

Réf. : PSN-RES/SCA/LEMAC/2026-00163

SENSIBLE : Non

Objet :

Marché mixte relatif à la fourniture et à la mise en service d'une chaîne de mesure TR-PIV pour l'installation DIESE, et à la réalisation de prestations de service associées.

Nom et visa du rédacteur : Jeanne Malet Date : 07/05/2026  Signature numérique de MALET	Nom et visa du vérificateur : N. Le Roux Date : 07 /05 /2026  Nicolas LE ROUX	Nom et visa de l'approbateur : S. Fourgeaud Date : 07 /05 /2026  FOURGEAUD Sarah
--	---	--

ARTICLE 1 - PRESENTATION

1.1. Cadre

Le présent cahier des charges est émis par le laboratoire d'expérimentations et de modélisation en aérodispersion et confinement (LEMAC) du service du confinement et de l'aérodispersion des polluants (SCA) de l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR).

Le LEMAC est basé sur le centre d'études nucléaires de Saclay (91). Il a pour mission d'effectuer des recherches et des études concernant la caractérisation des transferts d'espèces, gazeuses et particulaires, au sein des installations nucléaires, en situations normale ou accidentelle. Il peut ainsi être amené à utiliser des moyens métrologiques basés sur la vélocimétrie par imagerie de particules (technique communément appelée « PIV »). Ces moyens apportent en effet des informations quantitatives importantes pour l'interprétation des phénomènes physiques impliqués dans les mécanismes de transfert. Ces informations peuvent également être exploitées pour la validation des outils de calculs utilisés par le laboratoire. En particulier, l'installation DIESE permet l'étude des écoulements turbulents dans des gaines de ventilation de section rectangulaire, en vue de l'étude du dépôt des aérosols dans les réseaux de ventilation.

Le présent marché a pour objet l'achat, la livraison, l'installation et la mise en service d'un système TR-PIV (« Time-Resolved Particle Image Velocimetry »), incluant entre autres un laser à double cavité haute fréquence et une caméra PIV associée, permettant l'analyse des structures turbulentes instationnaires, des phénomènes de recirculation et des grandeurs statistiques turbulentes nécessitant des acquisitions résolues temporellement dans l'installation DIESE.

Ce laser et la caméra sont destinés à une utilisation en recherche et seront intégrés à un système déjà existant.

Dans le présent document, le terme TR-PIV désigne des acquisitions temporellement résolues réalisées en double-frame réel sur des séquences continues.

1.2. Zone d'installation du laser et caméra

Les champs de mesure envisagés sont situés en aval du coude n°4 ou de la jonction n°7 de la figure 1 qui représente l'installation DIESE.

