

LIEU & DATE
Paris, Avril 2026

MAITRISE D'ŒUVRE

ARCHITECTES MANDATAIRES
EMERGENCE ARCHITECTES
21 rue Chaptal
75009 PARIS

BET FLUIDES - CSSI
C.I. TECH
1 rue de Terre Neuve – Bâtiment J
91940 Les Ulis

ÉCONOMISTES
EMERGENCE INGENIERIE
21 rue Chaptal
75009 PARIS

BET RADIOPROTECTION
D&S INGENIERIE
573, avenue de l'Hermitage
30200 BAGNOLS-SUR-CEZE

MAÎTRISE D'OUVRAGE

OPPIC - OPERATEUR DU PATRIMOINE
ET DES PROJETS IMMOBILIERS DE LA CULTURE
30 rue du château des rentiers – CS61336 – 75647 PARIS cedex 13



TRAVAUX PREPARATOIRES A LA MISE EN SERVICE D'UNE
NOUVELLE LIGNE DE TIR POUR AGLAE (PIXXL) DANS LES
LOCAUX DU C2RMF SITUE AU LOUVRE

14, Quai François Mitterrand, 75001 PARIS



DCE
LOT 04 – SYSTEME DE RADIOPROTECTION

04 / 2026	DIAG	AVP	DCE.	MARCHE	CHANTIER	D.O.E.
PHASES			X			



Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

1	GENERALITES	4
1.1	PRESENTATION DU PROJET	4
1.2	OBJET DU DOCUMENT	5
1.3	PERIMETRE DES TRAVAUX CONCERNES :	5
1.4	ENGAGEMENT DE L'ENTREPRENEUR	5
1.5	ALLOTISSEMENT	6
2	REFERENCES REGLEMENTAIRES ET NORMATIVES	7
3	REFERENCES DE L'INSTALLATION	7
4	PRESENTATION DE L'ETAT INITIALE DE L'INSTALLATION	8
4.1	Présentation de l'installation	8
4.2	Caractéristique générale de l'installation	10
4.3	Dispositif de sécurité générale en place	11
4.3.1	Automate de sécurité	11
4.3.2	Contrôle des accès	12
4.3.3	Communication avec l'automate de contrôle commande	13
4.3.4	Arrêts d'urgence	13
4.3.5	Balisage et signalisation	15
4.4	Mode de fonctionnement de l'installation et zonage radiologique	16
4.4.1	Machine éteinte	16
4.4.2	Machine en fonctionnement normal en mode protons/alphas	16
4.4.3	Machine en fonctionnement normal en mode deutons	17
5	PRESENTATION DE LA NOUVELLE LIGNE PIXXL ET DISPOSITIFS DE SECURITE A CONSIDERER SELON LES MODES	18
5.1	Utilisation	18
5.2	Automate et contrôle des acces	19
5.3	Balisage et signalisation	20
5.4	Zonage selon les modes d'utilisation sur la nouvelle installation	21
5.4.1	Mode alphas/protons, ligne NewAGLAE, faisceau extrait	21
5.4.2	Mode alphas/protons, faisceau non extrait (mode chambre à vide)	22
5.4.3	Mode alphas/protons, ligne PIXXL, faisceau extrait	23
5.4.4	Mode deuton	23
6	PRESENTATION DE L'ETAT FINALE DE L'INSTALLATION	24
7	SPECIFICATIONS TECHNIQUES RADIOPROTECTIONS	26
7.1	Dispositions relatives à l'automate de sécurité	26
7.2	Fonctions de sécurité	26
7.3	Dispositions relatives au matériel	26
7.4	Dispositions relatives à la réalisation des logiques confiées aux automatismes	27
7.4.1	Boucles de test et dispositifs de vérification	28
7.4.2	Essais et mises en services	28
7.4.3	Documentation	28
7.5	Dispositif de sécurité	30

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

7.5.1	Le système de ronde -----	30
7.5.2	Les capteurs de porte et serrures des clés prisonnières -----	30
7.5.3	La signalisation lumineuse relative aux accès -----	30
7.5.4	Le dispositif d'ouverture d'urgence des portes d'accès à l'intérieure de la casemate -----	31
7.5.5	L'arrêt d'urgence -----	31
8	ANNEXE 1 - PLAN D'IMPLANTATION DES DISPOSITIFS DE SECURITE RELATIFS AUX CONTROLES DES ACCES – INSTALLATION AGLAE AVEC EXTENSION PIXXL -----	32
9	ANNEXE 2 – PANNEAU D’AFFICHAGE ET CONSIGNES DE SECURITES – INSTALLATION EXISTANTE--	33
10	ANNEXE 3 – PANNEAU D’AFFICHAGE ET CONSIGNES DE SECURITES – INSTALLATION AVEC EXTENSION DE LIGNE PIXXL-----	35

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

1 GENERALITES

1.1 PRESENTATION DU PROJET

Le projet consiste à aménager la salle de l'accélérateur AGLAE, située au C2RMF sous le Carrousel du Louvre, pour l'installation d'une seconde ligne de tirs PIXXL.

Ce projet s'inscrit dans un environnement hautement sensible, tant au niveau scientifique que patrimonial. Il doit intégrer des exigences rigoureuses en termes de radioprotection, de sécurité incendie, de fonctionnement en site occupé et de maintien de la stabilité environnementale des œuvres analysées.

Le chantier sera contraint et sa situation en « souterrain », imposera une logistique rigoureuse : l'accès sera limité, le stockage sur place impossible, le flux tendu de matériaux sera à privilégier. Il est important de souligner que la protection des œuvres est une donnée primordiale, le travail sur le chantier sera le plus silencieux possible et sans poussière. Des protocoles de coactivité, sas, découpes manuelles et échanges permanents avec le C2RMF seront prévus.

Les enjeux majeurs sont la compatibilité technique avec les systèmes existants, ainsi que le maintien des conditions environnementales.

Le C2RMF est un service de compétence nationale du ministère de la Culture, qui est implanté sur le site du Louvre situé au 14 Quai François Mitterrand, 75 001 Paris.

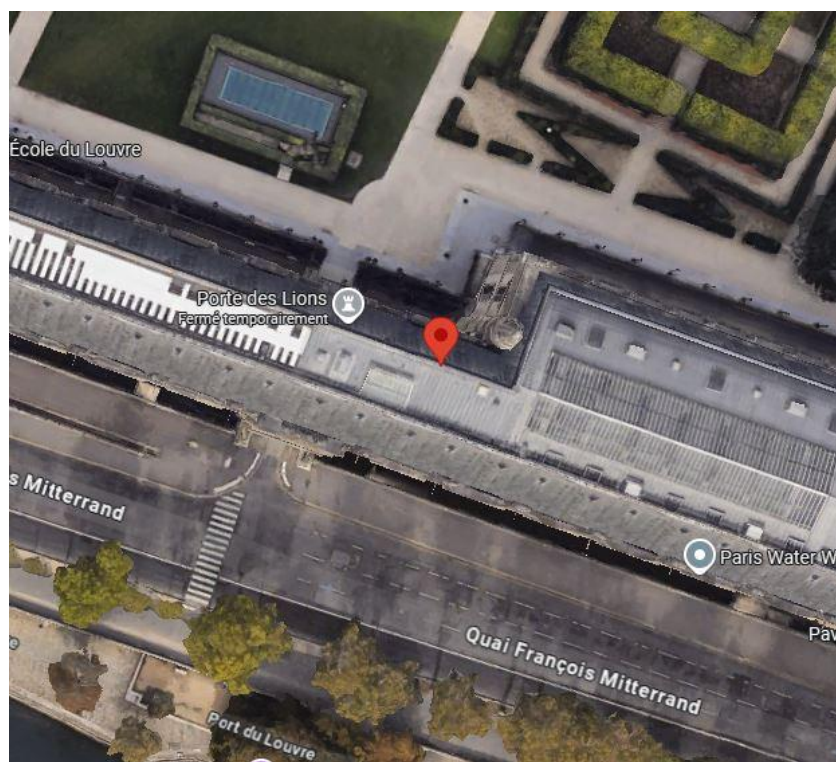


Figure 1 : vue satellite du C2RMF

Le C2RMF est situé au sous-sol avec une surface d'environ 550 m² et comprend :

- Une zone « laboratoire » où est implanté l'accélérateur et la ligne de tir existante (destinée à accueillir également la nouvelle ligne de tir),
- Une zone de surveillance technique,
- Une zone bureautique comprenant des postes de travail.

Le bâtiment est soumis au code du travail, à l'exception de l'amphithéâtre, celui-ci est hors projet.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

1.2 OBJET DU DOCUMENT

Le présent Cahier des Clauses Techniques et Particulières (C.C.T.P.) couvre le lot 4 – système de radioprotection.

Il prescrit les moyens matériels, organisationnels et humains à mettre en place lié à la radioprotection et plus précisément aux dispositifs de sécurité, à mettre en place pour la protection des travailleurs.

Ces dispositifs sont principalement assurés par un automate de sécurité qui définit les règles d'accès aux salles de l'installation selon les modes de fonctionnement.

Ces prescriptions sont relatives aux exigences de radioprotection applicables à la **mise en service d'une nouvelle ligne expérimentale PIXXL** sur l'installation **AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire)**, conformément aux prescriptions de la **norme NF M62-105** relatives aux accélérateurs de particules et installations associées.

Ces prescriptions visent à garantir :

- La protection des travailleurs, du public et de l'environnement,
- La conformité réglementaire de l'installation,
- L'intégration cohérente de la ligne PIXXL dans le système global de sûreté radiologique d'AGLAE.

Ce document a pour objet de présenter la description de la nature, la situation et la localisation des ouvrages couverts par le lot et d'en rappeler les normes et réglementations auxquels ils sont assujettis notamment en termes de radioprotection. Ne pouvant être une description parfaite et absolument exhaustive de l'ensemble des opérations à réaliser, ce document ne peut être considéré comme limitatif.

De fait, l'entrepreneur en charge de l'exécution des travaux devra, en sa qualité d'homme de l'art et de part par ses connaissances professionnelles, apprécier l'étendue de son intervention pour l'ensemble des prestations qu'il aura à exécuter.

Les travaux sont à réaliser conformément aux prescriptions du présent document et comprennent toutes les fournitures accessoires et toutes les façons complémentaires qui sont nécessaires pour une parfaite finition des ouvrages.

1.3 PERIMETRE DES TRAVAUX CONCERNES :

Le périmètre couvert par ce cahier inclut :

- La **ligne PIXXL** depuis le point de prélèvement du faisceau jusqu'au poste expérimental,
- Les **équipements annexes** (collimateurs, diagnostics faisceau, enceintes),
- Les **zones adjacentes** susceptibles d'être impactées par les rayonnements (salles voisines, circulations, locaux techniques),
- Les interfaces avec les systèmes existants d'AGLAE.

1.4 ENGAGEMENT DE L'ENTREPRENEUR

Le fait de soumissionner au présent marché de travaux constituera pour l'entrepreneur un engagement à respecter au cours de ces études, réalisées lors de la période de consultation, les dispositions suivantes :

- Prendre connaissance et étudier l'ensemble des pièces du marché.
- Tenir compte des exigences et des conditions qu'il doit respecter, détaillées dans le « Cahier des Prescriptions Communes à tous les corps d'états » (C.P.C.) et ses annexes, ensemble indissociable du présent document.
- Appréhender les incidences de prestations réalisées par les autres intervenants, sur lesquels ses ouvrages s'appliqueront, qui sont exposées dans les Cahiers des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P) des autres corps d'état.
- Se renseigner sur tout ce qui peut lui paraître ambigu en posant par écrit toutes questions qu'il jugera nécessaires.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

- Présenter par écrit toute observation ou suggestion qu'il jugera utile aux dispositions du projet et aux solutions techniques retenues.
- S'être rendu sur place pour faire toutes constatations sur la disposition des lieux, l'importance des travaux à exécuter et sur toutes les sujétions complémentaires inhérente à la localisation des ouvrages à exécuter.

Aussi, l'entrepreneur ne pourra en aucune manière mettre en avant quelconque imprécisions, manque de renseignements, erreur d'interprétation ou discordances entre éléments composant le marché, pour refuser d'exécuter l'ensemble des interventions et prestations nécessaires à une complète et parfaite exécution des ouvrages constituant le projet.

1.5 ALLOTISSEMENT

Cette opération est prévue réalisée en corps d'états séparés.

Chaque participant à l'opération est tenu de prendre connaissance de l'ensemble des Cahiers des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P) de tous les corps d'état ainsi que du présent document, afin d'éviter toutes erreurs, fausses interprétations et/ou omission des travaux qui lui incombent.

