

Vérification de l'étalonnage de radiamètres, sans source radioactive !

Par **Arnaud Chapon**, ATRON - **Gabriel Dupont**, ATRON et LPC Caen, et **Jean-Marc Bordy**, LNE-LNHB, CEA-List



en substance...

Le contrôle périodique de l'étalonnage est un contrôle réglementaire (arrêté du 21 mai 2010) consistant à vérifier le bon fonctionnement d'un instrument. Dans le cas des appareils de radioprotection, tels que les radiamètres, ce contrôle triennal est le plus souvent réalisé au moyen d'une source radioactive. Mais comment se passer d'une telle source ? C'est la question à laquelle ATRON a répondu par une solution innovante conduisant à utiliser le rayonnement de freinage d'électrons comme source pour la vérification de l'étalonnage de radiamètres.

Cet article présente dans un premier temps les principes de mesure associés à chacune des dites sources de rayonnement avant de mettre en avant les avantages de la solution nouvelle et les challenges relevés par ATRON pour la mettre en œuvre.

DE L'USAGE D'UNE SOURCE RADIOACTIVE...

Le contrôle périodique de l'étalonnage au moyen d'une source radioactive est une méthode éprouvée et qui fait référence¹. Les photons de 661,2 keV émis par une source radioactive de ¹³⁷Cs, conditionnée sous forme de chlorure et associée à un système de collimation, sont le plus souvent utilisés à cette fin. Au sein d'un laboratoire d'étalonnage accrédité, le débit de kerma dans l'air et/ou d'équivalent de dose, par exemple H*(10) pour un radiamètre, est déterminé au moyen de l'étalon primaire ou d'étalons secondaires traçables à l'étalon primaire, le long du faisceau de photons. Par suite, le débit de la grandeur dosimétrique à une date de référence étant connu, il est aisé, connaissant la constante

de désintégration radioactive de calculer la valeur attendue de la grandeur dosimétrique choisie à une date donnée.

Lors des opérations de vérification de l'étalonnage, le radiamètre est exposé dans le faisceau de la source et la valeur qu'il indique est comparée à celle attendue. Cette opération est reproduite pour des sources de différentes activités et à plusieurs distances pour couvrir l'entièreté de la gamme de réponse en débit d'équivalent de dose du radiamètre. Alors, ce dernier est réputé répondre au contrôle périodique de l'étalonnage si, dans chacune des configurations, l'indication de l'appareil ne diffère pas des valeurs et incertitudes de mesure associées des étalons, au-delà des caractéristiques fournies par son certificat d'étalonnage.

...À UNE SOLUTION NOUVELLE

Pourquoi s'affranchir de sources radioactives ?

L'élimination des risques sanitaires pour les opérateurs comme pour l'environnement est la première préoccupation d'ATRON. C'est pourquoi ATRON souhaite s'affranchir de telles sources dans le but de vérifier l'étalonnage de radiamètres, les risques d'une exposition accidentelle du personnel ne pouvant pas être exclus avec ces dernières. De plus, la nécessité de déplacer les radiamètres devant la source conduit à une faible productivité de la méthode exposée précédemment et un temps d'immobilisation

du matériel accru. Enfin, le spectre énergétique d'une source radioactive est un spectre de raies, souvent peu représentatif des conditions courantes d'utilisation des radiamètres sur sites.

Ainsi, dans une démarche d'amélioration de la maîtrise métrologique, de la disponibilité des moyens de mesure et contrôle et de la sécurité radiologique, ATRON propose de s'affranchir des sources radioactives pour la vérification de l'étalonnage de radiamètres permettant de simplifier la procédure de vérification.

Le rayonnement de freinage comme alternative

Lorsqu'une particule chargée traverse un champ électro-magnétique, elle est déviée. C'est notamment le cas au sein d'un faisceau d'électrons qui bombarde une cible solide : les interactions qu'ils subissent à l'échelle atomique causent une diminution de la vitesse des électrons. Or, d'après les lois fondamentales de l'électromagnétisme, régies par les équations de Maxwell, cette variation de vitesse induit l'émission d'un rayonnement de freinage (dit « *bremsstrahlung* ») correspondant à la perte d'énergie des électrons. Cela crée un flux de photons dont le spectre en énergie est continu avec un maximum correspondant à l'énergie maximale des électrons incidents.