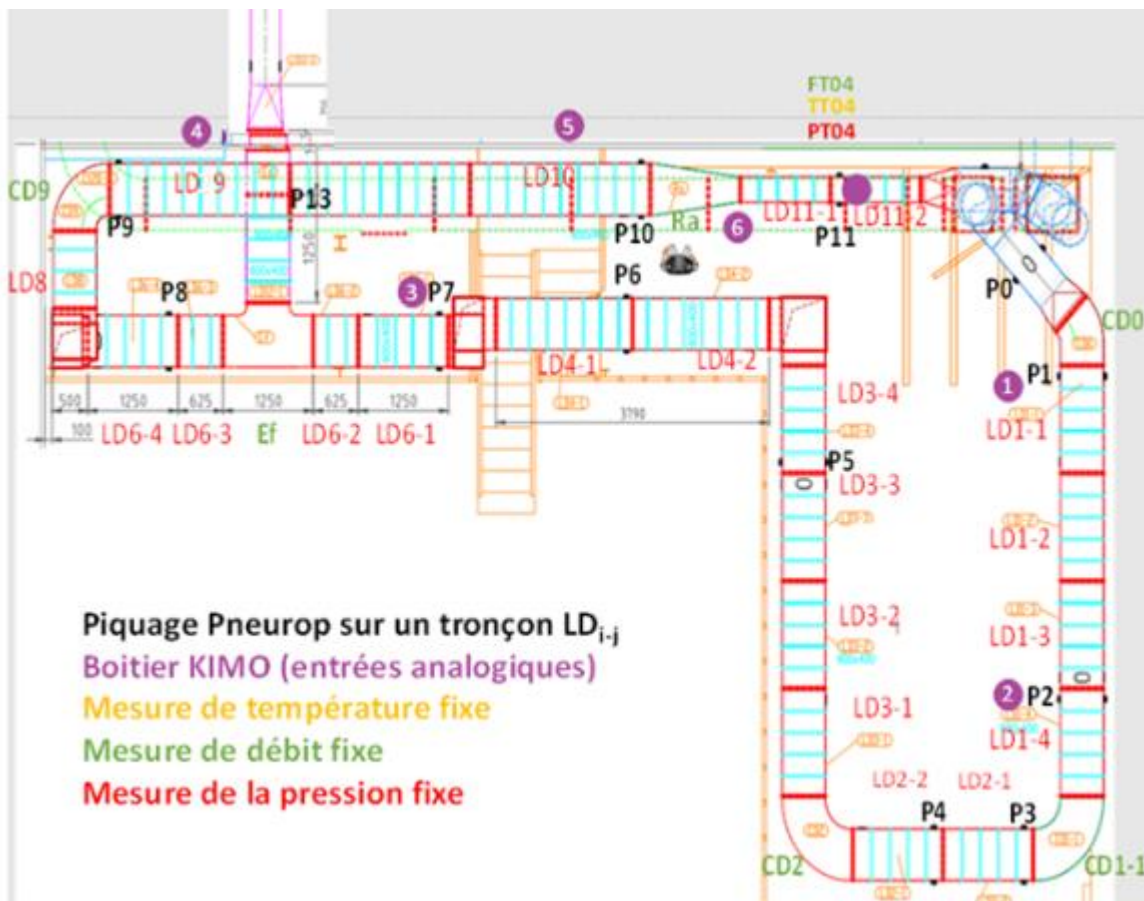
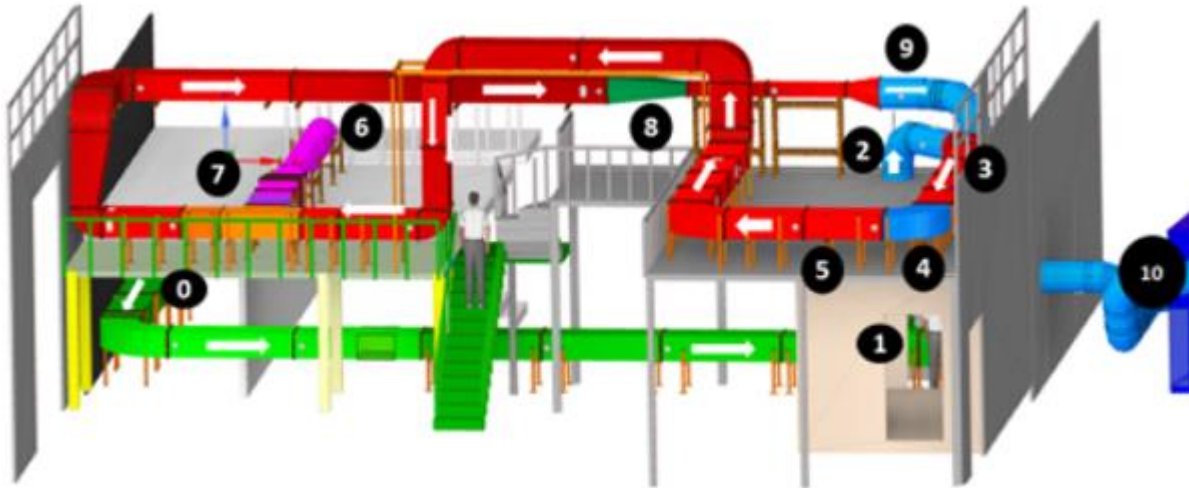


Figure 1 : En haut, installation expérimentale DIESE en vue 3D avec les zones de mesures en aval des points 4 et 7, et en bas, vue de haut, avec les zones de mesures entre P3 et P4 et vers P8 ; la distance entre deux traits rouges consécutifs sur la figure du bas est de 1.25 m

Équipement PIV existant sur l'installation DIESE

L'installation DIESE dispose déjà d'une PIV stéréo Basse Fréquence, avec un laser, un logiciel Davis version 10 et 11 avec un PC fourni par La Vision, d'une PTU Lavision permettant la synchronisation entre la caméra et la laser, de deux caméras Lavision et des Schleifung associés pour la stéréo PIV, d'objectifs Nikon 24 mm, d'un objectif Canon MP-E 65mm 1:2.8 1-5x Macro, d'une mire de calibration La Vision pour la stéréo PIV, d'un bras optique pour longueur d'onde 532nm de 2100 mm de long. Côté licences, deux licences d'acquisition PIV sont

disponibles, deux licences de traitement de données PIV, une licence d'acquisition et traitement BOS, une licence d'imagerie.