Le Cahier des Clauses Techniques Particulières est décomposé par corps d'états suivant la liste donnée ci-après.

LISTE DES CORPS D'ETATS

- Lot 00 – Cahier des Prescriptions Communes
- Lot 01 – Installation de chantier – Curage – Aménagements intérieurs
 - 01A – Installation de chantier – Curage
 - 01B – Cloisons – Faux-plafonds,
 - 01C – Menuiserie intérieure – Serrurerie,
 - 01D – Revêtement de sol – Peinture,
- Lot 02 – Chauffage – Ventilation – Rafraichissement – Plomberie,
- Lot 03 – Électricité Courant Fort – Courant Faibles – SSI,
- Lot 04 – Système de radioprotection,

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

2 REFERENCES REGLEMENTAIRES ET NORMATIVES

Les exigences réglementaires du présent document s'appuient notamment sur :

- **Code du travail – Livre IV, Titre V** (Prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants).
- **Code de la santé publique**, articles L.1333-1 et suivants.
- Décisions et guides de l'**ASN** applicables aux accélérateurs.
- Recommandations de la **CIPR (ICRP)**.

Les différentes normes applicables à l'accélérateur sont les suivantes :

- Norme NF M62-105 décembre 1998 Energie nucléaire; Accélérateurs industriels : Radioprotection – Installations mettant en œuvre des accélérateurs de particules.
- Norme NF EN 60-204-1 Septembre 2006 et son Amendement de 2009. Sécurité des machines-Equipement électrique des machines-Partie 1 : Règles générales,
- Norme NF EN ISO 14119 décembre 2013 Sécurité des machines – Dispositifs de verrouillage associés à des protecteurs – Principe de conception et de choix,
- NF EN ISO 13850 : Sécurité des machines - Fonction d'arrêt d'urgence - Principes de conception
- Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées,
- IEC 61508 : Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables concernés par la sécurité.
- IEC 61511 : Sécurité fonctionnelle des systèmes instrumentés de sécurité pour le secteur de l'industrie des procédés continus
- IEC 62061 : Sécurité fonctionnelle des systèmes de contrôle électrique / électronique / électronique programmable pour les machines
- ISO 13849-1 : Sécurité des machines -- Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité Partie 1: Principes généraux de conception

3 REFERENCES DE L'INSTALLATION

Les documents de référence de l'installation sont les suivants :

- 20231215_Installation 1 et ses annexes
- Documents de réception de l'automate de 2017 :
 - o Procès-verbal des opérations préalables à la réception des travaux
 - o Procédure de réception software SAFIR

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

Dans la salle 322, une partie cloisonnée délimite l'emplacement de la zone où est extrait le faisceau et où ont lieu les analyses, cette zone est appelée zone d'expérimentation.

Une zone délimitée par une barrière jaune englobe l'ensemble des éléments haute énergie en sortie d'accélérateur hors la ligne de faisceau extrait. Cette zone est appelée zone haute énergie. On appellera salle AGLAE l'ensemble de la zone contenant l'accélérateur, à savoir la zone faisceau extrait, la zone haute énergie et la zone contenant l'accélérateur et les sources.

Le reste de la salle est séparée de l'accélérateur par une cloison et est elle-même subdivisée en plusieurs espaces. Elle accueille plusieurs autres appareillages dont l'un possédant ses propres zonages de radioprotection. L'autre appareil concerné par des mesures de radioprotection est une diffraction de rayons X décrite dans les documents la concernant dans l'autorisation T750026 (hors périmètre du présent cahier des charges).

On référera par la suite à l'ensemble des sections de la salle 322 ne comportant aucun élément de l'accélérateur par le terme salles annexes.

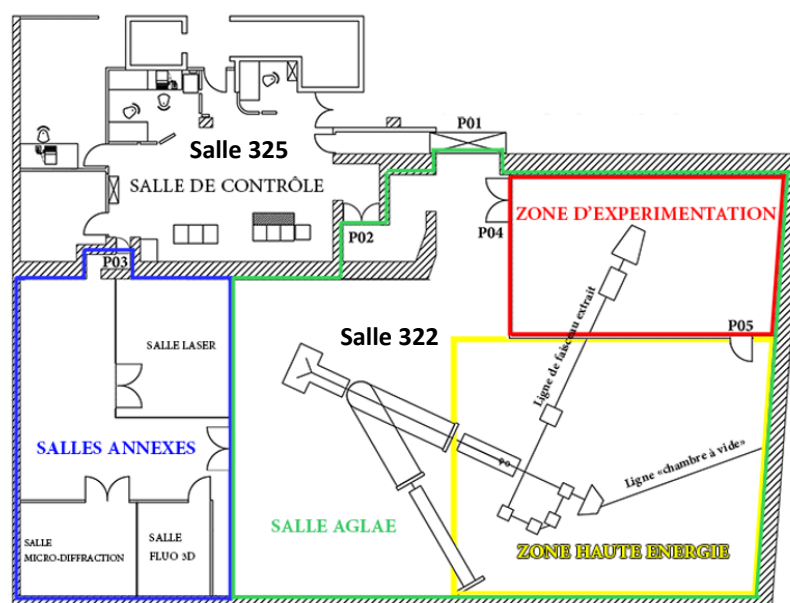


Figure 3 : implantation de l'accélérateur

L'accélérateur possède deux lignes de faisceau :

- Une ligne de faisceau extrait qui est la plus couramment utilisée (entre 15 et 20 jours par mois). Cette ligne peut exceptionnellement pour certaines mesures particulièrement être convertie en un système fermé confinant le faisceau (quelques jours par an).
- Une ligne de faisceau se terminant dans une chambre à vide confinant le faisceau utilisé principalement à des fins de calibration ou de développement méthodologique (0-5 jours par mois).

L'installation est considérée comme conforme (ref du PV de réception à ajouter).

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

4.2 CARACTERISTIQUE GENERALE DE L'INSTALLATION

L'accélérateur a une haute tension maximale de 2MV, produisant des protons et deutons d'énergie maximale de 4MeV et des alphas d'énergie maximale de 6MeV.

On peut définir plusieurs modes d'utilisation de l'accélérateur suivant le type de particules utilisé et selon que le faisceau est extrait ou non et suivant.

L'accélérateur est équipé de deux lignes :

- Une ligne en forme d'alpha pour une meilleure stabilité du faisceau se terminant par un faisceau de particules extrait à l'air (Ligne NewAGLAE) . Ligne la plus couramment utilisée (entre 15 et 20 jours par mois). Cette ligne peut exceptionnellement pour certaines mesures particulièrement être convertie en un système fermé confinant le faisceau (quelques jours par an).
- Une ligne avec une chambre à vide dans laquelle le faisceau est confiné (Ligne chambre à vide). Ligne utilisée principalement à des fins de calibration ou de développement méthodologique (0-5 jours par mois).

La ligne faisceau extrait peut être utilisée soit comme son nom l'indique avec un faisceau extrait, soit, par ajout de différents éléments telle une chambre d'analyse, en mode chambre à vide. La ligne chambre à vide utilise toujours un faisceau confiné dans une chambre d'analyse.

Avec des alphas et des protons, le mode chambre à vide fonctionne différemment du mode faisceau extrait du fait de la disparition de la principale source de danger d'irradiation, à savoir le faisceau extrait.

Avec des deutons, les émissions de rayonnements secondaires le long de la ligne de faisceau sont suffisamment élevées pour représenter à eux seuls un danger. Dans ce cas, mode chambre à vide et mode faisceau extrait sont considérés de la même façon. Les différents modes de fonctionnement seront détaillés au paragraphe 4.4.

Cela se traduit par un mode alphas/protons subdivisé en un sous-mode faisceau extrait et un sous-mode chambre à vide et un mode deutons.

L'accélérateur possède deux fonctionnements suivant la stabilisation du faisceau escomptée. Soit une stabilisation en haute tension grâce à un système de plaques capacitatives vérifiant la tension du terminal (mode GVM), soit une stabilisation en position du faisceau qui utilise le courant déposé dans les fentes de contre réaction dans la ligne de faisceau haute énergie (mode slit). Le deuxième mode de réglage nécessite que le faisceau soit toujours présent sur ces fentes pendant la journée pour garder les réglages.

En fonctionnement normal, l'accélérateur travaille principalement avec des protons ou alpha de 3MeV.

Particules	Energie	Intensité	Ligne	Fréquence d'utilisation
Proton	3MeV	1-2nA	Faisceau extrait	10-15 jours/mois
Proton	3MeV	10-20nA	Faisceau extrait ou Chambre à vide	2-3 jours/mois
Proton	1,5MeV	1nA	Faisceau extrait	3-4 jours/an
Alpha	3MeV	1nA	Faisceau extrait	4-5 jours/an
Alpha	6MeV	10nA	Chambre à vide	2-5 jours/an
Deuton	3MeV	1-10nA	Faisceau extrait	0-5 jours/an
Proton	4MeV	10-60nA	PIXXL	2-3 jours/mois

Tableau 1: Différentes conditions de faisceau et leur fréquence d'utilisation

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

Les débits de dose proviennent des rayonnements électromagnétiques secondaires résultant des interactions des particules chargées avec la matière, ainsi que des neutrons issus des mêmes processus. Les principales sources d'interactions sont : les objets analysés et les éléments d'optique de la ligne pouvant interagir avec le faisceau (fentes de collimation et cages de Faraday).

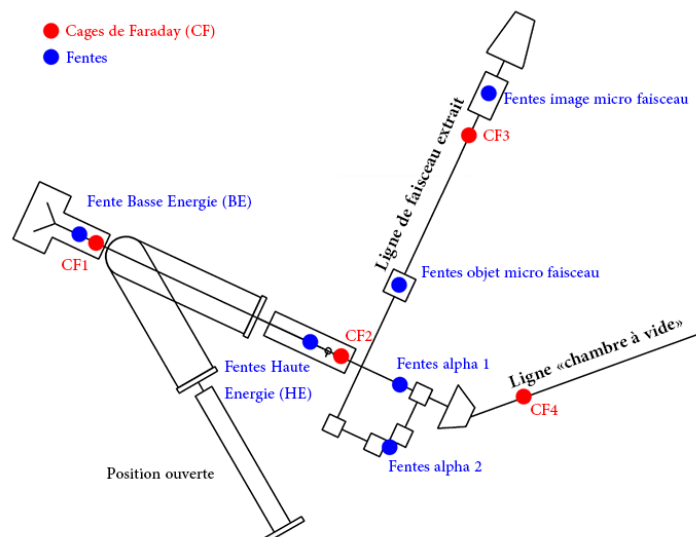


Figure 4 : Disposition des points d'interception du faisceau sur la ligne de l'accélérateur

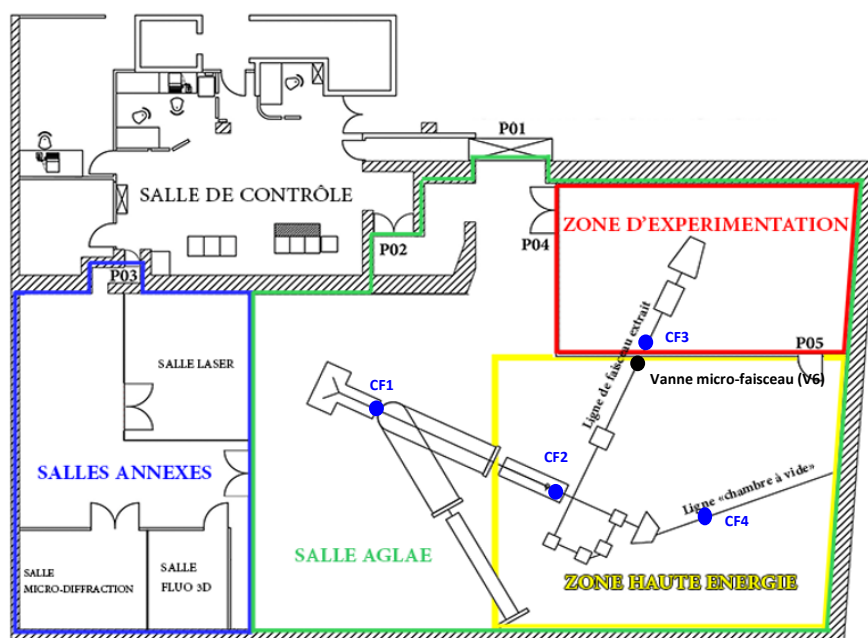


Figure 5 : position des cages de faraday et de la micro vanne V6

4.3 DISPOSITIF DE SECURITE GENERALE EN PLACE

4.3.1 Automate de sécurité

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

L'automate est un automate de sécurité est un modèle Rockwell doté d'une CPU Compact Guard Logix modèle 1769-L30ERMS. Il est classé SIL3.