C'est ce spectre de rayonnement de freinage que nous nous proposons d'utiliser comme source de photons pour la vérification de l'étalonnage de radiamètres. Celui-ci a des caractéristiques intéressantes pour cette

1. Elle est décrite dans la norme ISO-4037 : Rayonnement X et gamma de référence pour l'étalonnage des dosimètres et des débitmètres, et pour la détermination de leur réponse en fonction de l'énergie des photons.

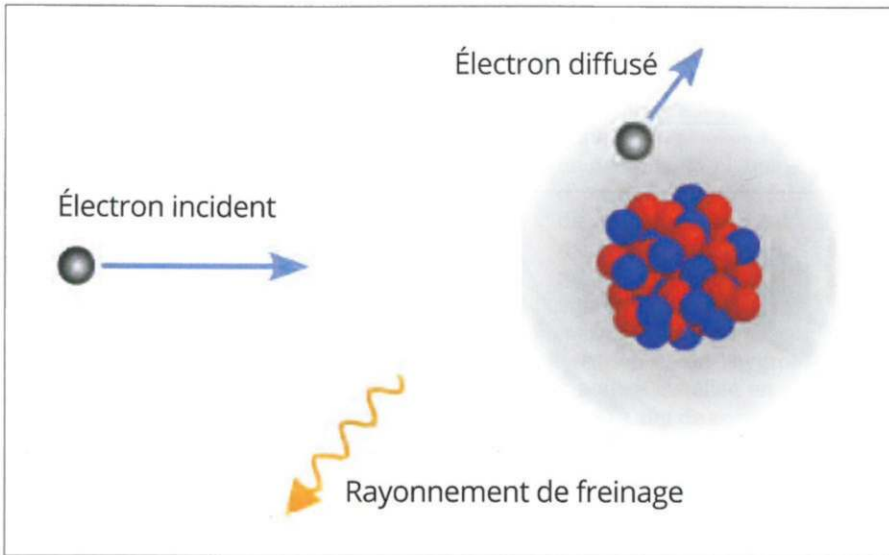


Figure 1 : illustration du phénomène de freinage d'un électron, à l'échelle atomique, conduisant à l'émission de rayonnement de freinage.

application : d'une part sa distribution en énergie est étendue et peut couvrir intégralement le domaine de mesure des radiamètres, et d'autre part, pour une énergie donnée des électrons, le débit de dose dû au rayonnement de freinage est proportionnel au courant du faisceau d'électrons sur cette cible. Ainsi, il devient possible de mesurer la réponse du radiamètre sur toute sa gamme énergétique, dans un champ réaliste, et toute sa dynamique de débit de dose en agissant uniquement sur deux paramètres : la haute tension pour régler l'énergie maximale du faisceau de photons,

et le courant du faisceau primaire d'électrons pour régler le débit de la grandeur dosimétrique sans changer la distance source-détecteur.

**VÉRIFICATION
DE L'ÉTALONNAGE
DE RADIAMÈTRES
AVEC UN ACCÉLÉRATEUR
D'ÉLECTRONS**

L'accélérateur

Afin de générer un rayonnement de freinage, il est donc nécessaire d'accélérer des électrons et de les freiner sur une cible de conversion. À cette fin, le choix de ATRON s'est

porté vers un accélérateur électrostatique, un Singletron HVEE², produisant une haute tension pouvant atteindre 3,5 MV et une dynamique de courant de quelque 0,1 pA à 1 mA (soit neuf ordres de grandeur). Le faisceau d'électrons est conduit sous vide dans une ligne composée d'un déflecteur 60° afin d'en assurer une bonne filtration en énergie. Il est ensuite mis en forme et arrêté par une cible de conversion dans une salle séparée de celle dans laquelle est installé l'accélérateur. Ainsi, la machine et ses utilités sont protégées de l'effet du rayonnement, lequel peut atteindre jusqu'à 1 000 Sv/h en salle d'irradiation. À titre d'illustration, de tels débits de dose nécessitent la mise en œuvre de murs de béton de 2,10 m d'épaisseur pour assurer la radioprotection des personnes autour de l'installation.