Les montages optiques disponibles sont présentés sur les figures 2 (zone aval du point 4 sur la figure 1) et la figure 3 (zone aval de 7).

*

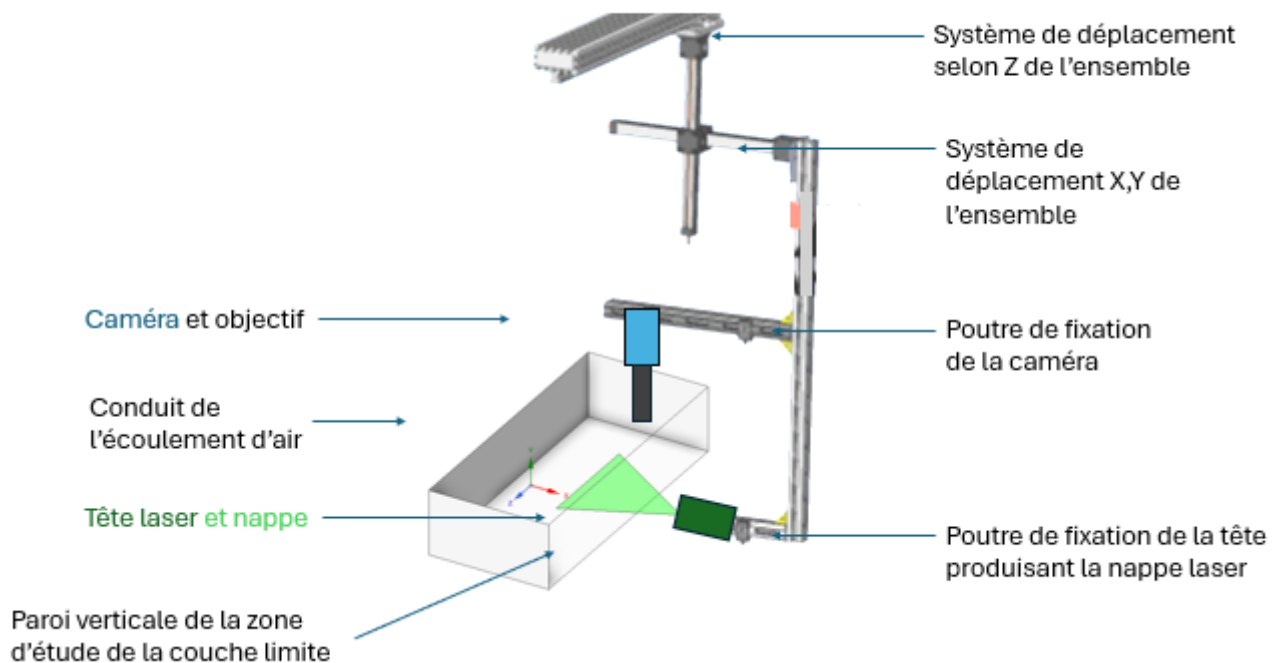


Figure 2 : zone globale de positionnement de la caméra et de la tête laser en zone aval du point 4 sur la figure 1

Les spécifications de ces éléments (existants) peuvent être demandés à l'ANSR. Une visite de l'installation pour évaluer les contraintes est recommandée afin d'évaluer les contraintes d'encombrement, d'implantation optique, de refroidissement, de câblage, et de manutention.

La conservation de l'environnement matériel et logiciel LaVision / DaVis actuellement déployé sur DIESE constitue un objectif majeur de la présente prestation. Les solutions nécessitant des développements spécifiques non maintenus commercialement ou des workflows externes complexes seront considérées comme défavorables.