Celui-ci est construit de façon que dans tous les cas, la défaillance d'un élément de sécurité, la perte d'alimentation de l'armoire ou l'ouverture d'une porte (suivant le mode) pendant le fonctionnement entraînent le passage de la machine dans un état sûr :

- Coupure des alimentations des cages de Faraday et de la vanne micro-faisceau ce qui empêchent l'extraction du faisceau à l'air
- Signalisation de l'état d'arrêt d'urgence vers l'automate Thalès

L'automate est alimenté via un onduleur dédié de type SOCOMEC NRT2-U2200. La puissance est 2200 VA 1800 W en 220/230/240V.

4.3.2 Contrôle des accès

L'accès à la salle 322 peut se faire par plusieurs portes (cf. Figure 3).

La porte P01 est une porte blindée coulissante. Celle-ci est classiquement fermée. Elle s'ouvre manuellement à l'aide d'une manivelle. Cette manivelle peut être retirée et verrouillée à l'aide d'une clé. Cette porte est utilisée pour le transport ponctuel de matériel ou d'objets ne pouvant transiter par la salle de contrôle. Elle est dotée de deux capteurs de position de technologie différente (mécanique et RFID). Chaque capteur est relié à l'automate de sécurité sur une entrée de sécurité.

Les portes P02 et P03 sont des portes qui sont situées dans les deux chicanes d'accès à la salle 322 à partir de la salle de contrôle (salle 325). Elles servent à verrouiller l'accès par ces chicanes. Ces trois portes, P01, P02 et P03 sont munies de capteurs de position. De plus les portes P02 et P03 sont munies de serrures à clés prisonnières.

A l'intérieur de la salle 322, se trouvent une autre série de portes, les portes des salles annexes et les portes de la zone d'expérimentation. Les portes des salles annexes peuvent ou non être munies de système de sécurité relative à l'utilisation des appareils y étant entreposés. Elles ne seront pas traitées dans ce document car relevant d'autres appareillages et d'autres règles de sécurité. Ces informations sont disponibles dans les documents afférents auxdits appareillages.

Les portes P04 et P05 sont les portes de la zone d'expérimentation. Elles sont, comme P02 et P03, munies à la fois de contact de position et d'une serrure à clés prisonnières.

Les quatre portes P02, P03, P04 et P05 possèdent un système de verrouillage. Ce système comprend deux capteurs de position de technologie différente (mécanique et RFID). Le système mis en place est une gâche de sécurité Allen-Bradley TLS-Z GD2. C'est un interrupteur de sécurité qui dispose d'un capteur de porte RFID au codage unique avec une technologie de capteur de position de porte inductif. Cet interrupteur peut détecter si une clé de commande se casse et se sépare de sa position de montage sur la porte. Cet interrupteur prend en charge les plus hauts niveaux de sécurité « Niveau de performance e » (Ple) de la norme EN ISO 13849-1.

Pour les deux portes P02 et P04 qui possèdent deux vantaux, le système de verrouillage est monté à cheval sur les deux vantaux. Ceci impose la fermeture des deux vantaux pour que les différents capteurs soient au contact.



Figure 6: Système de verrouillage sur P02

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

Le système de clés prisonnières mis en place est un système de transfert de clé Shmersal à verrouillage électromécanique lui aussi à la norme EN ISO 13849-1. Comme précisé dans la norme, tant que la porte d'accès au local d'irradiation est ouverte, sa clef reste prisonnière dans sa serrure. Les clés sont centralisées sur un pupitre de clé à côté de l'automate de sécurité. Les sécurités des clés P01, P02 et P03 sont montés en série, de même pour P04 et P05.



Figure 7: Pupitre de centralisation des clés prisonnières

Toutes les portes sont munies d'une ouverture d'urgence située à l'intérieur de la zone permettant l'ouverture des portes vers l'extérieur de la salle même sans clé pour permettre l'évacuation d'une personne qui serait restée dans les zones d'irradiation.

Les portes P02, P03, P04 et P05 sont équipées à l'intérieur d'un bouton poussoir qui désactive pendant 5 secondes le verrouillage mécanique de la porte afin de permettre la sortie de personnes éventuellement restées à l'intérieur des locaux, ceci conformément à la norme qui précise que « Les accès doivent pouvoir être déverrouillés et ouverts de l'intérieur pour qu'une personne éventuellement présente puisse sortir du local. »

La perte d'alimentation électrique de l'automate de sécurité entraîne le déverrouillage des gâches électriques des portes.

4.3.3 Communication avec l'automate de contrôle commande

La communication entre l'automate Thalès de contrôle commande et l'automate de sécurité se fait avec un protocole modbus permettant de communiquer les différents états de la machine (état des cages, couleurs des signaux, etc.). Cette communication n'entre pas à proprement parler dans la sécurité mais est une relecture des états afin d'en avoir une visualisation au niveau de l'interface homme-machine.

4.3.4 Arrêts d'urgence

Quatre types d'arrêt d'urgence sont présents dans la salle 322, dont deux agissants uniquement sur l'accélérateur : l'arrêt d'urgence machine, l'arrêt d'urgence radioprotection, l'arrêt d'urgence pompier et les arrêts d'urgence électriques. Chaque armoire électrique est dotée d'un arrêt d'urgence propre à cette armoire. Les différents boutons d'arrêt d'urgence possèdent leur propre code couleur pour ne pas les confondre.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

Type	Arrêt d'urgence machine	Arrêt d'urgence radioprotection	Arrêt d'urgence pompier	Arrêt d'urgence électrique
Couleur	Jaune	rouge sur fond jaune	boitier pompier jaune	bouton rouge situé sur l'armoire
Exemple				
Position	Poste de contrôle (Salle 325)	Console en salle 325 et murs de la salle AGLAE	Entrée de la salle 322	Armoires électriques

Tableau 2 : Récapitulatif des types de boutons d'arrêt d'urgence

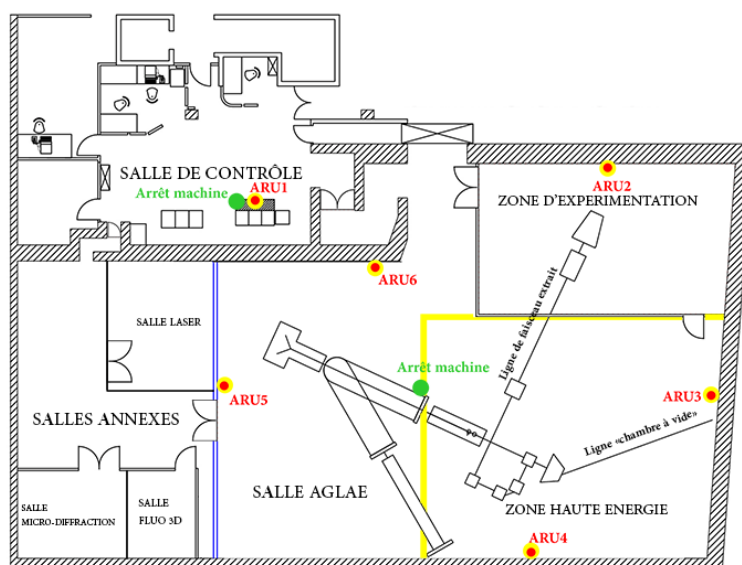


Figure 8 : Positionnement des arrêts d'urgence concernant l'accélérateur dans les salles 322 et 325

- L'arrêt d'urgence machine

Il est déclenché par un danger immédiat pour la machine mettant en péril son intégrité ou par un dysfonctionnement d'un des éléments de la ligne. Cela peut être une panne de refroidissement, d'électricité, une fuite de vide ou autre. Cet arrêt est géré par l'automate de contrôle de Thalès et est déclenché automatiquement.

Dans le cas d'un dysfonctionnement de l'automate de contrôle Thalès, deux boutons d'arrêt d'urgence peuvent mettre en sécurité la machine par intervention d'un opérateur. Ces boutons sont situés pour l'un sur la console de contrôle dans la salle 325 et pour l'autre dans la salle AGLAE à proximité de la zone haute énergie au niveau des automates de contrôle. Seuls les opérateurs sont habilités à les utiliser.

Cet arrêt d'urgence éteint la machine et tous les composants impactés par l'alerte reçue. Ces sécurités sont également conçues pour que les arrêts d'urgence ne créent pas de dysfonctionnements de la machine lors de la remise en marche.

- L'arrêt d'urgence radioprotection

Il peut être déclenché soit par un des boutons d'arrêt d'urgence disséminés le long de la ligne soit automatiquement suivant les conditions d'analyse. En particulier, dans le mode alphas/protons, l'arrêt automatique se fait s'il y a émission de neutrons au-dessus du seuil.

Les boutons d'arrêts d'urgence radioprotection disposés autour de la salle AGLAE et dans la zone d'expérimentation permettent de mettre la machine en sécurité en cas d'accident de personne ayant trait à la radioprotection, en particulier si une personne reste enfermée dans une zone rouge interdite. Le recours à ce bouton d'arrêt d'urgence

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

radioprotection implique la coupure de l'alimentation de toutes les cages de Faraday empêchant l'accélération et l'extraction du faisceau ce qui coupe toute source de possible irradiation.

- L'arrêt d'urgence pompier

Il s'agit d'un arrêt général des installations, en particulier du réseau électrique. Les arrêts pompiers sont situés aux entrées de la salle 322. Seuls les pompiers sont habilités à déclencher cet arrêt d'urgence en cas de sinistre.

4.3.5 Balisage et signalisation

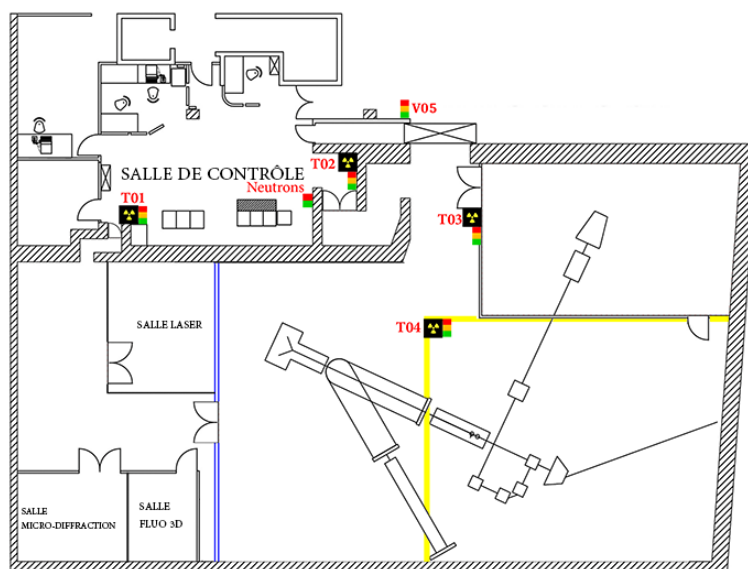


Figure 9: Positionnement des signaux lumineux dans les salles 322 et 325

Les signalisations lumineuses se décomposent en trois séries de signaux (voir Figure 9).

Tout d'abord des trèfles lumineux (T01 à T04) (bleus pour la zone surveillée, jaunes pour la zone contrôlée jaune et rouges pour la zone rouge interdite) indiquent le zonage des différentes zones de la salle suivant l'état de la machine, le type de particules utilisées et selon l'extraction ou non du faisceau.

Des feux tricolores complètent ces trèfles. Ils ne sont plus utilisés. Il indiquait l'état de fonctionnement de l'accélérateur.

Enfin, un feu bicolore est relié directement à la sonde neutron. Si la valeur de débit de dose renvoyée par la sonde est au-dessus du seuil, le feu passe au rouge et une sonnerie retentit indiquant la présence de neutrons dans la salle de l'accélérateur. En mode alphas/protons, un tel déclenchement provoque un arrêt d'urgence de la machine car signale une situation anormale. En mode deutons, le déclenchement peut être normal et ne provoque ni arrêt d'urgence, ni sirène mais l'ensemble de la salle 322 est alors condamnée comme décrit dans le paragraphe 8.