La cible

La cible est composée d'un élément de numéro atomique Z et de densité d élevés afin de maximiser la probabilité d'interaction des électrons incidents avec le cortège électronique des atomes de la cible et par conséquent favoriser l'émission de rayonnement de freinage. Il s'agit d'une plaque de tantale (73 Ta, d=16,4), d'une épaisseur de 1,5 mm dont un découpage astucieux permet en outre d'assurer le centrage du faisceau sur la cible. Afin de dissiper la puissance thermique produite, la plaque de

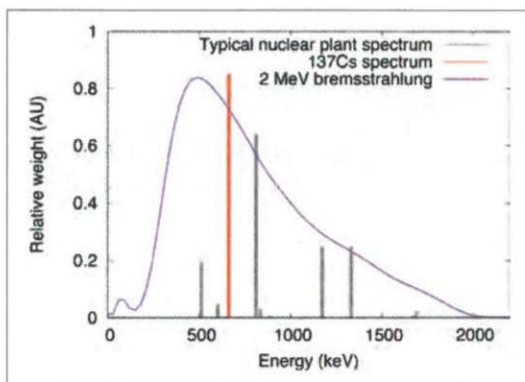


Figure 2: spectre énergétique de rayonnement de freinage (en rose) superposé à un exemple de spectre issu de Centre Nucléaire de Production d'Électricité (en gris) et raie mono-énergétique du ¹³⁷Cs (en orange) - données simulées.

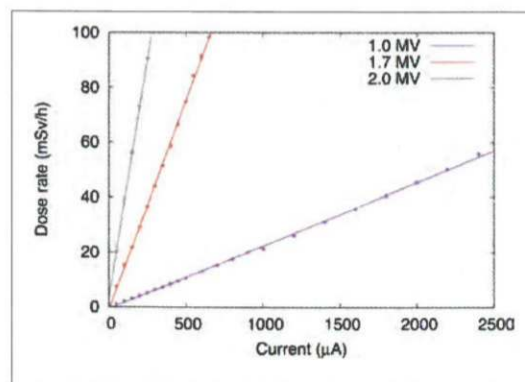


Figure 3: réponse en débit de dose d'un radiamètre (type FH-40) en fonction du courant d'un faisceau d'électrons de 1,0 MV (en rose), 1,7 MV (en orange) et 2,0 MV (en gris) - données expérimentales.

