

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (CCTP)

Réf. : CCTP/PSE-ENV/SPDR/ 2026-

Objet : Acquisition d'un système de chauffage par rayonnement infrarouge de type panneau radiant et réalisation de prestations de service connexes

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS DU DOCUMENT

Indice	Date	Nature de la modification
0	10/03/2026	Version initiale du document
1		Version finale du document

Nom et visa du rédacteur : Georges MATTA  Date : 10/03/2026	Nom et visa du vérificateur : Alexandre DAUZERES  Date : 05/06/2026	Nom et visa de l'approbateur : François Marsal Date :
---	---	---

SOMMAIRE

1	OBJET DU MARCHÉ	3
2	PRESENTATION DE L'ASNR ET DESCRIPTION DU CADRE GENERAL DE LA PRESTATION ..	3
2.1	CADRE GENERAL	3
2.2	CADRAGE DU MARCHÉ	4
2.3	ETUDE DE FAISABILITE ET EXPERTISE TECHNIQUE	4
3	SPECIFICATIONS TECHNIQUES	5
3.1	ARCHITECTURE FONCTIONNELLE ATTENDUE.....	5
3.2	ENSEMBLE EMETTEUR RADIANT	6
3.2.1	Technologie attendue.....	6
3.2.2	Disposition géométrique.....	6
3.3	PERFORMANCES THERMIQUES.....	6
3.3.1	Exigences minimales	6
3.3.2	Température de surface de l'émetteur.....	7
3.4	DEFLECTEURS THERMIQUES	7
3.5	PROTECTION DES LAMPES – TUBE QUARTZ OU EQUIVALENT	7
3.6	PERCHE METALLIQUE PORTEUSE	7
3.7	PILOTAGE, CONTROLE-COMMANDE ET SUPERVISION	8
3.7.1	Armoire de puissance	8
3.7.2	Régulation.....	8
3.8	SUPERVISION	8
4	LIVRABLES DE LA PRESTATION	9
4.1	RAPPORT D'ETUDE DE FAISABILITE.....	9
4.2	BON DE LIVRAISON	9
4.3	CONNECTIVITE.....	9
4.4	RAPPORT DE VALIDATION	10
5	LIVRAISON ET RECEPTION	10
5.1	MODALITES DE LIVRAISON	10
5.2	RECEPTION DE L'EQUIPEMENT	11
6	FORMATION	11
7	INTERLOCUTEURS ASNR	11

1 OBJET DU MARCHÉ

Les spécifications techniques du présent CCTP concernent la fourniture, l'installation, la mise en service et la formation à l'utilisation d'un système de chauffage par rayonnement infrarouge de type panneau radiant (ci-après dénommé « l'équipement »).

Cet équipement est destiné à réaliser des essais de chauffage contrôlé sur des formations et matériaux argileux, étudiés dans le cadre du stockage géologique profond des déchets radioactifs, notamment en tant que roche hôte potentielle ou matériau de barrière géologique.

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. Les travaux expérimentaux associés seront réalisés au Laboratoire de Recherche Souterrain de Tournemire (LRST), dans un environnement représentatif des conditions géologiques profondes.

L'objectif est de sélectionner un système de chauffage par rayonnement infrarouge de type panneau radiant permettant de reproduire des sollicitations thermiques contrôlées représentatives d'un scénario d'incendie, afin d'étudier le comportement thermique de formations et matériaux argileux soumis à un flux thermique. Ce dispositif devra répondre aux exigences de performance, de fiabilité et de sécurité nécessaires à la réalisation d'essais expérimentaux au LRST, 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 MARCHÉ

L'étude du comportement thermo-hydro-mécanique de l'argilite soumise à des sollicitations thermiques intenses constitue un enjeu important pour l'évaluation de la sûreté des formations géologiques utilisées dans les projets de stockage profond des déchets radioactifs. Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux de recherche sont menés afin de mieux comprendre les propriétés et l'évolution de ces formations argileuses lorsqu'elles sont soumises à différentes perturbations, notamment thermiques, hydriques et mécaniques. Ces connaissances sont essentielles pour anticiper les modifications potentielles du milieu géologique et évaluer la capacité du système à maintenir ses propriétés de confinement sur le long terme.