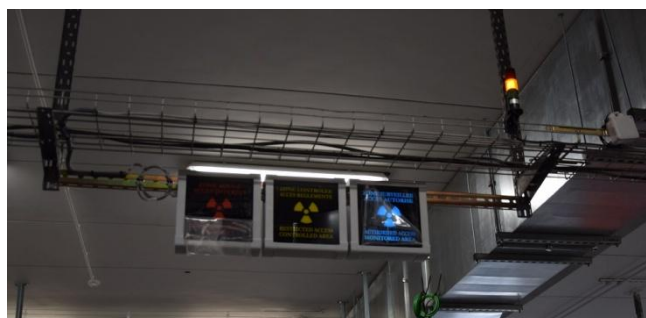


Figure 10: Exemple de signalisation (trèfles et feux tricolores au niveau de la zone haute énergie)

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

4.4 MODE DE FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION ET ZONAGE RADIOLOGIQUE

4.4.1 Machine éteinte

En arrêt de fonctionnement (machine avec faisceau éteint), le débit de dose associé à l'accélérateur est considéré comme nul.

En mode deuton, il est prévu une temporisation de 10 mn après extinction du faisceau et avant l'autorisation d'entrée en salle 322.

4.4.2 Machine en fonctionnement normal en mode protons/alphas

La salle de contrôle (salle 325) présente un débit de dose inférieur à 80 μ Sv par mois soit une zone surveillée.

Les images ci-dessous présentent le zonage radiologique en salle 322 selon le type de faisceau (extraît/non extraît) et de particules (accélérées ou non) considérés en mode proton/alpha. Ce mode représente 90% du temps de faisceau à l'année dans le laboratoire.

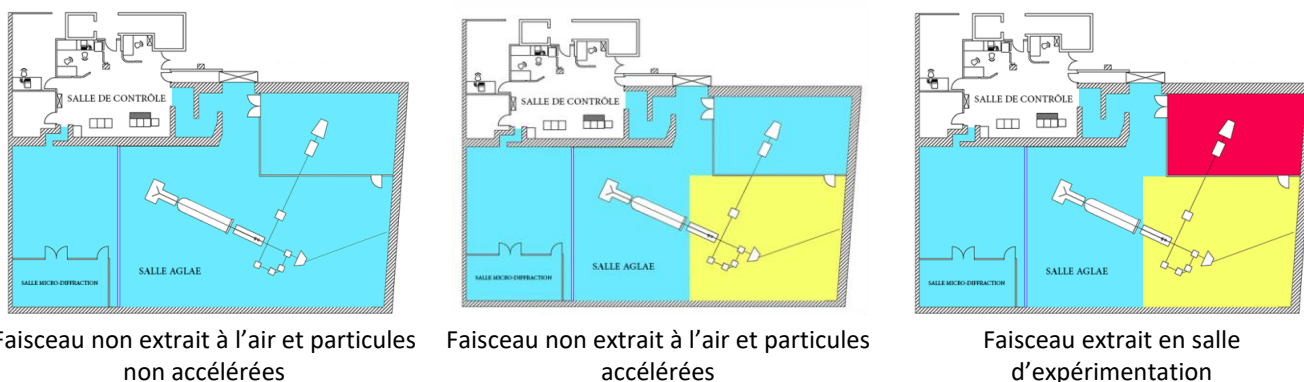


Figure 11 : zonage de la salle 322 en mode protons/alpha

Ci-dessous le zonage radiologique en sous mode chambre à vide (faisceau non extrait). A noter que ce mode est rarement utilisé.

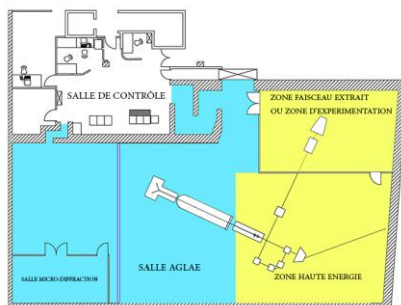


Figure 12 : zonage de la salle 322 en mode alpha/protons - chambre à vide

Le phénomène d'activation par les protons est considéré comme négligeable du fait de leur énergie inférieure à 6 MeV.

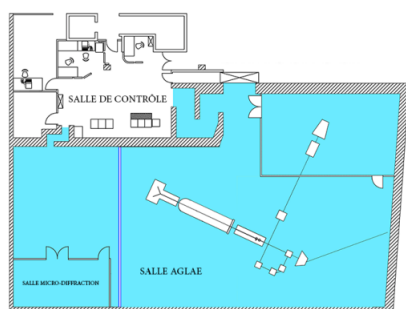
Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

4.4.3 Machine en fonctionnement normal en mode deutons

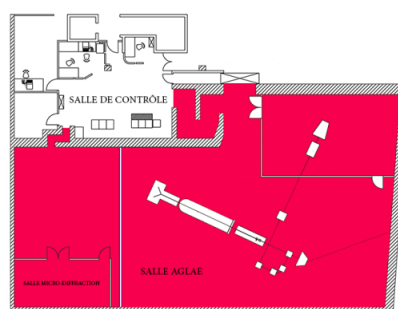
Le débit de dose (calculé via le code Monte Carlo N Particule) est estimé dans la salle 322 entre 100 $\mu\text{Sv/h}$ et 10 mSv/h. Le local est classé en zone contrôlée rouge lorsque le faisceau est extrait à l'air et les particules accélérées. Dans la salle 325 (salle de commande) le débit d'équivalent de dose est au maximum de 2 $\mu\text{Sv/h}$.

En mode deutons, l'activation est à considérer. Elle peut être plus ou moins importante en fonction de l'objet irradié et de son matériau notamment.

Une temporisation de 10 mn est demandée avant entrée en salle 322.



Faisceau non extrait à l'air (particules non accélérées)



Faisceau extrait à l'air (particules accélérées)

Figure 13 : zonage de la salle 322 en mode deuton

5 PRESENTATION DE LA NOUVELLE LIGNE PIXXL ET DISPOSITIFS DE SECURITE A CONSIDERER DANS L’ETAT FINAL SELON LES MODES

5.1 UTILISATION

L’accélérateur est équipé d’une nouvelle ligne : ligne PIXXL.
Il s’agit d’une ligne de faisceau extrait en mode proton.
Ci-dessous les conditions de faisceau pour la nouvelle ligne PIXXL.

Particules	Energie	Intensité	Ligne	Fréquence d’utilisation
Proton	4MeV	10-60nA	PIXXL	2-3 jours/mois

Tableau 3: Différentes conditions de faisceau et leur fréquence d'utilisation

Le schéma ci-dessous présente l’implantation des cages de faraday et micro vannes sur l’installation finale.

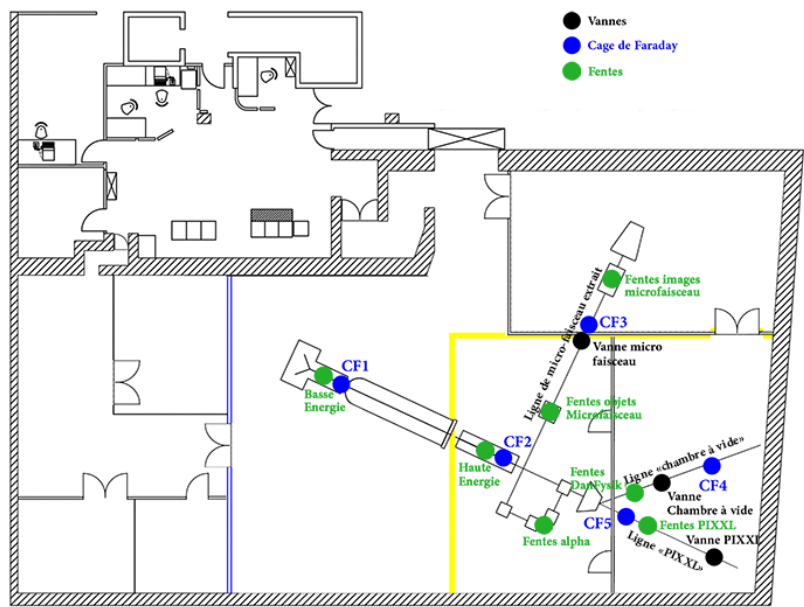


Figure 14 : position des cages de faraday et de la micro-vanne V6 – extension avec ligne PIXXL

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

5.2 AUTOMATE ET CONTROLE DES ACCES

Pour la mise en place de PIXXL, le système de sécurité de la nouvelle ligne sera intégré au système existant et devra suivre les exigences de la norme NF62-105 en particulier la redondance des systèmes de sécurité.

Les deux nouvelles portes (P06 et P07) à mettre en place posséderont un système de verrouillage. Ce système devrait s'apparenter à celui équipant déjà les portes existantes. P05 devrait évoluer vers une porte à double vantaux, le système de verrouillage sera modifié et monté à cheval sur les deux vantaux (comme pour P02 et P04). Les sécurités des clés P05, P06 et P07 seront utilisées en série.

Les trois portes P05, P06 et P07 devront être équipées à l'intérieur d'un bouton poussoir qui désactive pendant 5 secondes le verrouillage mécanique de la porte afin de permettre la sortie de personnes éventuellement restées à l'intérieur des locaux, ceci conformément à la norme qui précise que « Les accès doivent pouvoir être déverrouillés et ouverts de l'intérieur pour qu'une personne éventuellement présente puisse sortir du local. »

La perte d'alimentation électrique de l'automate de sécurité entraîne le déverrouillage des gâches électriques des portes.

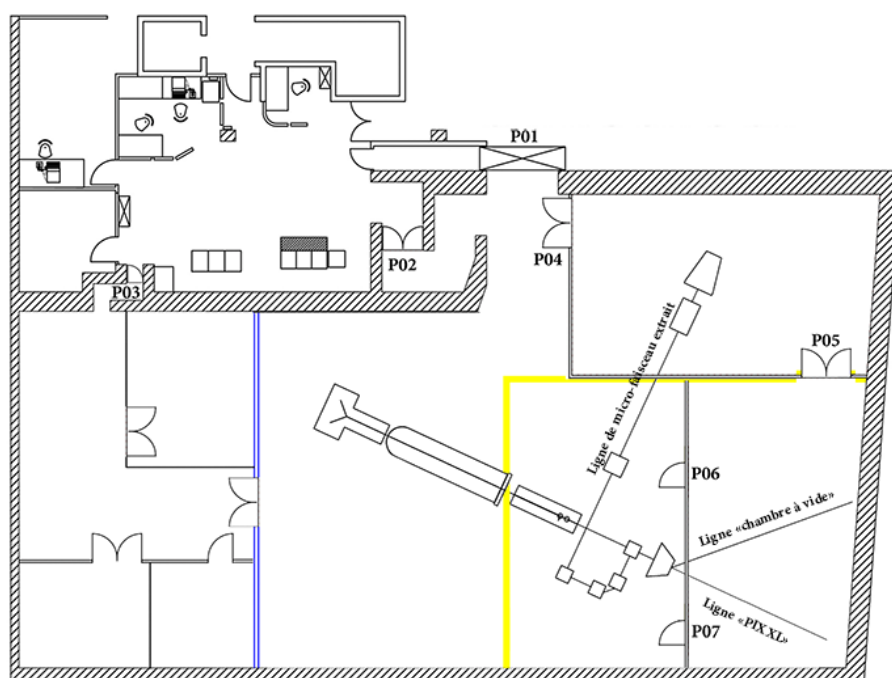


Figure 15: Portes d'accès

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

5.3 BALISAGE ET SIGNALISATION

La signalisation à considérer pour l'installation intégrant la nouvelle ligne PIXXL est schématisé ci-dessous.

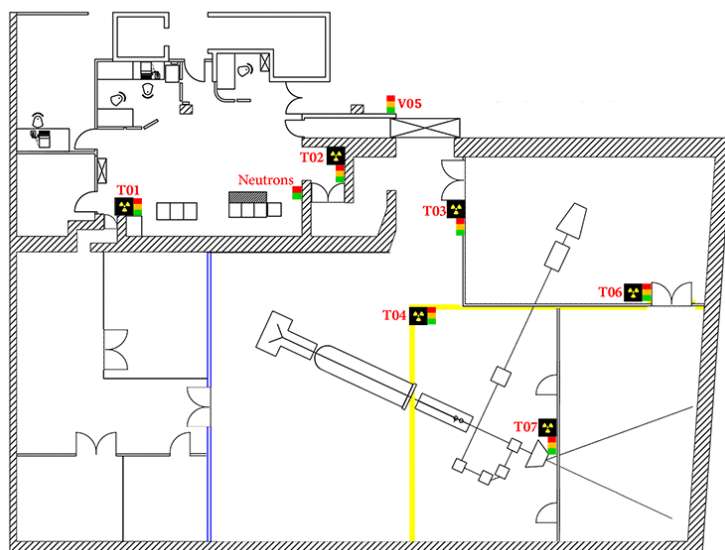


Figure 16: Positionnement des signaux lumineux dans les salles 322 et 325 – extension PIXXL

La signalisation devra être ajoutée à l'entrée de la zone PIXXL au niveau des portes P05, P06 et P07.