2. High Voltage Engineering Europa B.V., Amersfoort, Pays-Bas.

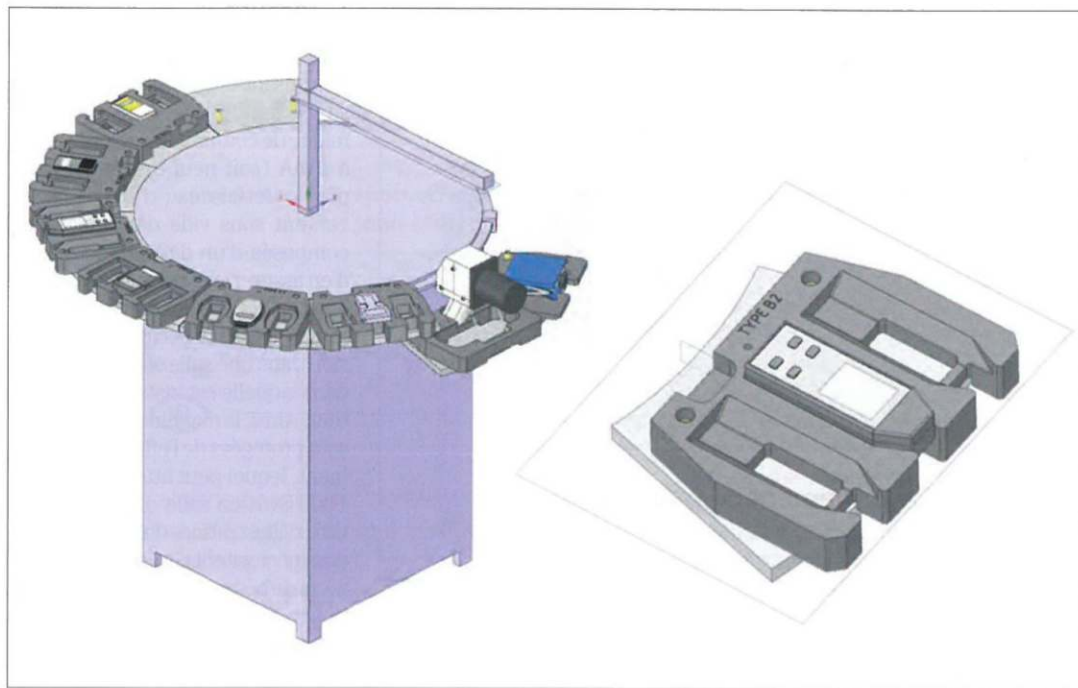


Figure 4 : schéma du passeur d'échantillon et exemple de gabarit.

tantale est solidaire d'une plaque de cuivre dans laquelle circule de l'eau maintenue à 15 °C, en circuit fermé. Un système de déflecteurs est mis en œuvre pour balayer la surface de la cible (22x4 cm²) avec une fréquence de 25 Hz dans le plan horizontal (grande longueur) et 1 kHz dans le plan vertical (petite largeur). Le champ d'irradiation résultant présente une homogénéité de 99,8 % sur une surface de 400x80 mm² à 1 m, suffisant pour permettre la vérification de l'étalonnage de plusieurs radimètres simultanément.

ATRON a par ailleurs développé, en collaboration avec le LPC Caen³, une chambre d'ionisation, afin d'assurer une régulation du faisceau d'électrons dans le domaine des débits de « dose » les plus faibles. Cette chambre, accolée à la cible de conversion, fonctionne en transmission et l'électronique associée à la mesure de débit de dose agit sur la source d'électrons primaires grâce à une boucle de rétroaction pour la réguler avec une précision meilleure que 2 %.

La vérification de l'étalonnage de radimètres

Afin d'assurer la répétabilité et la reproductibilité des mesures, ATRON a développé, en collaboration avec le LPC Caen, un passeur d'échantillons permettant de placer un ou plusieurs radimètres simultanément dans le champ d'irradiation. Pour chaque modèle de radimètre, ont été conçus et réalisés des gabarits afin qu'une tolérance maximale de 1 mm soit respectée sur leur positionnement. Le passeur peut contenir jusqu'à trente-six radimètres, répartis par trois sur douze secteurs, par ailleurs amovibles.

Ensuite, chaque secteur est exposé face au faisceau l'un après l'autre et une caméra durcie, placée à l'endroit du plateau exposé, permet de lire l'indication des radimètres à différents niveaux d'irradiation. Une séquence d'irradiation consiste alors à soumettre un secteur à chaque niveau de débit de dose de la gamme du radimètre exposé, par décade. Pour chaque valeur de débit de dose, l'indication du radimètre

est lue par l'intermédiaire de la caméra et comparée aux mesures de deux chambres d'ionisation placées dans le champ d'irradiation. De même que si la source de rayonnement était une source radioactive, le radimètre est alors réputé respecter les critères du contrôle périodique de l'étalonnage si, pour chaque niveau de débit de dose de sa gamme, l'indication de l'appareil ne diffère pas des valeurs et incertitudes de mesure associées indiquées par la chambre d'ionisation de transfert, au-delà des caractéristiques fournies par son certificat d'étalonnage.

