

RAPPORT

du Groupe de travail issu du
Groupe Permanent d'experts
en RadioProtection

mars 2023



Propositions du Groupe de Travail

« GT-Champs pulsés »

PREAMBULE

L'évaluation des risques dans le cadre de la démarche générale de prévention va permettre de déterminer la nécessité de mettre en place des zones délimitées autour d'une source de rayonnements ionisants qui représente un risque d'exposition des travailleurs en fonction de leur proximité à cette source et de la durée du travail dans son voisinage.

Inscrit dans un objectif réglementaire de s'assurer du non dépassement des valeurs limites instituées, le zonage radiologique est d'abord, comme pour d'autres classes de risques, la signalisation visuelle d'une source de danger. Mais il constitue également une indication sur un niveau de risque en présence au travers d'une approche graduée.

Parmi les obligations de l'employeur en matière de protection des travailleurs contre les effets des rayonnements ionisants, le zonage est un outil notamment destiné à réglementer l'accès à une installation et ses locaux selon une cartographie de risques donnée.

Le regard historique sur ses évolutions souligne que ce dispositif majeur est au cœur des préoccupations et des actions des acteurs de terrain de la radioprotection qui ont pu régulièrement faire part de leur retour d'expérience. Les dispositions les plus récentes se veulent plus simples, replaçant l'employeur au centre de ses responsabilités notamment en termes d'évaluation des risques et de prévention, mais il subsiste néanmoins quelques points de difficultés à surmonter. Il en est ainsi des évolutions technologiques portant sur certaines sources de rayonnements ionisants rendant plus complexe la démarche d'évaluation des risques.

C'est le cas particulier de sources qui n'émettent pas les rayonnements ionisants de façon constante mais au travers de pulses parfois très courts et extrêmement intenses ou de variations au cours du temps.

Les caractéristiques des champs pulsés induisant un risque radiologique variable d'un équipement à un autre et d'un secteur d'activité à un autre, justifient un encadrement au niveau réglementaire pour la délimitation du zonage en vue de la protection des travailleurs, du public et de l'environnement.

Le présent rapport détaille les recommandations concrètes du groupe de travail (GT) issu du Groupe permanent d'experts en radioprotection de l'ASN (GPRP) chargé de réfléchir sur le zonage en champs pulsés en mai 2022 en vue de le renforcer.

Synthèse

En avril 2022, le Groupe permanent d'experts en radioprotection (GPRP) a constitué en son sein un Groupe de travail réduit, « GT - Champs pulsés » (dénommé « GT »), en vue de produire les réponses utiles à une saisine conjointe du Directeur général du Travail et du Directeur général de l'ASN.

Sur le constat des difficultés d'application de critères de délimitation des zones orange et rouge dans le cadre d'émissions de rayonnements ionisants en champ pulsé, introduits par le décret n°2018-437 du 4 juin 2018, la DGT et l'ASN ont appelé le GPRP à une réflexion sur les dispositions relatives à la délimitation de ces zones orange et rouge. Au-delà, l'ASN et la DGT ont souhaité recueillir un panorama des équipements de travail émettant en champ pulsé, incluant leurs caractéristiques.

Au terme d'un retour historique sur les évolutions en matière de zonage radiologique, le GT a tout d'abord été confronté à la difficulté d'une absence de définition de ce que peut être un « champ pulsé ».

Au bout de dix mois de travail intense, de questionnements et d'auditions, le GT présente par la suite :

- un panorama des appareils émettant des rayonnements ionisants en champ pulsé - soulignant, d'une part, leur extrême diversité d'application en fonction des secteurs où ils sont mis en œuvre et, d'autre part, la diversité de leurs caractéristiques techniques propres (type de pulses, fréquence, intensité, durées d'émission...);
- le résultat d'une recherche bibliographique sur ce que pourrait être la définition d'un champ pulsé, sur laquelle le GT s'est prononcé ;
- la problématique des mesurages dans un tel contexte, ainsi que les difficultés métrologiques associées, ce qui n'est sans doute pas étranger aux difficultés d'application sur le terrain ;
- le résultat d'une recherche bibliographique pour tenter de cerner les effets biologiques conséquence d'irradiations intenses mais très brèves, laquelle souligne les limites de nos connaissances actuelles.

I – Les recommandations du GT

A partir des constats qu'il a pu établir au cours de ses investigations multiples, le GT formule les onze recommandations listées ci-après.

Recommandation n°1

Le GT constate que le critère des 10 secondes, en tant que durée maximale d'émission à débit constant à considérer pour définir un champ pulsé, fait l'objet d'un consensus dans les différents documents consultés. Le GT considère que ce critère est satisfaisant, dans le sens où il est basé sur les capacités techniques des appareils de mesure actuels.

