditions représentatives des environnements de stockage.

2.2 CADRAGE DU MARCHE

L'étude de la sûreté des matériaux de conditionnement des déchets radioactifs de moyenne et haute activité à vie longue est essentielle pour garantir leur acceptabilité en stockage géologique profond.

Depuis plusieurs décennies, des efforts considérables sont déployés pour caractériser le comportement de ces matériaux, dans le but de prévenir tout risque potentiel pour l'environnement et la santé publique. Les matériaux comme les bitumes, les bétons et les géopolymères doivent être rigoureusement étudiés pour s'assurer qu'ils conservent leurs propriétés structurales et thermiques sur des échelles de temps très longues, compatibles avec la durée de vie des déchets qu'ils encapsulent.

Les recherches menées sur le stockage en formation géologique profonde visent à anticiper les phénomènes thermiques, mécaniques et chimiques pouvant survenir au fil des décennies. Cette expertise est indispensable pour appuyer les autorités de régulation dans l'évaluation des dossiers de sûreté soumis par les exploitants. L'acquisition d'un instrument d'analyse thermique performant est donc cruciale pour compléter ces connaissances, en permettant de simuler les conditions réelles de stockage et d'analyser finement les réactions des matériaux face aux contraintes thermiques et aux atmosphères variées.

L'un des enjeux majeurs pour l'ASNR dans ce domaine est la gestion du risque incendie des fûts tout au long de leur cycle de vie, comprenant le transport, l'entreposage et le stockage. Ce risque est particulièrement amplifié pour certaines matrices organiques, comme le bitume, qui présente un potentiel d'inflammation élevé en cas d'incendie. Dès lors, il est crucial de disposer d'outils adaptés pour analyser la dégradation thermique de ces matériaux et étudier les différentes phases de leur comportement sous l'effet de la chaleur. En effet, ces déchets contiennent souvent des sels réactifs qui peuvent interagir avec le bitume, déclenchant des réactions exothermiques libérant une quantité d'énergie considérable. Il devient donc essentiel d'étudier ces réactions afin de déterminer les pertes de masse et les événements thermiques associés, tout en identifiant les différentes étapes de dégradation et les transitions de phase qui peuvent se produire.

Une telle analyse permet également de recueillir des informations cruciales concernant la température de démarrage des réactions, la température à laquelle la réactivité est maximale et la température de fin des réactions. Ces données sont particulièrement importantes pour garantir la sûreté des colis de déchets, en permettant de mieux anticiper les risques thermiques et d'optimiser les conditions de stockage et de gestion des fûts. Dans cette optique, un outil tel que l'ATG couplée à la DSC constitue un moyen pertinent d'obtenir des informations sur les variations de masse, les flux de chaleur et d'étudier les corrélations entre la perte de masse et les différents événements thermiques détectés par la DSC. Cette approche intégrée permet d'éclairer les phénomènes thermiques complexes, tout en garantissant une évaluation précise et fiable du risque associé aux matériaux et aux réactions chimiques susceptibles de se produire à différentes températures.

Un exemple illustrant l'importance d'une telle analyse thermique couplée sur la matrice bitumineuse est un résultat tiré de la thèse de G. Matta, intitulée « Comportement thermique d'enrobés bitumineux de déchets radioactifs ». Dans ce travail, le comportement thermique d'un bitume soumis à une sollicitation thermique

à 10°C/min dans une atmosphère oxydante (sous oxygène) a été évalué. La Figure 1 présente la courbe DTG, qui correspond à la dérivée du premier ordre de la perte de masse en fonction de la température. Cette courbe met en évidence les différentes étapes de décomposition thermique du bitume, en montrant la vitesse à laquelle la masse de l'échantillon diminue. Les pics observés sur la DTG sont systématiquement concomitants avec ceux de la courbe ATD correspondant à l'analyse thermique différentielle, ce qui permet d'associer chaque variation de masse à un événement thermique spécifique.

En présence d'air, plusieurs phénomènes distincts apparaissent : des oxydations exothermiques à basse et haute température (low temperature oxidation LTO et high temperature oxidation HTO), ainsi qu'une phase endothermique correspondant aux réactions de craquage thermique (Fuel Deposition, FD) des espèces de poids moléculaire élevé, notamment des molécules hydrogénocarbonnées. Cette corrélation entre les signaux permet de caractériser avec précision les différentes étapes de transformation thermique du matériau, tout en identifiant les températures de début et de fin des réactions, ainsi que les énergies impliquées dans chaque processus de décomposition.