Caractéristiques des champs de vitesses envisagés

D'une manière générale, cette chaîne de mesure devra permettre l'étude de la zone de la couche limite dans un conduit rectangulaire en plexiglas transparent de section rectangulaire de dimensions internes 600 mm × 400 mm (largeur × hauteur) dans lequel circule un écoulement d'air turbulent. La zone d'étude se situe en aval d'une singularité, comme un coude ou une bifurcation (T-junction). Dans cette zone aval, des écoulements transverses se forment, une zone de décollement et un gradient de pression se forment, donnant lieu à des profils de vitesse en proche paroi différents de la loi de paroi standard. Les mesures à réaliser avec l'équipement fourni ici sont de deux types de configuration :

- Des mesures en configuration « champ global » correspondant à un champ de mesure de l'ordre de 30 cm de largeur ;
- Des mesures en configuration « proche paroi » correspondant à un champ de mesure de l'ordre de 10 cm de largeur.

Les champs PIV envisagés correspondent principalement à des plans horizontaux dans le conduit. Les vitesses d'air sont de l'ordre de 3 à 12 m/s. Des zones de décollement et recirculation sont présentes dans les champs.

L'ASNR souhaite pousser le traitement :

- Pour la configuration « champs global » : l'ambition de mesurer le cisaillement, la vorticité et le critère Q
- Pour la configuration « proche paroi » : l'ambition est d'accéder à certaines composantes du tenseur de Reynolds, notamment les contraintes normales et de cisaillement en proche paroi.,

Objectif des mesures et qualité

L'objectif des acquisitions haute fréquence est notamment de permettre l'analyse des structures turbulentes stationnaires, des phénomènes de recirculation et des grandeurs statistiques turbulentes nécessitant des acquisitions résolues temporellement.

La résolution spatiale (qui inclue à la fois la taille de la fenêtre d'interrogation et l'épaisseur de la nappe laser), La résolution spatiale, qui dépend notamment de la taille des fenêtres d'interrogation, de l'épaisseur de la nappe laser, de l'énergie disponible, des performances de la caméra, des objectifs utilisés, devra être considérée avec le même niveau d'importance que la résolution temporelle.

Le titulaire devra donc expliciter les compromis proposés entre la résolution spatiale, la résolution temporelle, la taille des champs accessibles, et la qualité métrologique des mesures.

Dans le cadre du présent marché, une acquisition TR-PIV est définie comme une acquisition temporellement résolue réalisée en mode continu, sans interruption de la séquence d'acquisition sur la durée spécifiée. Les modes de type "burst", "burst sequence", "burst train", "double burst acquisition" ou toute acquisition discontinue séparée par des temps morts non négligeables ne seront pas considérés comme des acquisitions TR-PIV continues au sens du présent cahier des charges.

Toute performance annoncée devra préciser explicitement si elle correspond à une acquisition continue ou à un mode discontinu. Si les performances sont trop contraintes pour l'une des configurations étudiée, il faudra préciser que l'utilisation prévue est en séquences non continues.

On s'inspirera des travaux de Foucaut et al. (2021) et de Manovski et al. (2025) qui présentent le type de mesures envisagées en couche limite, ce dernier discutant plus particulièrement des difficultés concernant la résolution spatiale en complément de la résolution temporelle.

Foucaut, J.M., George, W.K., Stanislas, M. *et al.* . *Exp Fluids* **62**, 244 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03339-9>

Manovski, P., Abu Rowin, W., Ng, H. *et al.* r. *Exp Fluids* **66**, 134 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00348-025-04059-0>

La robustesse métrologique et la qualité des mesures seront privilégiées par rapport aux seules performances maximales annoncées.

ARTICLE 2 - DEFINITION DE LA PRESTATION

La prestation comprend :