Dans ce contexte, les recherches menées sur les formations argileuses visent à améliorer la compréhension des processus thermo-hydro-mécaniques susceptibles de se développer lorsque ces matériaux sont soumis à des sollicitations thermiques importantes, en particulier en régime transitoire ou lors de chocs thermiques. Ces travaux portent notamment sur les couplages entre élévation de température, transferts d'eau et de gaz, évolutions de pression dans les pores, déformation du matériau, ainsi que sur l'initiation, la nucléation et la propagation de fissures. Ils visent également à évaluer les conséquences de ces sollicitations sur l'évolution des propriétés de transport et de confinement, notamment la perméabilité à l'eau et au gaz après sollicitation thermique. L'acquisition de ces connaissances est indispensable pour renforcer l'expertise scientifique mobilisée à l'appui de l'évaluation des dossiers de sûreté relatifs au stockage géologique profond de déchets radioactifs.

Dans ce cadre, le projet « feu dans l'argilite » vise à étudier le comportement thermo-hydro-mécanique de l'argilite soumise à un chargement thermique intense, dans des conditions représentatives d'un essai in situ en galerie souterraine. L'objectif est de définir une stratégie expérimentale cohérente et progressive afin de mieux comprendre la réponse de l'argilite lorsqu'elle est exposée à des températures élevées, et d'identifier les effets potentiels sur l'intégrité de la formation géologique ainsi que sur les conditions de sûreté et d'exploitation.

Afin de réaliser ces essais, l'acquisition d'un système de chauffage par rayonnement infrarouge de type panneau radiant constitue un élément clé du dispositif expérimental. Cet équipement permettra d'appliquer un flux thermique contrôlé sur des parois d'argilite, au sein d'un forage vertical de 4 mètres de profondeur, afin de reproduire des conditions d'échauffement représentatives d'un scénario d'incendie en galerie souterraine. Les essais ainsi réalisés permettront de caractériser l'évolution thermique du matériau, d'analyser les transferts de chaleur et d'humidité, et d'observer les éventuelles modifications physiques ou mécaniques de l'argilite lorsqu'elle est soumise à un flux thermique élevé.

2.3 ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET EXPERTISE TECHNIQUE

Compte tenu du caractère innovant du dispositif recherché et des contraintes spécifiques liées à son intégration dans un forage en environnement souterrain, le titulaire devra réaliser une étude de faisabilité technique préalable à la conception détaillée du système.

Cette étude devra permettre de justifier les choix techniques retenus, d'évaluer les contraintes d'intégration mécanique, thermique et électrique du dispositif, ainsi que d'identifier les éventuels risques associés à son déploiement et à son exploitation.

Le titulaire devra notamment fournir une analyse technique portant sur :

- Le dimensionnement général du système de chauffage ;
- L'intégration du dispositif dans le forage ;
- La tenue mécanique et thermique des composants ;
- La distribution du flux thermique attendu sur la paroi ;
- Les contraintes de sécurité et d'exploitation ;
- Les besoins éventuels en maintenance ou remplacement des composants.

Cette prestation d'expertise devra faire l'objet d'un rapport spécifique comprenant les hypothèses retenues, les calculs de dimensionnement, les schémas de principe et les recommandations techniques associées.

L'ASNR se réserve la possibilité d'échanger avec le titulaire sur les conclusions de cette étude avant validation définitive de la conception du système.

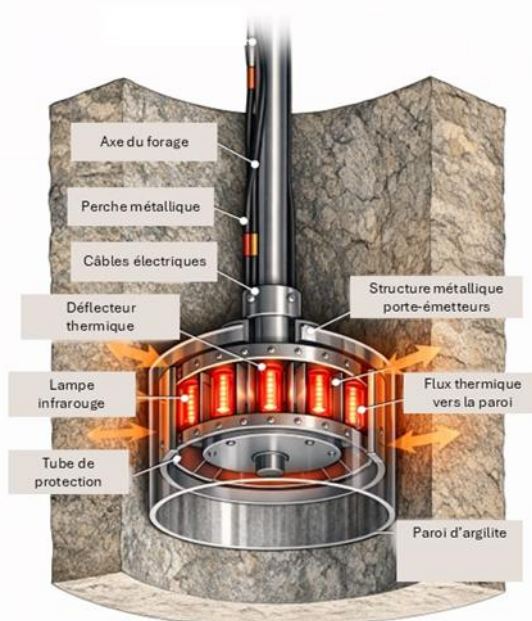
3 SPECIFICATIONS TECHNIQUES

3.1 ARCHITECTURE FONCTIONNELLE ATTENDUE

Le système devra être constitué :

- D'un ensemble radiant cylindrique ;
- D'une structure porteuse (perche) ;
- D'un système de déflecteurs thermiques ;
- D'un dispositif de protection des lampes ;
- D'un système complet de pilotage et de sécurité ;

Le schéma de principe du dispositif est illustré dans la figure suivante, générée à l'aide d'un outil d'intelligence artificielle.