Cf §8 : Annexe 1 – Proposition d'implantation des dispositifs de sécurité sur l'installation avec extension

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

5.4 ZONAGE SELON LES MODES D'UTILISATION SUR LA NOUVELLE INSTALLATION

5.4.1 Mode alphas/protons, ligne NewAGLAE, faisceau extrait

Un zonage a été établi en fonction des débits de dose. Le zonage est intermittent car dépendant du parcours des particules. Du fait du caractère intermittent, il a été décidé de classer au minimum les zones de la salle 322 en zone surveillée.

Lorsque les particules ne sont pas accélérées (quand elles sont arrêtées par la CF1), le débit de dose est inférieur à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$. Le faisceau n'étant pas transporté sur le reste de la ligne, il ne peut y avoir d'émission au-delà de la cage de Faraday 1. L'ensemble de la salle est donc classé en zone surveillée.

A partir du moment où la cage de Faraday 1 est ouverte, il y a possibilité d'émission de rayonnements gamma et neutronique le long de la ligne post accélérateur. Suivant l'emplacement sur la ligne (Cage de Faraday, fentes,,), cette émission peut atteindre 100 $\mu\text{Sv/h}$.

On considèrera dans ce cas deux possibilités :

- soit le faisceau peut aller en bout de ligne et éventuellement être extrait à l'air,
- soit il est bloqué par l'un des éléments suivants : cages de Faraday 2 ou 3 ou vanne vide micro-faisceau.

Dans le second cas, le faisceau ne peut être extrait à l'air et reste confiné dans la ligne. Les seules émissions sont donc celles décrites ci-dessus. On considère donc un zonage différent si le faisceau est extrait ou non.

Si le faisceau n'est pas extrait, il n'y a émission que le long de la ligne haute énergie jusqu'à l'emplacement stoppant le faisceau. Ces emplacements sont situés dans la zone haute énergie. Du fait du niveau de radiations, il a été décidé de considérer la zone haute énergie comme une zone contrôlée jaune.

Dans le cas où le faisceau peut être extrait à l'air, le parcours du faisceau dans l'air est considéré comme une zone rouge interdite. Cette zone rouge est en pratique le trajet correspondant à un cylindre de 50-100 μm de diamètre (suivant le diamètre du faisceau) et de la distance objet-nez de l'accélérateur de hauteur, soit environ 2 mm. Néanmoins, la zone rouge est étendue à l'ensemble de la zone d'expérimentation pour avoir une zone rouge interdite délimitée par des parois infranchissables.

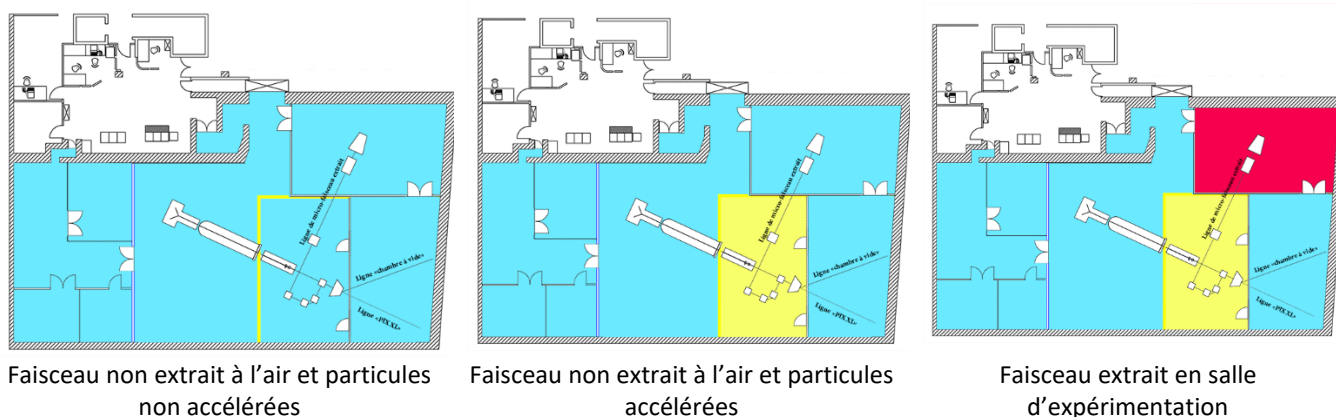


Figure 17 : zonage radiologique – Installation finale – Ligne New AGLAE

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

5.4.2 Mode alphas/protons, faisceau non extrait (mode chambre à vide)

Un zonage a été établi en fonction des débits de dose. Le zonage est intermittent car dépendant du parcours des particules. Du fait du caractère intermittent, il a été décidé de classer au minimum les zones de la salle 322 en zone surveillée.

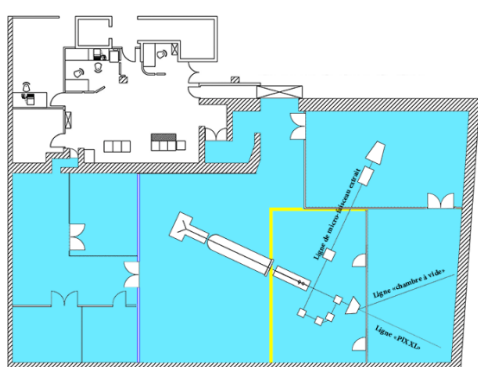
Dans le cas où les particules ne sont pas accélérées (quand elles sont arrêtées par la CF1), le débit de dose est inférieur à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$. Le faisceau n'étant pas propagé sur le reste de la ligne, il ne peut y avoir d'émission passé la cage de Faraday 1. L'ensemble de la salle est donc classé en zone surveillée.

A partir du moment où la cage de Faraday 1 est ouverte, il y a possibilité d'émission de rayonnements gamma et neutronique le long de la ligne post accélérateur. Suivant l'emplacement sur la ligne (Cage de Faraday, fentes,...), cette émission peut atteindre 100 $\mu\text{Sv/h}$.

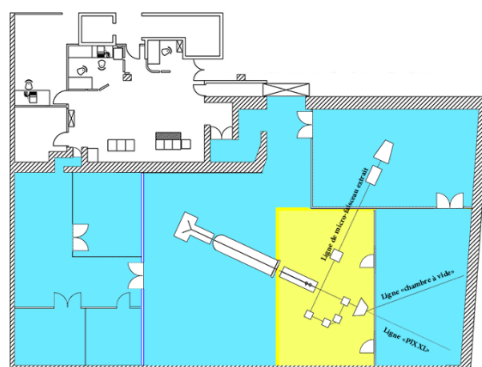
Le faisceau n'étant pas extrait, il ne peut y avoir émission que le long de la ligne haute énergie jusqu'à l'emplacement stoppant le faisceau. Le mode chambre à vide s'utilisant principalement sur la ligne chambre à vide.

Du fait du niveau de radiations pouvant être émis le long de la ligne, la zone haute énergie est considérée comme une zone contrôlée jaune. La ligne de faisceau extrait est située dans la zone PIXXL. On s'attend donc à une possibilité d'émission le long de cette ligne lors de son utilisation ce qui ferait de la zone PIXXL une zone contrôlée jaune aussi. Néanmoins, lorsque le faisceau est intercepté par la cage de Faraday CF2 située dans la zone haute énergie, le faisceau ne peut pas entrer dans la zone PIXXL et il n'y a pas d'émission de rayonnement possible. Elle est donc toujours en zone surveillée.

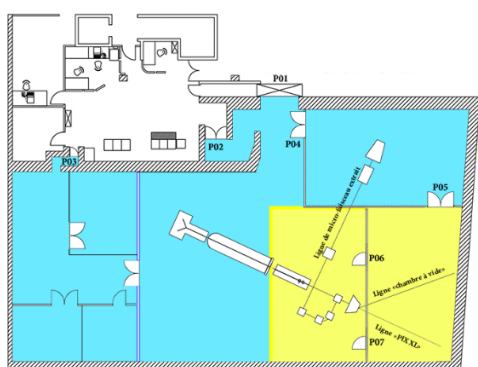
Dans certains cas rares, une chambre de confinement du faisceau peut aussi être montée sur la ligne microfaisceau extrait. Dans ce cas, le faisceau n'est plus extrait mais il peut y avoir localement des émissions de rayonnements, la zone d'expérimentation devient une zone contrôlée jaune à partir du moment où le faisceau s'y trouve. Si celui-ci est stoppé en amont de la zone, celle-ci reste en zone surveillée comme précédemment.



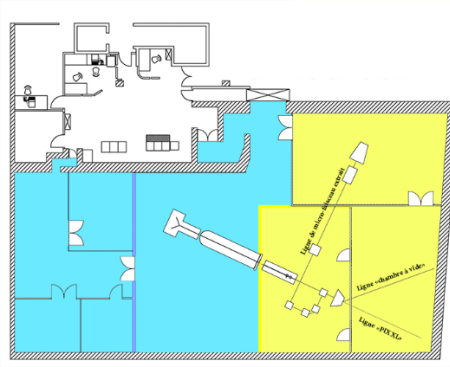
Faisceau non extrait avec particule non accéléré



Faisceau non extrait avec particule accéléré mais bloqué par CF2



Faisceau non extrait avec particule accéléré et présent dans la ligne chambre à vide



Faisceau non extrait avec particule accéléré et présent et cage de Faraday microfaisceau ouverte

Figure 18 : zonage radiologique – Installation finale – Mode alpha proton - Chambre à vide

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

5.4.3 Mode alphas/protons, ligne PIXXL, faisceau extrait

Le zonage de la nouvelle ligne se basera sur le système adopté pour le reste des lignes de l'accélérateur. La nouvelle ligne étant montée dans la zone haute énergie, les seules modifications des zonages existants concerneront cette zone, maintenant séparée en deux zones distinctes (zone haute énergie et zone PIXXL). Les zonages des autres zones (zone d'expérimentation, salle AGLAE et salles annexes) ne sont pas impactées par la nouvelle ligne.

Lorsque les particules ne sont pas accélérées (quand elles sont arrêtées par la CF1), le débit de dose est inférieur à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$. Le faisceau n'étant pas transporté sur le reste de la ligne, il ne peut y avoir d'émission au-delà de la cage de Faraday 1. L'ensemble de la salle est donc classé en zone surveillée.

A partir du moment où la cage de Faraday 1 est ouverte, il y a possibilité d'émission de rayonnements gamma et neutronique le long de la ligne post accélérateur. Suivant l'emplacement sur la ligne (Cage de Faraday, fentes,...), cette émission peut atteindre 100 $\mu\text{Sv/h}$.

On considèrera dans ce cas deux possibilités :

- soit le faisceau peut aller en bout de ligne et être extrait à l'air,
- soit il est bloqué par l'un des éléments suivants : CF2 ou CF5

Dans le second cas, le faisceau ne peut être extrait à l'air et reste confiné dans la ligne. Les seules émissions sont donc celles décrites ci-dessus. On considère donc un zonage différent si le faisceau est extrait ou non.

Si le faisceau n'est pas extrait, il n'y a émission que le long de la ligne haute énergie jusqu'à l'emplacement stoppant le faisceau. Ces emplacements sont situés dans la zone haute énergie. Du fait du niveau de radiations, il a été décidé de considérer la zone haute énergie comme une zone contrôlée jaune. La zone PIXXL reste, elle, surveillée.

Dans le cas où le faisceau peut être extrait à l'air, le trajet du faisceau dans l'air représente un débit de dose suffisant pour en faire une zone rouge contrôlée. Comme pour la zone d'expérimentation, la zone rouge contrôlée est étendue à l'ensemble de la zone PIXXL pour avoir une zone rouge contrôlée délimitée par des parois infranchissables.