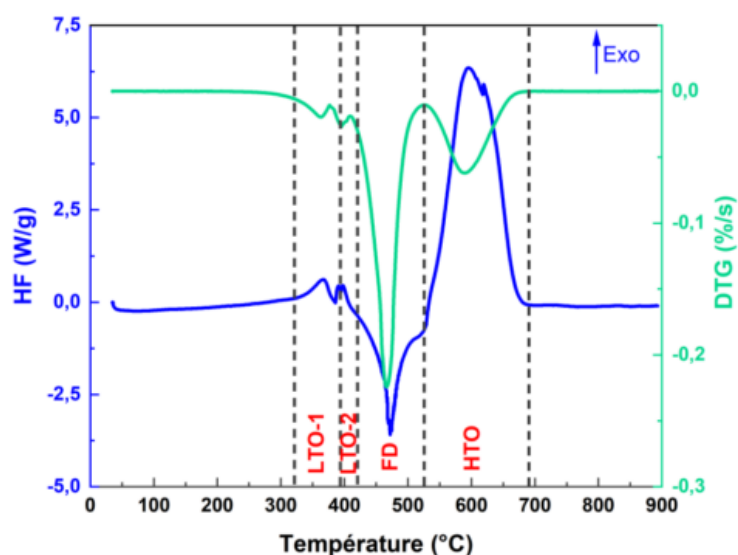


Figure 1 : Courbes ATD et DTG du bitume, obtenues à 10°C/min, sous air

Il est important de noter que, dans cette étude, une analyse thermique différentielle (ATD) a été utilisée plutôt qu'une calorimétrie à balayage différentiel (DSC), ce qui constitue une différence clé entre les deux techniques. Tandis que l'ATD permet de détecter les événements thermiques sous forme de pics exothermiques et endothermiques, elle ne fournit pas de mesure directe de la quantité de chaleur libérée ou absorbée durant ces réactions. En revanche, la DSC permet de mesurer précisément l'énergie impliquée dans ces processus, avec une sensibilité et une précision bien supérieure. C'est pour cette raison que l'acquisition d'une DSC est envisagée, afin d'obtenir des données plus détaillées sur l'énergie libérée ou absorbée, ce qui est crucial pour une évaluation complète du comportement thermique des matériaux.

3 SPECIFICATIONS TECHNIQUES

L'instrument d'analyse thermique couplé ATG/DSC doit répondre à *minima* aux spécifications techniques suivantes :

- ATG : mesure de la variation de masse avec une résolution de 0.1 μg ($\pm 1 \mu\text{g}$).
- DSC : mesure des flux de chaleur avec une sensibilité inférieure à 0,1 mW pour détecter de faibles transitions.

3.1 PLAGE DE TEMPERATURE

- Plage de température : 20 à 1100°C.

3.2 VITESSE DE CHAUFFAGE/REFROIDISSEMENT

- Vitesse de chauffage : de 0,1°C/min à 50°C/min avec possibilité de paliers isothermes prolongés.
- Vitesse de refroidissement : entre 20 et 30°C/min.

3.3 CAPACITE ET COMPATIBILITE DES PORTE-ECHANTILLONS

- Capacité minimale de 70 μL avec des creusets adaptés (alumine, platine).

3.4 CONTROLE ATMOSPHERIQUE

- Possibilité d'analyse sous atmosphères contrôlées (air, azote, argon, oxygène) avec débit réglable (10 à 200 mL/min).

4 SPÉCIFICATIONS FONCTIONNELLES

4.1 MESURES SIMULTANÉES

- Réalisation simultanée des mesures ATG et DSC sur un même échantillon.

4.2 PROGRAMMATION DES CYCLES

- Possibilité de programmer des cycles de températures complexes (montées, descentes, paliers isothermes).

4.3 ANALYSE EN ATMOSPHERE CONTRÔLÉE

- Capacité à alterner automatiquement entre différents environnements (oxydant, inerte).

4.4 INTERFACE UTILISATEUR

- Logiciel de pilotage intuitif permettant la visualisation en temps réel, la superposition de courbes et l'export des données.

4.5 ANALYSES CINÉTIQUES

- Intégration d'outils pour l'analyse des modèles cinétiques (Arrhenius, Ozawa-Flynn-Wall, Kissinger).

5 LIVRABLES DE LA PRESTATION

5.1 BON DE LIVRAISON

- Bon de livraison de l'équipement à remettre **le jour de la livraison** de l'équipement et qui doit préciser la description détaillée de l'équipement livré, sa référence, le nombre d'unités, et tout autre document administratif associé. Il servira de preuve de réception et pourra inclure les informations sur la conformité des équipements aux spécifications.