3.2 ENSEMBLE EMETTEUR RADIANT

3.2.1 *Technologie attendue*

Le titulaire proposera une solution industrielle robuste basée sur :

- Lampes infrarouges ;
- Ou éléments IR céramiques haute température ;
- Ou technologie équivalente adaptée aux fortes densités surfaciques.

Les lampes devront être fixées mécaniquement sur un support métallique rigide formant une structure cylindrique.

Le titulaire devra également préciser :

- La puissance électrique maximale du système complet ;
- La durée de vie typique des lampes ou émetteurs chauffants ;
- Les modalités de remplacement des éléments chauffants.

La puissance nominale des émetteurs est fixée à 100 kW.

3.2.2 *Disposition géométrique*

Contrairement à un chauffage unidirectionnel, le système devra assurer :

- Une émission radiante sur toute la circonférence (360°) ;
- Une homogénéité angulaire maximale ;
- Une distance constante entre surface émettrice et paroi d'argilite.

Configuration attendue :

- Modules répartis sur la périphérie d'un cylindre inscrit dans un forage de diamètre nominal 250 mm. Afin de laisser une flexibilité suffisante dans la conception du système, le titulaire pourra également proposer des variantes adaptées à des forages de diamètre 280 mm, 332 mm ou 360 mm. Pour chacune des configurations proposées, le titulaire devra préciser les adaptations techniques nécessaires, les performances attendues du système ainsi que les éventuelles incidences sur le dimensionnement, la puissance installée et les conditions d'exploitation ;
- Diamètre extérieur du module : à définir et justifier par le titulaire en fonction du diamètre du forage retenu ;
- Longueur chauffée indicative : comprise entre 0,5 m et 1 m ;
- Des variantes avec une longueur chauffée réduite jusqu'à 0,5 m pourront être proposées par le titulaire. Il devra alors justifier les choix retenus et préciser les conséquences éventuelles sur les performances thermiques, l'homogénéité du flux radiatif, le nombre de modules nécessaires.

Le titulaire devra fournir un plan d'implantation détaillé pour chaque configuration proposée.

3.3 PERFORMANCES THERMIQUES

3.3.1 *Exigences minimales*

Le système devra permettre :

- Une densité de flux de chaleur radiatif incidente à l'argilite jusqu'à 100 kW/m² ;
- Une variation continue de puissance de 0 à 100% ;
- Un pilotage stable en palier thermique.

Le titulaire devra préciser la puissance électrique totale installée ainsi que le rendement thermique estimé du système.

3.3.2 Température de surface de l'émetteur

La température de surface de l'émetteur devra être comprise dans une plage de 900 à 1000°C, sous réserve de compatibilité avec les contraintes mécaniques et de sécurité. Le titulaire devra fournir :

- Les caractéristiques nominales des émetteurs ;
- La densité surfacique maximale admissible ;
- La justification thermique du dimensionnement.

3.4 DEFLECTEURS THERMIQUES

Le support comprendra des déflecteurs (type inox avec poli miroir) entre la perche centrale et les lampes ayant pour objet de maximiser le flux radiant vers l'extérieur. Afin de limiter la chauffe des déflecteurs, ceux-ci devront être adaptés pour favoriser leur ventilation par convection (espacement derrière le déflecteur, perçages...).

Les matériaux devront présenter :

- Une bonne tenue à haute température ;
- Une faible oxydation en ambiance souterraine caractérisée par une humidité relative comprise entre 30 % et 95 %, ainsi que par la présence de poussières en suspension ;
- Une rigidité mécanique suffisante.

3.5 PROTECTION DES LAMPES – TUBE QUARTZ OU EQUIVALENT

Le titulaire devra proposer un système de protection des émetteurs, par exemple :

- Tube quartz ;
- Ou enveloppe transparente IR compatible.