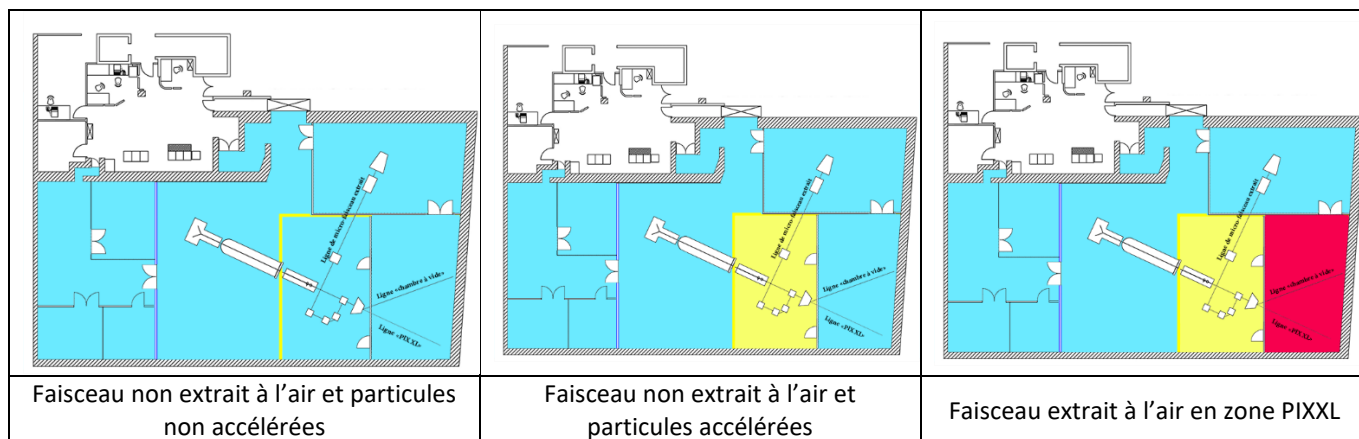


Figure 19 : zonage radiologique – Installation finale – Ligne New AGLAE

5.4.4 Mode deuton

Le zonage en mode deuton reste inchangé par rapport à l'installation existante.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

6 PRESENTATION DE L'ETAT FINALE DE L'INSTALLATION

À l'issue des travaux liés à l'intégration de la nouvelle ligne PIXXL sur l'accélérateur AGLAE, l'installation devra présenter un niveau de sûreté et de radioprotection au moins équivalent à l'état existant et conforme à l'ensemble des exigences réglementaires et normatives en vigueur, notamment en matière de radioprotection des travailleurs et de prévention des expositions accidentelles.

L'état final devra garantir une maîtrise complète des accès aux zones réglementées, en cohérence avec la nouvelle configuration de l'installation.

Les dispositifs de contrôle d'accès devront être entièrement intégrés dans la chaîne de sécurité radiologique, interfacés avec l'automate de sécurité de l'accélérateur, et fonctionner de manière fiable, sécuritaire et redondée conformément aux principes de défense en profondeur.

Plus particulièrement, l'état final visé devra répondre aux objectifs suivants :

- Assurer que tout accès aux zones surveillées ou contrôlées impactées par la ligne PIXXL soit conditionné à un état sûr de l'installation, incluant a minima :
 - l'absence de faisceau ou la mise en configuration radiologiquement sûre,
 - la prise en compte des états des systèmes de protection collective (écrans, obturateurs, bunkers).
- Garantir que toute ouverture non autorisée ou toute incohérence d'état (porte, portillon, trappe, accès technique) entraîne automatiquement une mise en sécurité de l'accélérateur, conformément aux logiques de sûreté définies.
- Mettre en œuvre des enchaînements logiques sûrs entre contrôles d'accès, signalisation lumineuse et sonore, interverrouillages, et états de fonctionnement de la machine.
- Intégrer l'ensemble des nouveaux équipements de la ligne PIXXL (accès, capteurs, dispositifs de commande) dans l'automate de sécurité existant ou mis à jour, en respectant les exigences de :
 - sûreté de fonctionnement,
 - traçabilité des états et des événements,
 - diagnostic des défauts.

L'état final devra également inclure :

- Une signalisation radiologique conforme et mise à jour, tenant compte de la nouvelle ligne PIXXL et des éventuelles évolutions du zonage radiologique.
- Des moyens de contrôle et de consignation des accès permettant l'exploitation en conditions nominales, dégradées et en maintenance, sans compromis sur la sécurité radiologique.
- Une documentation technique complète, incluant :
 - schémas fonctionnels et synoptiques de sûreté,
 - description des scénarios de sécurité,
 - mise à jour des analyses de risques et des études de sûreté associées,
 - procédures d'exploitation et de secours liées aux contrôles d'accès.
 - attestation de conformité du système radioprotection à la norme M62-105.

Enfin, l'état final devra être reçu sur la base d'essais fonctionnels et de sûreté, démontrant le respect des exigences de radioprotection, le bon comportement des dispositifs de contrôle d'accès et la cohérence globale du système de sécurité dans la configuration finale de l'installation AGLAE incluant la ligne PIXXL.

À l'issue des travaux et préalablement à la réception, le titulaire du présent lot devra produire un **rapport de fin d'intervention**, remis au maître d'ouvrage dans un délai de **15 jours ouvrés** suivant la fin des opérations de mise en service.

Ce rapport constituera un document contractuel synthétisant l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du lot 04 – Système de radioprotection. Il comprendra notamment :

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

- la **description des travaux réalisés**, avec indication des dates d'intervention, des intervenants et des zones concernées (salle accélérateur, casemate, zones adjacentes) ;
- le **récapitulatif des essais effectués**, conformément aux dispositions du § 7.4.2, incluant les essais fonctionnels, les essais de défaillance simulée et les essais de mise en sécurité, accompagnés des résultats obtenus et des valeurs de référence ;
- la liste exhaustive des **documents produits** au titre du § 7.4.3 (dossier technique de l'automate, schémas électriques et logiques, listings des programmes API, procédures de réception, certificats de conformité CE, etc.) ;
- le **bilan des interfaces réalisées** avec l'automate de contrôle-commande de l'accélérateur, incluant les tables de communication et les comptes rendus des essais communs ;
- le **bilan des non-conformités éventuelles** constatées en cours d'intervention et les actions correctives mises en œuvre ;
- toute **observation ou réserve** jugée utile à la bonne exploitation et à la maintenance de l'installation.

L'ensemble des documents annexés sera fourni en version numérique (format PDF et formats natifs éditables), classés et nommés conformément à la convention de nommage définie par le maître d'ouvrage. La validation de ce rapport conditionne la réception des prestations du présent lot.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

7 SPECIFICATIONS TECHNIQUES RADIOPROTECTIONS

Les paragraphes ci-dessous présentent les spécifications techniques à préciser dans le cahier des clauses techniques particulières relatif à la mise en place de la ligne de tir AGLAE - PIXXL.

L'ensemble des spécifications techniques décrites ci-dessous sont extraites de la norme NF M62-105

7.1 DISPOSITIONS RELATIVES A L'AUTOMATE DE SECURITE

Le titulaire devra produire une justification argumentée du choix technique entre l'extension de l'automate de sécurité existant et le déploiement d'un nouvel automate dédié. Dans cette seconde hypothèse, le nouvel automate devra reprendre à l'identique l'ensemble des fonctionnalités de sûreté et de radioprotection assurées par l'automate existant, conformément aux exigences détaillées dans les paragraphes suivants.

Le code de l'automate final devra être clairement commenté et compartimenté avec notamment un bloc dédié spécifiquement à la nouvelle ligne PIXXL.

7.2 FONCTIONS DE SECURITE

Le titulaire du présent lot devra mettre en place des matériels permettant de répondre a minima au niveau d'intégrité de sécurité en place dans l'installation existante ou a minima SIL3 au titre de la norme CEI 61508.

Toute dégradation ou perte de performance des dispositifs de sécurité sera proscrite. Les fonctionnalités initiales devront être intégralement conservées et validées en essais.

Les fonctions de sécurité devront être indépendantes des fonctions de signalisation.

7.3 DISPOSITIONS RELATIVES AU MATERIEL

Le titulaire du présent lot devra mettre en place des dispositifs de sécurité positive en cohérence avec les dispositifs déjà en place sur l'installation AGLAE. Cela afin de garantir la sécurité des travailleurs en cas de défaillances du système de sécurité.

Les dispositions de redondance, duplication et diversité devront être mises en œuvre afin de pallier les défaillances de cause commune. Ces dispositifs devront être clairement justifiés et explicités dans une notice technique.

Toute défaillance de l'automate ou des dispositifs associés aux cages de Faraday ou micro-vannes, devra entraîner la mise en état sûr de l'installation.

Des fonctions de sécurité vérifiant l'état de cages devront être intégrées dans l'automate de sécurité. Si les capteurs renvoient deux positions en même temps ou aucune position pendant plus de 3 secondes, l'automate devra se mettre en sécurité pour qu'aucun tir ne soit possible. De plus, un signal de défaut devra être envoyé à l'interface IHM de l'accélérateur.

Pour assurer la non-possibilité de guider le faisceau dans la casemate, 2 points d'arrêt du faisceau devront toujours être utilisés. Ces points d'arrêt devront être par ailleurs fermés (bloquant le faisceau) si non alimentés en électricité, à savoir CF1 et CF2 pour le mode deutons et CF3 et V6 pour le mode protons.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

7.4 DISPOSITIONS RELATIVES A LA REALISATION DES LOGIQUES CONFIEES AUX AUTOMATISMES

L'automate de sécurité (extension de l'existant ou nouvel automate selon le choix technique de l'entreprise) mis en place pour le déploiement de la nouvelle ligne de tir devra être compatible avec le système déjà en place sur l'installation AGLAE.

Le système de sécurité devra soit être câblé en série soit pris en compte en série dans la programmation de l'automate.

Il devra être indépendants du système de contrôle commande en charge du pilotage et de l'exploitation de l'installation.

Il devra être construit de façon que dans tous les cas, la défaillance d'un élément de sécurité, la perte d'alimentation de l'armoire ou l'ouverture d'une porte (suivant le mode) pendant le fonctionnement entraînent le passage de la machine dans un état sûr conforme à l'existant soit :

- La coupure des alimentations des cages de Faraday et de la vanne micro-faisceau ce qui empêchent l'extraction du faisceau à l'air avec notamment dans le cas de la nouvelle ligne PIXXL, ajout de la coupelle CF5.
- La signalisation de l'état d'arrêt d'urgence vers l'automate Thalès (ou nouvel automate de contrôle commande le cas échéant).

Des entrées et sorties de sécurité devront être positionnées sur la cage de faraday n°5 (CF5) comme cela existe déjà sur ses homologues (CF1, CF2, CF3, et V6) (cf. Figure 14).

L'automate de sécurité et ses extensions devront être conçus et paramétrés selon un principe strict de sécurité positive, incluant notamment le passage automatique à l'état sûr en cas de :

- coupure ou chute d'alimentation,
- rupture de câble ou défaut capteur,
- perte de communication interne ou externe,
- incohérence logique détectée.

Les états sûrs devront être clairement définis et documentés.

La perte d'alimentation électrique de l'automate de sécurité devra entraîner le déverrouillage des gâches électriques des portes de la nouvelle zone de tir.

L'architecture retenue devra garantir la continuité de service, la traçabilité des signaux de sécurité et la facilité de la maintenance.

Le titulaire devra fournir au maître d'ouvrage l'intégralité des éléments logiciels relatifs à l'automate de sécurité, sans restriction d'usage, incluant notamment :

- le code source complet des programmes API,
- les bibliothèques, blocs fonctionnels et paramètres associés,
- les fichiers de configuration et d'adressage,
- les versions compilées et non compilées,
- les commentaires et descriptifs permettant la compréhension, l'audit et la maintenance du code.

Aucun élément logiciel ne devra être livré sous forme de « boîte noire » ou verrouillée.

Le maître d'ouvrage devra disposer de l'ensemble des droits nécessaires à l'exploitation, à la modification et à la maintenance du système.

La réalisation des logiques des fonctions de sécurité devra prévoir :

- La formation adéquate de la personne en charge de la réalisation.
- La rédaction en amont de spécifications techniques claires et complètes, contenant notamment toutes les exigences fonctionnelles et les exigences de sécurité.
- La vérification des spécifications techniques par une tierce personne.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

- La séparation des modes « pilotage normal » et « dérogatoire ».
- La formalisation des procédures de test (rédaction d'un plan de test, définition de la couverture du test etc.).
- La vérification que les fonctions de sécurité sont effectivement assurées.
- La traçabilité des modifications, réalisation d'une analyse d'impact et validation.
- Une documentation complète, claire et mise à jour.

Voir détail en dessous.

7.4.1 Boucles de test et dispositifs de vérification

Le titulaire devra intégrer :

- des boucles de test internes permettant la vérification périodique du bon fonctionnement de l'automate de sécurité,
- des procédures permettant de réaliser les essais sans dégradation du niveau de sécurité.