5.2 RECEPTION

- Des tests seront réalisés à l'issu de la livraison au moyen d'un échantillon fourni par l'ASNR. Ces tests permettront d'expliquer les méthodologies, les paramètres d'analyse (température, vitesse de chauffe, type d'atmosphère) ainsi que les critères de validation des résultats obtenus. Des commentaires sur les tendances observées et des recommandations basées sur les résultats doivent également être fournis.

5.3 JEUX DE DONNEES

- Fichiers exportables : des jeux de données complets doivent pouvoir être fournis au formats CSV, TXT, XML, JSON, incluant toutes les courbes thermiques, ainsi que les paramètres mesurés (température, masse, taux de perte de masse, flux thermique, etc.). Les données doivent être parfaitement lisibles et organisées pour permettre une analyse détaillée et répétée si nécessaire. Les fichiers seront accompagnés d'un tableau de bord pour une visualisation simplifiée des résultats.

5.4 CONNECTIVITE

- L'équipement devra pouvoir être connecté à un PC ou à un réseau TCP/IP pour le pilotage, la configuration des essais et l'export des données. La connexion pourra se faire via USB, Ethernet ou autre interface standard. Un logiciel compatible Windows devra être fourni, permettant le suivi en temps réel des mesures et l'enregistrement automatique des données. Si le PC n'est pas fourni, les exigences techniques minimales devront être précisées.

5.5 RAPPORT DE VALIDATION

- Un certificat de conformité devra être transmis après l'installation, attestant que l'équipement livré respecte les normes et spécifications définies dans le contrat. Le rapport de calibration, également fourni après installation, devra détailler les procédures suivies pour la calibration de l'appareil ainsi que les résultats obtenus, avec des attestations de la traçabilité des étalonnages aux standards reconnus.

5.6 DOCUMENTATION TECHNIQUE

- Manuels d'utilisation et guides de dépannage : ces documents doivent être fournis au moment de la livraison de l'équipement et inclure toutes les informations nécessaires à son utilisation correcte, sa maintenance et son dépannage. Ils doivent être complets et facilement compréhensibles, incluant des schémas, des instructions claires sur les procédures à suivre et des recommandations pour éviter les erreurs fréquentes.

- Protocole de maintenance : un protocole de maintenance régulier, incluant des recommandations pour l'entretien préventif de l'équipement, ainsi que des consignes en cas de panne, sera remis. Il devra préciser les intervalles de maintenance, les composants critiques à surveiller et les méthodes de nettoyage.

5.7 RAPPORT D'INTERVENTION

- Rapport d'intervention pour maintenance : en cas de maintenance préventive ou d'intervention corrective dans le cadre de la période de garantie (initiale ou complémentaire), un rapport d'intervention complet devra être fourni, indiquant le type d'intervention réalisée, les actions effectuées, les pièces remplacées, ainsi que les tests post-intervention pour garantir que l'équipement fonctionne dans les conditions spécifiées. Ce rapport devra être remis au plus tard dans les deux jours suivant l'intervention.

6 LIVRAISON, VERIFICATIONS ET ADMISSION DE L'EQUIPEMENT

6.1 MODALITES DE LIVRAISON

- Livraison sur site avec installation complète.
- Transport sécurisé et suivi par un prestataire spécialisé.

L'équipement sera livré à l'adresse suivante :

ASNR/DREE/PSE-ENV/SPDR

Plateforme LUTÈCE

Bâtiment 05 - Site de Fontenay-aux-Roses

31 Av. de la Division Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses

6.2 VERIFICATIONS ET ADMISSION DE L'EQUIPEMENT

Les opérations de vérification et d'admission de l'équipement par l'ASNR sont décrites aux articles 9.6 et 9.7 du CCAP.

7 FORMATION

Dans un délai de trente (30) jours à compter de l'admission de l'équipement, une formation initiale d'une durée minimale de deux (2) jours ouvrés sera assurée sur site pour quatre (4) personnes maximums, portant sur :

- Le fonctionnement général de l'équipement.
- L'utilisation du logiciel.
- La maintenance de premier niveau.
- La sécurité d'emploi.

Un support de formation (papier ou numérique) devra être remis aux participants.