Maîtrise métrologique

Les grandeurs dosimétriques physiques (ou primaires) pour la mesure des rayonnements ionisants, dose et kerma, sont utilisées pour établir des références nationales et les comparer. Les valeurs des grandeurs opérationnelles et de protection leur sont « traçables » par le calcul à partir de la connaissance du spectre des photons. Les grandeurs de protection sont

3. Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, LPC Caen, ENSICAEN, Université de Caen, CNRS/IN2P3, Caen, France.

définies pour quantifier le risque d'effets stochastiques de l'exposition aux rayonnements ionisants et établir des limites d'expositions des travailleurs et du public. La mesure des grandeurs opérationnelles (équivalents de dose) permet d'estimer la dose efficace et les dose équivalentes.

Le débit d'équivalent de dose est la grandeur mesurée par les radiamètres dont ATRON se propose de vérifier l'étalonnage par la méthode exposée dans cet article.

La traçabilité de cette grandeur au kerma dans l'air, choisi comme grandeur primaire, est assurée par le laboratoire national de métrologie français dans le domaine des rayonnements ionisants, le CEA/LNE/LNHB⁴. Une chambre d'ionisation dite de transfert est développée par ce laboratoire afin de déterminer le kerma dans l'air délivré par l'installation à l'endroit où sont placés les radiamètres. La mesure spectrométrique ou le calcul permettent ensuite de calculer le coefficient de conversion moyen du kerma dans l'air vers les équivalents de dose *via* les coefficients de conversion monocinétiques fournis par l'ICRU. Ainsi, on permet la comparaison de l'indication des radiamètres à la valeur de référence au point de mesure, dans le champ de rayonnement. Cette démarche assure la traçabilité du débit d'équivalent de dose

mesuré sur l'installation à la référence nationale.

Deux chambres d'ionisation complémentaires, de 1 litre chacune, sont placées hors faisceau en dessous du plateau de part et d'autre de l'axe du faisceau afin de vérifier son homogénéité pendant l'irradiation et d'assurer un monitoring en termes de kerma/équivalent de dose. Une chaîne de mesure de la température, de la pression et de l'hygrométrie est en outre installée en salle d'irradiation afin de corriger la mesure des variations de masse volumique de l'air constituant le milieu détecteur des dites chambres d'ionisation. Ainsi, la mesure du kerma dans l'air par ces deux chambres d'ionisation permet :

- ▶ de contrôler l'homogénéité du champ d'irradiation dans le plan des radiamètres ;
- ▶ de vérifier l'étalonnage de radiamètres soumis au champ de rayonnement réaliste délivré par FÉLIX⁵, représentatif des conditions d'utilisation des radiamètres ;
- ▶ de comparer les résultats obtenus et ceux qui auraient été obtenus dans un faisceau de ¹³⁷Cs de référence.

De plus, afin de garantir la qualité des mesures délivrées, ATRON s'inscrit dans une démarche d'accréditation selon le référentiel ISO 17025⁶ couvrant l'ensemble des modalités

de la prestation de vérification de l'étalonnage de radiamètres.

Avantages de cette méthode

Au contraire d'une source radioactive, le spectre énergétique du rayonnement de freinage est continu et recouvre l'ensemble de la gamme de réponse en énergie du radiamètre. La vérification de l'étalonnage par ce moyen est donc plus proche des conditions réelles d'utilisation des radiamètres et la proportionnalité entre le débit de dose délivré et l'intensité du faisceau primaire d'électrons permet de mesurer la réponse en débit de dose du radiamètre sur toute sa gamme en agissant seulement sur les paramètres de l'accélérateur. Cela simplifie considérablement les opérations et contribue à optimiser la productivité et la fiabilité de la méthode, laquelle s'avère en effet aisément automatisable.

Finalement, l'utilisation du rayonnement de freinage comme source pour la vérification de l'étalonnage de radiamètres répond à l'ambition initiale de ATRON de s'affranchir de source radioactive pour ces opérations et contribue à réduire l'usage de ces dernières. Les risques sanitaires pour les opérateurs et l'environnement s'en trouvent aussi diminués, inscrivant ATRON dans une démarche progressiste de sécurité et de maîtrise métrologique.