Rôle attendu :

- Protection mécanique contre projections et poussières ;
- Protection contre les chocs lors de l'insertion ;
- Maintien de la transmission du rayonnement infrarouge ;
- Résistance thermique compatible avec les flux imposés.

Le titulaire devra justifier :

- La transparence spectrale ;
- La tenue thermique ;
- La compatibilité avec 100 kW/m².

3.6 PERCHE METALLIQUE PORTEUSE

La perche devra :

- Assurer la rigidité sur 3-4 m ;
- Supporter le poids du module chauffant ;
- Permettre le passage des câbles ;
- Intégrer un système de verrouillage en partie basse ;
- Résister aux températures et contraintes mécaniques.

Matériaux recommandés : acier inoxydable ou alliage haute température.

Un système de centrage, au-dessus et en dessous de la zone de chauffe devra être prévu afin d'éviter tout contact direct entre émetteur et paroi.

Prévoir la possibilité d'installer, en partie basse, un système de ventilation forcée (type ventilateur ou soufflage d'air) afin de limiter l'échauffement excessif de la perche porteuse, des câbles d'alimentation, des connectiques et des équipements associés. Dans ce cadre, l'ASNR pourra réaliser un forage secondaire de 76 mm ou 96 mm de diamètre, interceptant le forage vertical principal dans sa partie basse avec une inclinaison d'environ 45°, afin de permettre l'intégration d'un dispositif de ventilation indépendant destiné à assurer le refroidissement des équipements et composants situés dans le forage. Le titulaire devra prendre en compte cette possibilité dans sa conception et préciser les modalités d'intégration ainsi que les éventuelles contraintes associées à un tel dispositif.

3.7 PILOTAGE, CONTROLE-COMMANDE ET SUPERVISION

3.7.1 Armoire de puissance

Le titulaire fournira :

- Un coffret ou une armoire électrique ;
- Une variation de puissance ;
- Des protections adaptées ;
- Un arrêt d'urgence.

3.7.2 Régulation

Le système devra permettre :

- Un mode régulation en température (PID) $\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- Un mode puissance imposée.

Les paramètres suivants devront être enregistrés :

- Température de la surface de l'émetteur ;
- Puissance appliquée ;
- Flux thermique ;
- Historique de puissance et état du système.

3.8 SUPERVISION

Le système de supervision devra être mis en œuvre sous LabVIEW 2021 ou version ultérieure, ou être entièrement compatible avec cet environnement, afin de permettre le pilotage, l'acquisition et la visualisation des données expérimentales.

- Les fichiers devront inclure l'ensemble des paramètres enregistrés pendant les essais, notamment la température des émetteurs, la puissance électrique appliquée, le flux thermique estimé ou mesuré, ainsi que les paramètres de régulation (consigne, erreur de régulation, signal de commande) et l'évolution temporelle des mesures. Les données devront être structurées, lisibles et facilement exploitables en format CSV afin de permettre une analyse détaillée des essais, la comparaison et la reproductibilité des expériences, ainsi que leur intégration dans des outils de traitement de données externes. Les fichiers devront être organisés de manière claire, avec un horodatage et une identification des essais et des paramètres de configuration. Le système devra également permettre la visualisation des principaux paramètres expérimentaux via un tableau de

bord, incluant notamment l'évolution de la température, de la puissance et des paramètres de régulation. Enfin, les enregistrements devront inclure un historique de puissance, un suivi des paramètres de régulation ainsi qu'un journal des alarmes et événements, incluant notamment les dépassements de seuil de température (pour la perche par exemple), les anomalies de régulation, les défauts capteurs (perte ou incohérence de signal) et tout dysfonctionnement du système, afin d'assurer la traçabilité complète du fonctionnement du dispositif pendant les essais.

4 LIVRABLES DE LA PRESTATION

4.1 RAPPORT D'ETUDE DE FAISABILITE

Le titulaire devra remettre un rapport d'étude de faisabilité et d'expertise technique présentant les différentes solutions envisagées pour répondre au besoin exprimé dans le présent CCTP.