Les modalités de test (fréquence, conditions, critères d'acceptation) devront être clairement décrites dans la documentation et validées lors des essais de réception.

7.4.2 Essais et mises en services

L'ensemble des essais et mise en service est dû au titulaire du présent lot.

Outre les essais fonctionnels, le titulaire devra réaliser :

- des essais de défaillance simulée (coupure d'alimentation, défaut capteur, perte de communication)
- des essais démontrant la mise en sécurité effective et systématique.

Les essais feront l'objet de procès-verbaux détaillés, intégrés au dossier de réception.

Nota : le titulaire du présent lot devra fournir la communication des tables de communication et d'échange à l'entreprise en charge de l'automate de contrôle de l'accélérateur, ainsi que des essais communs afin de garantir le bon fonctionnement de l'ensemble de l'installation.

7.4.3 Documentation

Le titulaire du présent lot devra fournir, à sa charge, l'ensemble des éléments constitutifs du dossier technique du système de sécurité", comprenant notamment :

- la description fonctionnelle et structurelle complète du système et la liste détaillée des composants utilisés incluant :
 - l'analyse fonctionnelle API mise à jour ;
 - la liste des entrées/sorties API ;
 - le listing des programmes API ;
 - la liste détaillée des composants et équipements mis en œuvre ;
 - les fiches techniques correspondantes et la documentation constructeur ;
- la description détaillée des interfaces et des échanges, comprenant :
 - la liste exhaustive des entrées/sorties de l'API ;
 - les tables d'échange et flux d'information ;
 - les interfaces entre composants ;
 - les schémas techniques complets, incluant :
 - les schémas électriques et logiques ;
 - les schémas mécaniques le cas échéant ;
 - l'architecture de communication et d'interfaçage des systèmes ;
- la documentation logicielle et de validation, comprenant :
 - les listings complets et commentés des programmes API ;

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

- la documentation relative à la validation logicielle ;
- les procédures de réception et rapports software de test en plate-forme ;
- l'analyse de risques complète, réalisée conformément à la norme EN ISO 12100 et aux normes harmonisées applicables, incluant :
 - l'identification des dangers
 - les scénarios d'accidents
 - les mesures de réduction et de maîtrise des risques mises en œuvre
- les préconisations de maintenance, de contrôle et de tests périodiques, couvrant :
 - chaque élément de sécurité pris individuellement ;
 - le système dans son ensemble ;
 - les modalités de vérification et de maintien en conditions de sécurité ;
- les documents de conformité réglementaire, incluant :
 - certificat CE ;
 - certificat de conformité associé.

L'ensemble de la documentation devra être fourni sous format numérique.

Nota : le titulaire devra créer une documentation sur l'ensemble de l'automate et non uniquement sur la partie extension.

La documentation technique du code de l'automate existant ne sera pas fournie.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

7.5 DISPOSITIF DE SECURITE

7.5.1 Le système de ronde

La mise en place des nouveaux boutons de ronde liés à la nouvelle ligne de tir devra être conforme au nouveau système de sécurité ou son extension sur l'existant et au chemin de ronde existant qui permet une couverture visuelle complète de tout le volume de la casemate ainsi que la détection de l'entrée éventuelle d'une personne pendant la ronde.

Un nouveau bouton de ronde devra être positionné en zone haute énergie afin que la ronde passe derrière la nouvelle ligne PIXXL.

7.5.2 Les capteurs de porte et serrures des clés prisonnières

Le système de verrouillage des deux portes P06 et P07 devra être équivalent et compatible avec celui des portes existantes. La porte P05 deviendra une porte double vantaux. Le système de verrouillage sur porte doubles vantaux de la porte P05 devra être identique à celui existant pour les portes P02 et P04 système monté à cheval sur les deux vantaux.

Les nouveaux capteurs de porte à mettre en place en P06 et P07 devront être de caractéristiques similaires à l'existant et conforme à la norme M62-105. Deux capteurs de position de technologie différente devront notamment être mis en place par porte ou un seul capteur de porte certifié SIL3.

L'utilisation des portes P05, P06 et P07 permettant la fermeture de la zone PIXXL devra être asservie au faisceau. Chaque porte devra être équipée de serrures à clés prisonnières du même niveau de sécurité que celles actuellement présente sur les portes P02, P03, P04 et P05.

Les clés devront être centralisées sur un pupitre de clé à côté du nouvel automate de sécurité ou de l'extension de celui existant en salle de commande.

L'ensemble devra être intégré au système de sécurité afin de garantir l'impossibilité d'ouverture en situation non sûre et la remontée fiable des états de porte à l'automate de sécurité.

7.5.3 La signalisation lumineuse relative aux accès

Le dispositif de signalisation lumineuse lié au nouveau mode protons/alphas PIXXL devra être basé sur celui existant. Il devra prendre en compte l'implantation de la nouvelle cloison séparant la zone haute énergie de la zone d'expérimentations PIXXL.

Des trèfles lumineux devront être mis en place conformément à l'existant à l'extérieur de la zone PIXXL.

Les trèfles lumineux devront indiquer le zonage radiologique et le niveau d'accès (autorisé/interdit). Les trèfles lumineux ne seront pas asservis à une mesure de DED. Ils devront être asservis à :

- L'état de la machine,
- Le type de particules utilisées,
- Le type de faisceau (extrait/non extrait).

L'allumage des trèfles lumineux dans toutes l'installation devra être conforme au zonage radiologique mis en place dans le cadre du nouveau mode protons/alphas PIXXL ainsi qu'à celui des autres modes de faisceau) tels que :

- Bleu : accès autorisé avec faisceau non extrait et non accéléré en mode alphas/protons/PIXXL et deuton
- Jaune : accès autorisé avec faisceau non extrait et accéléré en mode alphas/protons/PIXXL + chambre à vide

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

- Rouge : accès interdit avec faisceau extrait en mode alphas/protons/PIXXL.

Les états lumineux devront être cohérents avec les états de sécurité définis dans l'analyse fonctionnelle (autorisation et interdiction).

Les nouvelles signalisations rajoutées dans le cadre de PIXXL devront être allumées même si la ligne n'est pas utilisée ou que l'accélérateur est éteint. Il faudra donc modifier le code existant pour les 3 autres modes et ce afin que ces trèfles changent de couleur de façon appropriée et conforme.

7.5.4 Le dispositif d'ouverture d'urgence des portes d'accès à l'intérieure de la casemate

Un dispositif d'ouverture d'urgence devra être positionné au niveau des portes P05, P06 et P07 à l'intérieure de la zone d'expérimentation PIXXL afin de permettre la sortie de personnes éventuellement resté à l'intérieure.

Les portes P05, P06 et P07 devront être équipées de portes antipaniques.

7.5.5 L'arrêt d'urgence

Les arrêts d'urgence devront être maintenus en place et à l'identique de l'existant lors de la mise en place de la nouvelle ligne PIXXL.

Les arrêts d'urgence devront provoquer l'arrêt de la machine et la fermeture des cages de Faraday CF1, CF2, CF3, CF5 ainsi que de la vanne microfaisceau V6, assurant qu'il n'y a plus de faisceau dans la machine.

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

8 ANNEXE 1 - PLAN D'IMPLANTATION DES DISPOSITIFS DE SECURITE RELATIFS AUX CONTROLES DES ACCES – INSTALLATION AGLAE AVEC EXTENSION PIXXL

9 ANNEXE 2 – PANNEAU D’AFFICHAGE ET CONSIGNES DE SECURITES – INSTALLATION EXISTANTE

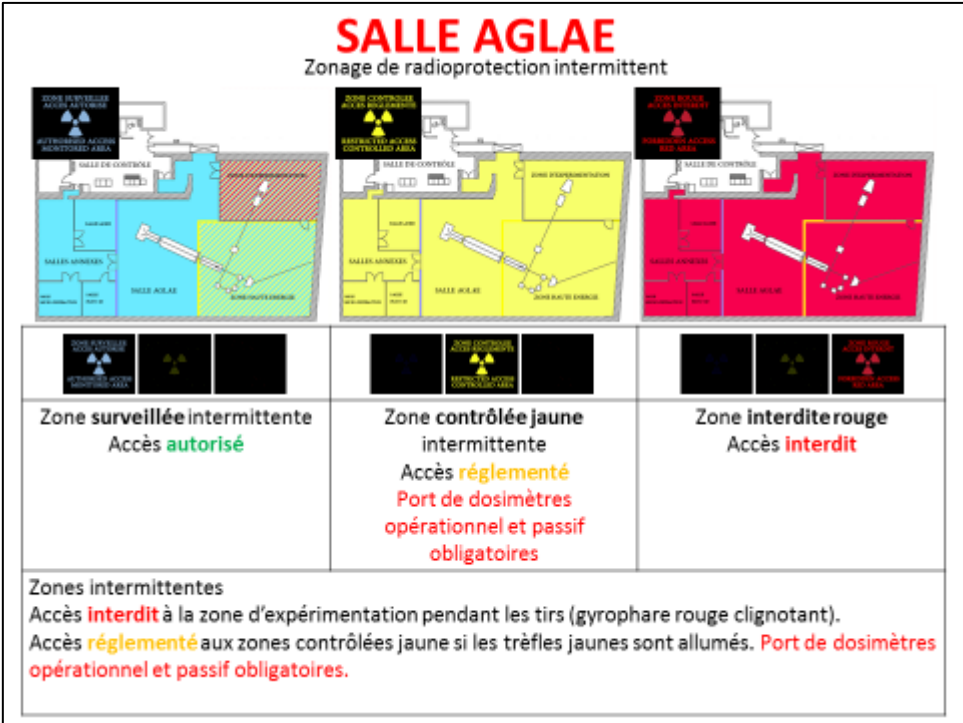


Figure 20: Panneau d’affichage du zonage en entrée de la salle 322 (français)

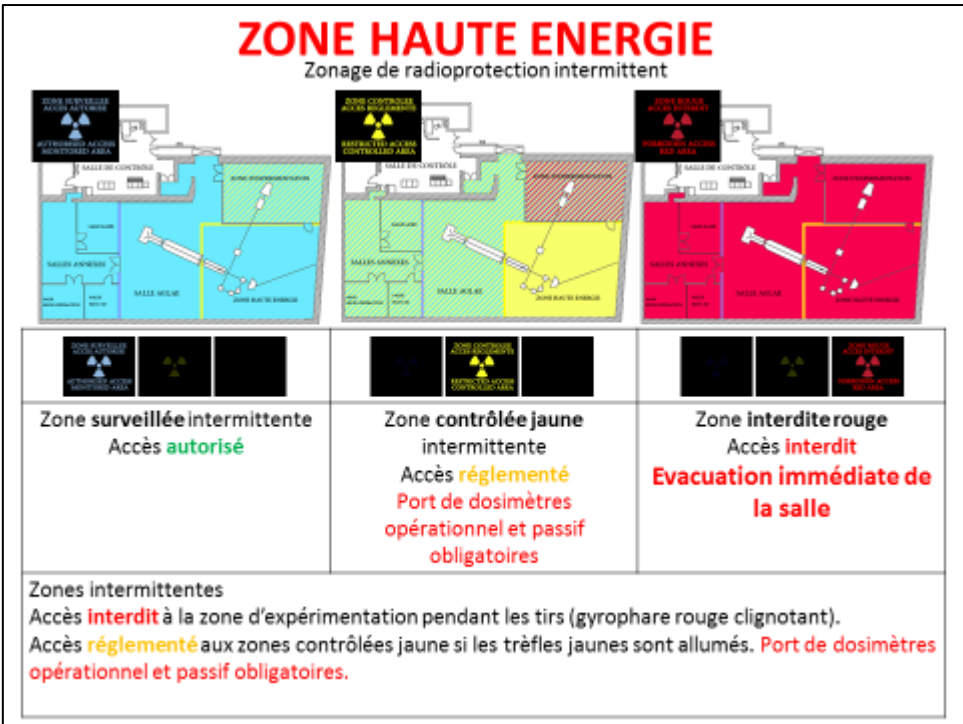


Figure 21: Panneau d’affichage du zonage en entrée de la zone haute énergie (français)