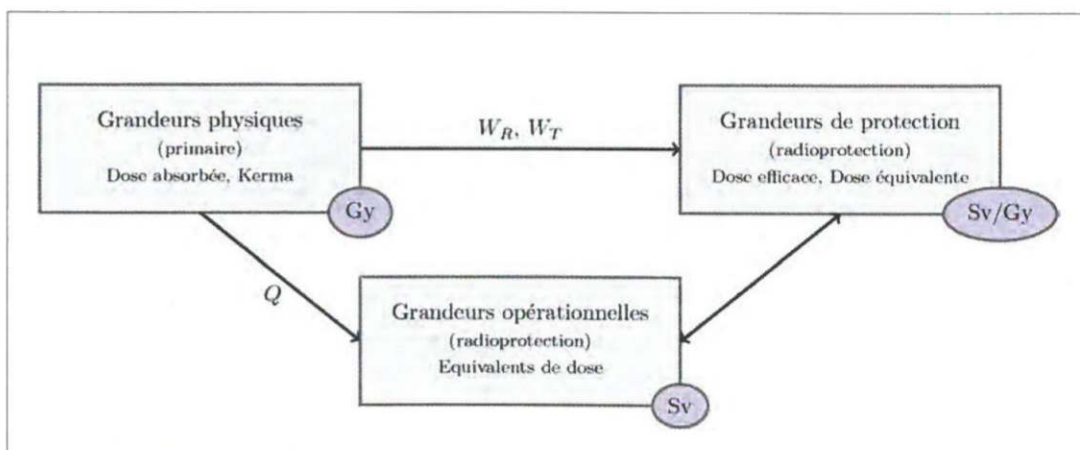


Figure 5 : relations entre les grandeurs de mesure de des rayonnements ionisants : grandeurs physiques, opérationnelles et de protection.

4. Laboratoire National Henri Becquerel, LNE-LNHB, CEA, LIST, Saclay 91191 Gif sur Yvette Cedex, France. 5. FÉLIX : Faisceau d'Électrons et la Ligne d'Irradiation X. 6. ISO/IEC 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

De plus, une source d'alimentation électronique située dans le terminal de l'accélérateur permet de couper le courant du faisceau d'électrons en un temps de typiquement 100 ms. Ces irradiations courtes devraient offrir la possibilité d'apprécier la réponse de radimètres soumis à des expositions aiguës, ce que ne permet que difficilement une source radioactive. En ce sens, cette méthode innovante de vérification de l'étalonnage de radimètres ouvre aussi une nouvelle dimension pour la qualification de matériels de radioprotection, encouragée par l'IRSN*.

ATRON, ACCÉLÉRATEUR DE VOS AMBITIONS

ATRON ne limite pas son activité à l'étalonnage de radimètres. Dès 2018, le Faisceau d'Électrons et la Ligne d'Irradiation X (FÉLIX)

dont dispose la plate-forme sera mis à la disposition d'équipes extérieures pour leurs travaux sous irradiation. L'accélérateur électrostatique d'électrons, pourvu d'une cible X amovible, implanté au sein d'une installation adaptée aux contraintes organisationnelles, environnementales et de confidentialité de ses partenaires, se révèle en effet tout à fait adapté à de telles applications. Les expertises internes en métrologie et modélisation dont dispose ATRON, ainsi que les supports scientifiques et techniques régionaux qui l'entourent, permettent en outre d'assurer l'accompagnement sur mesure de projets innovants, de la qualification des travaux de recherche et développement (R&D) jusqu'au processus d'industrialisation.

En particulier, peuvent être menées des études de vieillissement de matériaux relatives

par exemple à la problématique du stockage de déchets ou de la tenue sous irradiation de câbles ou gaines polymères, ainsi que des études de qualification et d'optimisation de protections biologiques.