Ce rapport devra notamment inclure :

- La description des solutions techniques proposées ;
- Les hypothèses de dimensionnement ;
- Les calculs ou simulations justificatives disponibles ;
- Les contraintes identifiées ;
- Les recommandations du titulaire ;
- Une estimation des performances attendues.

Dans le cas où plusieurs variantes seraient proposées, notamment pour différents diamètres de forage (250 mm, 280 mm, 332 mm ou 360 mm) ou différentes longueurs de modules chauffants et de lampes infrarouges (0,5 ou 1 m), le rapport devra présenter une analyse comparative technique des solutions envisagées.

Pour chaque variante proposée, le titulaire devra préciser les adaptations techniques nécessaires, les performances attendues, les avantages et limitations identifiés, ainsi qu'une estimation détaillée des coûts associés.

L'offre devra distinguer clairement le coût de la solution de référence et celui des différentes variantes proposées afin de permettre à l'ASNR d'évaluer les options techniques et économiques les plus adaptées aux objectifs du projet.

4.2 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.

4.3 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. Le titulaire fournira également un PC dédié, compatible avec l'ensemble des

logiciels et interfaces nécessaires à l'exploitation du système. Les caractéristiques matérielles et logicielles du poste fourni devront être précisées dans l'offre.

4.4 RAPPORT DE VALIDATION

- À l'issue de l'installation et de la mise en service, le titulaire devra fournir un certificat de conformité attestant que l'équipement livré est conforme aux spécifications techniques et fonctionnelles définies dans le contrat. Un rapport de validation du système devra également être transmis. Ce document devra décrire les essais réalisés lors de la mise en service afin de vérifier le bon fonctionnement de l'équipement, notamment la vérification du fonctionnement des éléments chauffants, le contrôle de la puissance délivrée et de sa variation, la vérification du système de régulation et de pilotage ainsi que le bon fonctionnement des dispositifs de sécurité. Concernant les capteurs de mesure, le titulaire devra également fournir les documents d'étalonnage incluant, lorsque cela est applicable, la traçabilité des étalonnages vers des standards reconnus, notamment pour les capteurs de température (thermocouples, sondes PT100 ou équivalents), les capteurs de flux thermique, ainsi que tout autre capteur utilisé pour le pilotage, la régulation ou l'acquisition des données du système.
- Documentation technique : le titulaire devra fournir, au moment de la livraison de l'équipement, l'ensemble de la documentation technique nécessaire à l'exploitation, à la maintenance et au dépannage du système.
- Manuels d'utilisation et guides de dépannage : ces documents devront inclure toutes les informations nécessaires à l'utilisation correcte de l'équipement, à sa mise en service et à son exploitation en conditions normales. Ils devront être complets et facilement compréhensibles et inclure notamment des schémas mécaniques et électriques, des instructions détaillées sur les procédures de fonctionnement, ainsi que des recommandations permettant d'éviter les erreurs d'utilisation les plus courantes.

5 LIVRAISON ET RECEPTION

5.1 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**Station expérimentale de Tournemire****Site du Tunnel de la Boutinenque****12250 Tournemire****5.2 RECEPTION DE L'EQUIPEMENT**

La réception du système se fera en deux étapes : une réception en usine et une réception sur site.

Réception en usine : un essai de fonctionnement sera réalisé en usine en présence du chargé d'affaires de l'ASNR. Cet essai devra permettre de vérifier le bon fonctionnement global du système ainsi que la conformité aux spécifications techniques. Les essais porteront notamment sur :

- Le fonctionnement des modules radiants ;
- Le pilotage et la régulation thermique ;
- L'acquisition et l'enregistrement des données ;
- Le bon fonctionnement des dispositifs de sécurité et des alarmes.

Un procès-verbal d'essai en usine devra être établi et validé par les parties.

Réception sur site : une fois le système installé, un essai de réception sur site sera réalisé afin de vérifier le bon fonctionnement du dispositif dans son environnement d'exploitation. Cet essai comprendra notamment :

- La vérification de l'installation complète ;
- Des tests de montée en température ;
- La validation des chaînes de mesure et de régulation ;
- Le bon fonctionnement des systèmes de sécurité et d'acquisition.

Un procès-verbal de réception sur site sera également établi.

6 FORMATION

Dans un délai de trente (30) jours à compter de l'admission de l'équipement, une formation initiale d'une durée d'une journée 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.

7 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 Marine Rigal (DAF/SAC).

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