8 GARANTIE COMPLEMENTAIRE

8.1 OBJET DE LA GARANTIE COMPLEMENTAIRE

En sus de la garantie légale de conformité et de la garantie contractuelle de base de 12 mois prévue à l'article 9.10 du CCAP, le titulaire du marché s'engage à assurer une garantie contractuelle complémentaire d'une durée de vingt-quatre (24) mois, portant la durée totale de garantie à trente-six (36) mois à compter de la date de réception définitive de l'équipement.

Cette garantie complémentaire constitue une prestation faisant l'objet du présent marché et est incluse dans le prix forfaitaire global.

8.2 ETENDUE DE LA GARANTIE COMPLEMENTAIRE

Pendant toute la durée de la garantie contractuelle complémentaire, le titulaire s'engage à :

- Prendre en charge, sans surcoût pour le pouvoir adjudicateur, la fourniture et le remplacement de toute pièce défectueuse, hors pièces d'usure normale* ;
- Assurer, sans délai anormal, les interventions de maintenance curative en cas de panne ou de dysfonctionnement du système ;
- Assurer, le cas échéant, les mises à jour logicielles mineures nécessaires au fonctionnement correct du système ;
- Garantir une hotline technique ou un support utilisateur (téléphonique ou par mail) durant les jours ouvrés.

Nota : Sont exclues de la garantie les pièces consommables ou soumises à usure rapide du fait de l'usage normal de l'instrument (ex. : creusets, joints, filtres à gaz, etc.), sauf si le dysfonctionnement résulte d'un vice de fabrication ou d'un défaut d'intégration.

8.3 MODALITES D'INTERVENTION

Le titulaire devra intervenir dans un délai maximum de cinq (5) jours ouvrés à compter de la déclaration de l'incident par l'ASNR. Ce délai pourra être réduit en cas d'urgence ou de nécessité pour la continuité des missions de l'ASNR.

Le titulaire s'engage à respecter les engagements formulés dans son offre concernant :

- L'organisation de son service après-vente (localisation, moyens humains et matériels) ;
- Les coordonnées de la plateforme de contact ou du support technique ;
- Les plages horaires de disponibilité du service (a minima les jours ouvrés de 9h à 17h, heure de Paris).

8.4 PIECES DE RECHANGE

- Le titulaire garantit la disponibilité des pièces détachées pendant une durée minimale de cinq (5) ans à compter de la notification du marché.
- Les pièces fournies dans le cadre de la garantie complémentaire sont garanties pour la durée restante de la garantie en cours ou pour une période de douze (12) mois si supérieurs.

9 MAINTENANCE PREVENTIVE

Le présent marché prévoit la maintenance préventive de l'équipement pour une durée de vingt-quatre (24) mois à l'issue de la période de garantie.

Cette maintenance préventive constitue une prestation faisant l'objet du présent marché et est incluse dans le prix forfaitaire global.

Le titulaire assure une maintenance préventive complète de l'équipement, incluant l'ensemble des éléments constitutifs (unité principale, interface logicielle, etc.). Cette maintenance préventive a pour objet d'assurer la fiabilité, la stabilité des performances analytiques, la sécurité d'utilisation, ainsi que la pérennité du matériel sur la durée de vie contractuelle.

La maintenance préventive devra être réalisée une (1) fois par an, à dates convenues avec l'ASNR, et devra comprendre à minima les opérations suivantes :

- Vérification de l'état général des composants mécaniques et électroniques ;
- Contrôle des chambres de mesure, ensembles de circuits et accessoires ;
- Vérification des paramètres de fonctionnement ;
- Mise à jour logicielle ;
- Étalonnage ou vérification des performances métrologiques selon les spécifications du constructeur ;
- Remplacement préventif des pièces d'usure (ex. : joints, filtres, consommables critiques), en accord avec les préconisations du constructeur ;
- Remise d'un rapport d'intervention détaillé, précisant les opérations effectuées, les valeurs mesurées et les pièces éventuellement remplacées.

Le titulaire s'engage à mettre en œuvre ces prestations dans le respect des normes constructeur, et à ne pas altérer les performances analytiques du système. L'intervention est réalisée par un technicien qualifié, habilité à intervenir sur ce type d'instrument.

10 INTERLOCUTEURS ASNR

L'interlocuteur technique du titulaire pour cette prestation est Georges MATTA (PSE-ENV/SPDR/LETIS).

L'interlocuteur achats du titulaire pour cette prestation est Fabrice MARTIAL.

L'interlocuteur HSE (plan de prévention) est : Solène Poussielgue de DSSP/DFAR/SESA-FAR/CHSE-FAR