Les domaines d'application

Si ATRON est issu d'une technologie de rupture dans l'instrumentation nucléaire, visant à abandonner l'utilisation de sources radioactives pour la vérification de l'étalonnage de radimètres, ses ambitions ne s'arrêtent pas là. L'équipement FÉLIX délivre un faisceau d'électrons ou de rayonnement X sur de larges gammes en énergies (de 200 keV à 3,5 MeV) et courant (1 pA à 1 mA) permettant d'y mener la plupart des travaux de recherche et développement (R&D) sous irradiation. Dès 2018, cette plate-forme sera accessible pour répondre à ces besoins variés.

IRSN
Institut de
Radioprotection
et de Sécurité
Nucléaire.

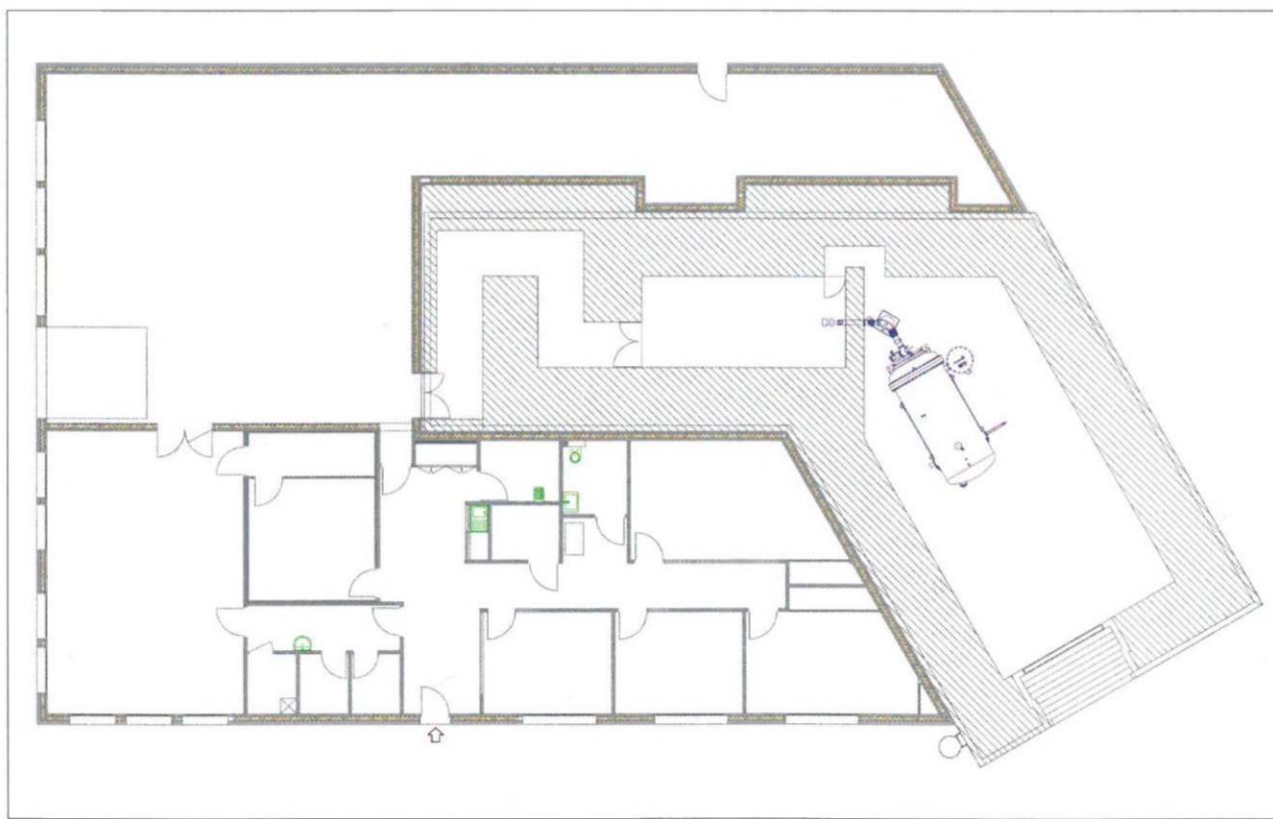


Figure 6 : plan de l'installation FÉLIX de ATRON.