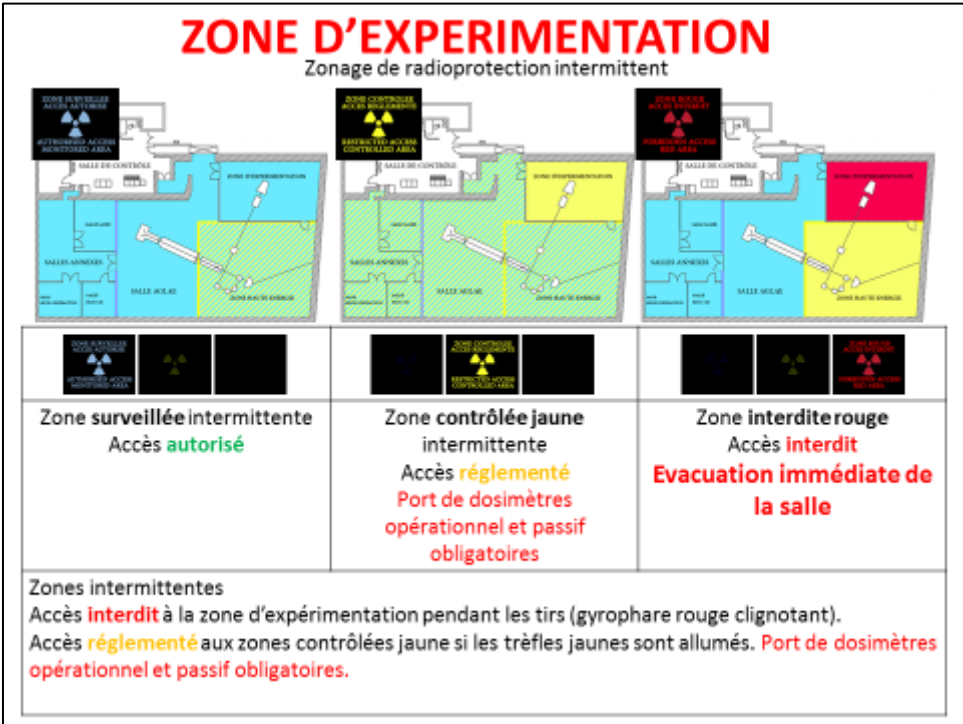


Figure 22: Panneau d'affichage du zonage en entrée de la zone d'expérimentation (français)



Figure 23: Panneau d'affichage explicatif des signaux bicolores

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

10 ANNEXE 3 – PANNEAU D’AFFICHAGE ET CONSIGNES DE SECURITES – INSTALLATION AVEC EXTENSION DE LIGNE PIXXL

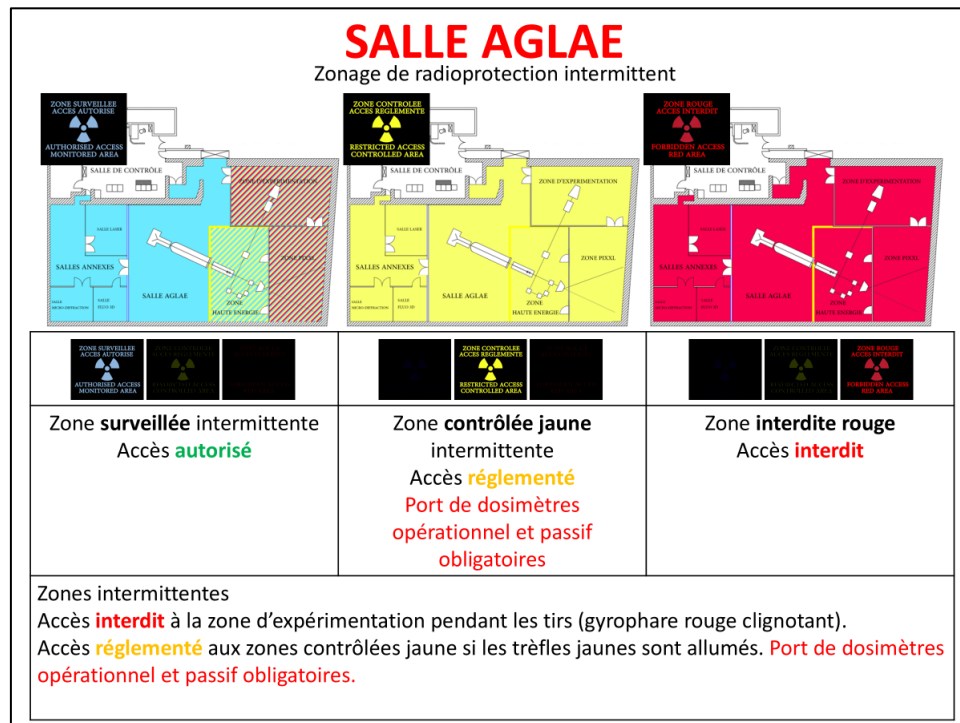


Figure 24: Panneau d'affichage du zonage en entrée de la salle 322 (français)

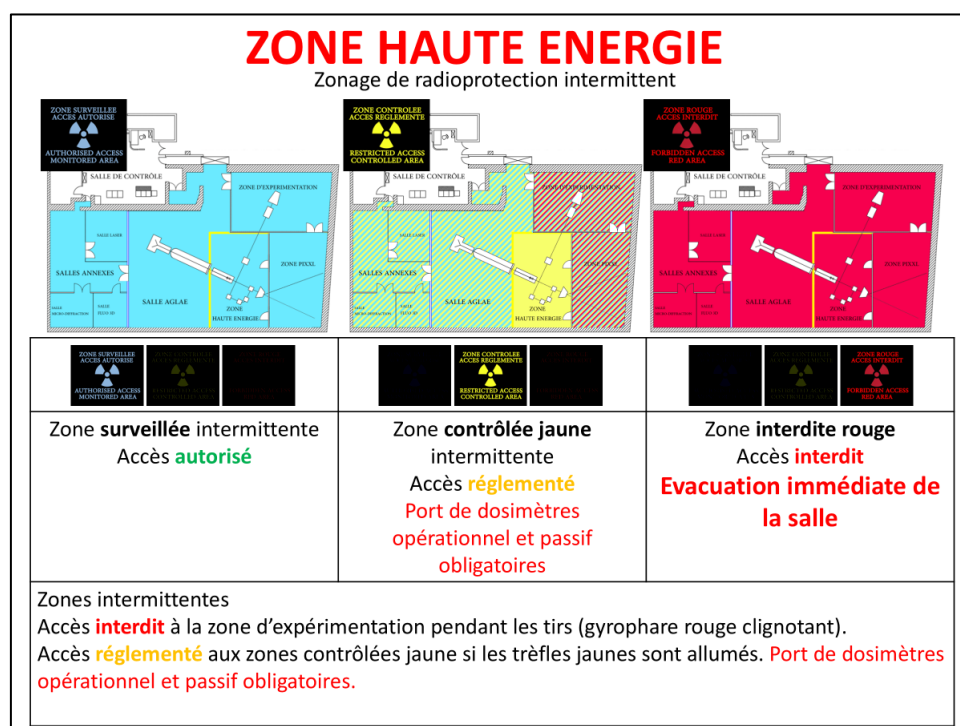


Figure 25: Panneau d'affichage du zonage en entrée de la zone haute énergie (français)

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026

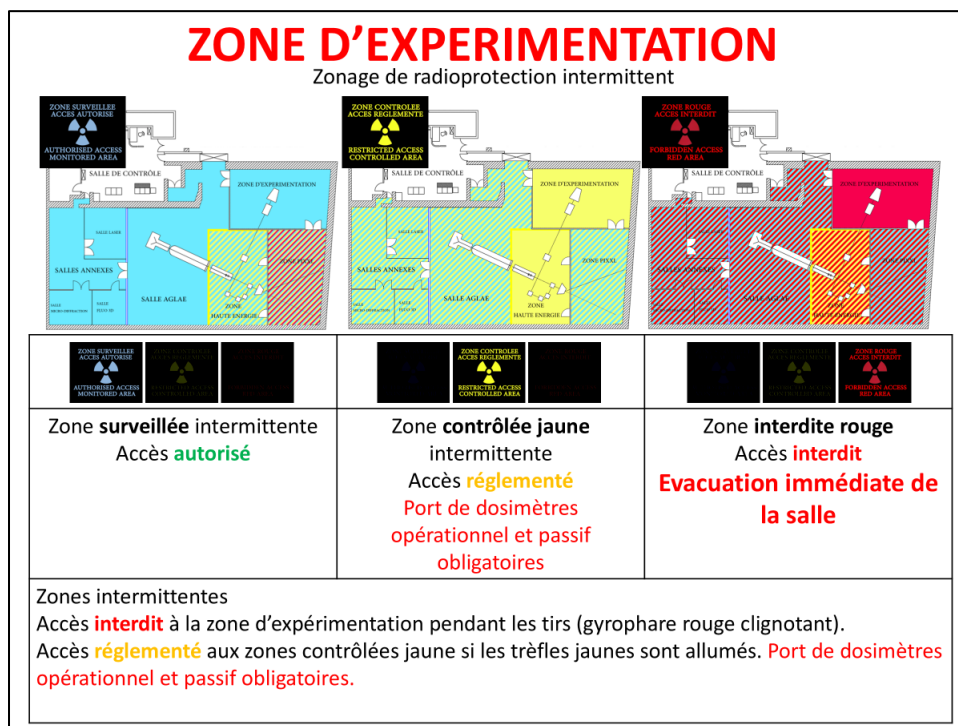


Figure 26: Panneau d'affichage du zonage en entrée de la zone d'expérimentation (français)

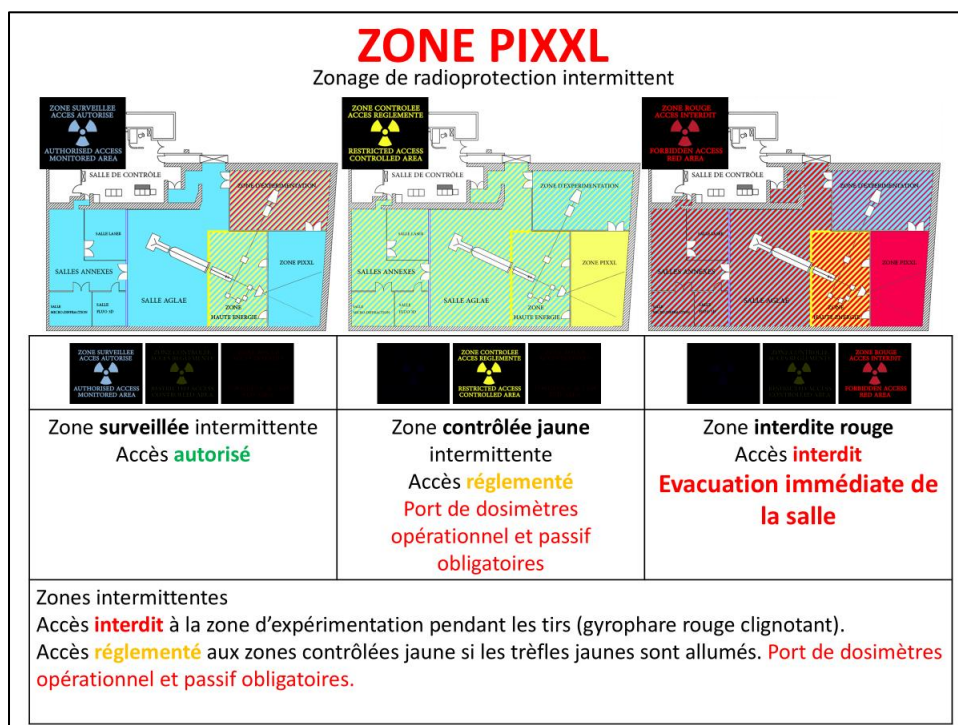


Figure 27: Panneau d'affichage du zonage en entrée de la zone PIXXL (français)

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026



Contrôle neutrons *Neutron monitoring*



Feu vert/*Green light*
Pas d'émission de neutrons
No neutron emission
Accès autorisé suivant zonage
Access granted regarding zoning



Feu rouge et sirène/*Red light and siren*
Emission de neutrons
Neutron emission
ACCÈS INTERDIT/*FORBIDDEN ACCESS*



SIRÈNE DANS LA SALLE/*SIREN IN THE EXPERIMENT HALL*

=

**EVACUATION DES PERSONNELS NON AUTORISÉS
*EVACUATION OF NON AUTHORISED PEOPLE***

Figure 28: Panneau d'affichage explicatif des signaux bicolores

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC) 30 rue du château des rentiers 75647 Paris cedex 13	Cahier des clauses techniques particulières Lot 04 Système de radioprotection
Travaux préparatoires à la mise en service d'une nouvelle ligne de tir pour AGLAE (PIXXL) dans les locaux du C2RMF au Louvre	DCE – Avril 2026