1. LASER un équipement laser haute fréquence dans l'objectif des mesures précisées dans l'article 1 ; ce laser devra être totalement compatible avec la suite PIV LAVISION actuellement disponible sur DIESE, permettant de réaliser la PIV 2D2C et 2D3C à basse fréquence, telle que décrite dans l'article 1 ;
2. BRAS OPTIQUE : il est prévu d'utiliser ce laser avec le bras optique existant sur DIESE (caractéristique sur demande) ; La réduction de puissance liée au bras optique devra être discutée dans le dossier technique qui sera remis ;
3. GENERATEUR DE NAPPE : le générateur de nappe compatible avec ce laser et ses lentilles devra être fourni pour permettre de réaliser différentes nappes pour les mesures d'intérêt couvrant les champs envisagés sur DIESE (gaine et proche paroi) ;
4. CAMERA : une caméra haute fréquence pour la PIV (double frame), la fréquence d'acquisition de la caméra sera cohérente avec celle du laser et la résolution du capteur ; l'alimentation électrique de la caméra devra être fournie si la caméra n'est pas alimentée par le PC à disposition sur DIESE ; la caméra devra être totalement compatible avec la suite PIV LAVISION actuellement disponible sur DIESE, permettant de réaliser la PIV 2D2C et 2D3C à basse fréquence, telle que décrite dans l'article 1
5. CABLAGE : les longueurs de câbles fournis pour tous les équipements devront permettre de réaliser de la PIV sur DIESE soit sur la plate-forme COUDE, soit sur la plate-forme BIFURCATION dans des conditions adéquates ;
6. OBJECTIFS : les choix du ou des objectifs seront cohérents avec les champs d'étude envisagés précisés dans l'article 1 ; à noter que l'installation DIESE dispose d'objectifs (la liste est donnée plus haut), et s'ils peuvent être utilisés, ils ne sont pas à fournir ;
7. MATERIEL OPTIQUE : les baques d'adaptation caméra/objectif, les filtres aux longueurs d'onde du laser, sont à fournir si nécessaire ;
8. MATERIEL OPTO-MECANIQUE : un support devra être fourni pour fixer la caméra sur les profilés Rose-Krieger et les platines de translation disponibles sur DIESE
9. SYNCHRONISATION : le boîtier de synchronisation entre la caméra et le laser devra être fourni et doit permettre à l'ensemble de fonctionner avec les éléments existants ou à fournir ;
10. SOFTWARE : La conservation de l'environnement LaVision / DaVis actuellement déployé sur DIESE est fortement privilégiée ; les solutions proposées devront permettre : l'acquisition, la synchronisation, le traitement PIV, les traitements statistiques, l'analyse qualité sans développement spécifique utilisateur. Toute solution alternative à DaVis devra démontrer explicitement la compatibilité complète avec les workflows existants, l'absence de perte fonctionnelle, ainsi que la pérennité du support logiciel proposé et offrir le même nombre total de licences (acquisition, traitement, autres softs) que celui donné dans la liste du matériel existant ;
11. ORDINATEUR : un PC est à fournir si le PC existant s'avère inadapté à la TR-PIV, ou si les éléments de la PIV de DIESE existante ne sont pas compatibles ; le titulaire devra garantir un débit d'écriture sur le disque soutenu compatible avec les acquisitions continues à fréquence nominale maximale sans perte d'images ;
12. CHAMPS ETUDIES et RESOLUTION : le document technique devra préciser les résolutions obtenues pour des vitesses de 4 à 15 m/s sur des champs globaux (30 cm de large) et des champs réduits en proche paroi (10 cm de large) et les hauteurs de la caméra par rapport au haut de la gaine dans les configurations avec bras optique dans un agencement tel que celui de la figure 2 ; ce point est particulièrement important. Le titulaire s'engage à respecter les données indiquées sur ce point dans fichier Excel « Cadre de réponse technique » complété qu'il aura remis dans son offre ;
13. POST-TRAITEMENT des grandeurs mesurées : les programmes PYTHON permettant d'extraire des profils de vitesse, de composantes du tenseur de Reynolds, vorticité, et grandeurs qualité ; Les données acquises devront être exportables dans un format compatible avec les scripts Python existants utilisés

sur l'installation DIESE, sans nécessité de reformatage spécifique ou de conversion propriétaire complexe

14. **ANALYSE de la qualité du signal** : l'analyse de la qualité de la mesure est un point fondamental et doit être rendue aisée et automatique : soit prévue dans le logiciel, soit par des programmes Python à fournir : champs de corrélation moyenne sur chaque paires d'images et du pic ratio, champs de densité d'ensemencement, qualité du focus, histogramme des déplacements en pixel, convergence des statistiques, quantification des incertitudes, etc. etc ; toutes les possibilités d'analyse de la qualité de la mesure fournie par le logiciel devront être précisées dans le document et fournis si un autre logiciel de Davis est proposé ; Les outils proposés devront permettre une analyse automatisée de la qualité des acquisitions ; Ces fonctionnalités devront être accessibles soit directement dans le logiciel d'acquisition et de traitement proposé, soit via une interface permettant une exportation directe des données vers Python sans perte d'information ni conversion complexe ; la facilité d'analyse de la qualité des mesures est un point fondamental dans cette demande ;
15. **CHARIOT de TRANSPORT du laser** : La zone d'observation se trouve à l'étage de l'installation DIESE (cf. Figure 1), sur une mezzanine dont la charge maximale est de 250 kg/m². L'encombrement est également conséquent sur cette mezzanine, et les zones de mesures peuvent être déplacées. Un chariot de transport devra être spécifiquement conçu pour permettre de déplacer le laser sur la mezzanine ; ce chariot devra être compatible avec la plateforme élévatrice qui permet de monter le matériel sur la mezzanine de DIESE (plateforme d'élévation d'une surface de 1 m de large x 1,2 m de long) ;
16. **GENERATEUR D'ENSEMENCEMENT** : si les dispositifs d'ensemencement plus optimaux que ceux actuellement utilisés sur DIESE (poudre d'alumine via un RBG, Safex, et générateur d'huile- référence sur demande) existent, le générateur doit être proposé et le titulaire s'engage à respecter les informations données dans le cadre de réponse technique relatives à sa plus-value par rapport au dispositif existant sur DIESE actuellement ; cette plus-value devra être validée à la mise en service ;
17. **LIVRAISON, INSTALLATION et MISE EN SERVICE** : la livraison et l'installation sur site sur la mezzanine de DIESE sera prévue à des dates à convenir avec le CLIENT ; la vérification du bon fonctionnement de l'équipement et sa mise en service devront être réalisés dans la foulée, avec une formation minimale sur les appareils et logiciels associés ;
18. **FORMATION INITIALE** : si les logiciels proposés sont autres que DAVIS, une aide aux premières manipulations, acquisitions et traitement de données pour 3 personnes de trois (3) x deux (2) jours non consécutifs est à prévoir dans un délai de 6 mois après la mise en service ; cette formation devra permettre l'obtention de mesures, de leur validation et du traitement associé dans les conditions expérimentales de DIESE d'un écoulement typique (par exemple écoulement en aval d'une bifurcation) ;
19. **FORMATION EXPERT** : une session de formation de deux (2) jours non consécutifs dans un délai maximum de 12 mois après la mise en service devra également être réalisée afin d'aider le personnel de DIESE sur des difficultés d'acquisition ou de post-traitement spécifique
20. **ASSISTANCE TECHNIQUE** : les prestations d'assistance technique correspondant à une aide à l'utilisation en situation réelle, au réglage du laser/bras optique en cas de déplacement du matériel, au traitement des images, chiffré dans le bordereau des prix unitaires sous forme de demi-journées ou de journées. Ces prestations sont commandées après validation du devis par l'ASNR et émission des bons de commande. Ces prestations relèvent de la partie « accord-cadre à bons de commande ».
21. **MAINTENANCE PREVENTIVE** : les prestations de maintenance préventive correspondent à l'entretien du laser (eau, vidange, changement des filtres), aux réglages des cavités, et aux réglages du bras optique, devra être fourni en y spécifiant la fréquence nécessaire ; si une partie de cette maintenance est simple et réalisable par l'utilisateur, ce poste peut être séparé en deux parties, avec une notice explicative pour la maintenance à faire par l'utilisateur (avec sa fréquence) et les spécifications de ce qui sera fait sur l'autre partie de la maintenance préventive. Le titulaire devra assurer une visite annuelle périodique. Les modalités de mise en œuvre de ces prestations sont décrites dans le CCAP.
22. **MAINTENANCE CURATIVE** : les prestations de maintenance curative à la demande, spécifiant le délai de prise en charge de 48h maximum, le délai d'intervention (délai moyen à préciser) et le délai de réparation ; ce dernier est en fonction des causes de pannes les plus courantes rencontrées sur ce type de laser/caméra, qui pourront être listées, en spécifiant la durée de vie des principaux composants et les coûts de renouvellement, ainsi que les délais de remplacement. Les modalités de mise en œuvre de ces prestations sont décrites dans le CCAP.

ARTICLE 3 - DOCUMENTATION

Une documentation complète et détaillée (plans et notices) devra être fournie en français ou/et en anglais.

La fourniture de notes techniques ou publications scientifiques mentionnant l'utilisation du matériel proposé dans ce marché notamment dans des applications similaires (stéréo piv, couche limite) est prise en compte dans l'évaluation.

ARTICLE 4 - ACTEURS

L'interlocuteur technique pour le suivi de cette affaire est :

Jeanne Malet
ASNR/PSN-RES/SCA
BP 68
91192 Gif sur Yvette Cedex
jeanne.malet@asnr.fr
Tél : 01 69 08 87 40