Le GT propose ainsi la définition suivante pour caractériser une émission en champ pulsé : « un rayonnement ionisant émis par un équipement de travail, ayant un débit d'équivalent de dose variable (pulse ou modulation) pendant des intervalles de temps inférieurs à 10 secondes. ».

Recommandation n°2

Pour ce qui concerne les impulsions uniques et les trains d'impulsion, afin d'éviter l'utilisation des concepts de débits de dose ou de débits d'équivalent de dose moyen, instantané, de crête, etc..., parfois compliqués à déterminer pour des champs pulsés, le GT recommande de se baser sur la notion de dose par pulse (à traduire en dose efficace), à multiplier ensuite par le nombre de pulses délivrés en une heure/en un mois pour obtenir la dose efficace intégrée sur une heure/un mois, à comparer ensuite aux valeurs réglementaires figurant dans le code du travail en fonction de l'utilisation prévue pour l'appareil (installation ou chantier).

Concernant les émissions en champs modulés, une approche similaire sera adoptée en déterminant la dose efficace intégrée au cours d'une émission et en tenant compte du nombre d'émissions sur une période d'une heure/d'un mois.

Recommandation n°3

Pour ce qui concerne le nombre de pulses délivrés en une heure/un mois, il est bien précisé dans la saisine que la méthodologie tiendra compte des conditions de travail et d'utilisation réalistes.

Ainsi, comme pour les autres équipements de travail, le GT recommande de se placer dans les conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes, et non dans les conditions maximales de fonctionnement de l'appareil.

Recommandation n°4

Le GT constate que les informations documentaires associées à ce type d'appareil en particulier et servant à l'évaluation des risques sont souvent limitées, voire absentes.

Le GT recommande ainsi aux autorités compétentes d'obtenir que les fabricants/distributeurs fournissent, dans leur documentation technique, les caractéristiques des émissions produites permettant de déterminer in fine la dose efficace pour une séquence d'émission. Il s'agira, à titre d'exemple :

- *du type d'impulsion (impulsion unique, train d'impulsions, champ modulé) ;*
- *de la durée totale de l'émission ou du nombre total d'impulsions par unité de temps ;*
- *de la durée/largeur des impulsions (Δt) ;*
- *de la dose maximale par impulsion ;*
- *des capacités intrinsèques de la machine (nombre maximal de pulses délivrés par heure...).*

Recommandation n°5

Compte tenu du développement actuel des équipements de travail émettant des rayonnements ionisants de façon très intense sur des temps extrêmement courts, le GT s'est penché sur la question des effets biologiques insoupçonnés (aggravation ou réduction des effets néfastes), qui n'a pour l'heure pas de réponse et fait uniquement l'objet d'hypothèses.

Le GT estime qu'il est essentiel que la recherche en radiobiologie approfondisse cette question et recommande que les répercussions possibles sur le système de radioprotection soient traitées par les instances concernées.

Recommandation n°6

Le GT constate le développement croissant d'équipements de travail de plus en plus complexes qui peuvent néanmoins représenter des sources de danger important en cas de non maîtrise.

De manière générale, compte tenu de la grande diversité des équipements de travail étudiés dans le cadre de cette saisine, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire, de viser avant tout des objectifs généraux de prévention et de protection des travailleurs, remplaçant

l'employeur face à ses responsabilités, et de renvoyer d'éventuelles mesures spécifiques vers d'autres outils non réglementaires.

Le GT considère ainsi que l'élaboration de guides sectoriels, impliquant fortement les acteurs de la radioprotection dans tous les secteurs concernés, pourrait constituer l'outil adapté et évolutif au regard des retours d'expérience.

Recommandation n°7a

Le GT constate les limites importantes du mesurage en champ pulsé. Aussi, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à ne pas réintroduire les dispositions antérieures portant sur des mesurages en débit d'équivalent de dose ou encore sur des mesurages intégrés sur une seconde pour ce qui concerne les champs pulsés.

Le GT invite les administrations à renvoyer sur des guides sectoriels toute modalité pratique relative à la métrologie lorsqu'il s'agit d'émissions non continues dont la durée d'impulsion est inférieure à 10 secondes.

Recommandation n°7b

Le GT recommande que les fabricants/distributeurs d'appareils de mesure fournissent des informations détaillées concernant les conditions d'utilisation de leurs appareils et leurs limites, y compris pour ce qui concerne les dosimètres opérationnels.

Recommandation n°7c

Le GT recommande que la recherche en dosimétrie et en métrologie soit soutenue, en vue de mettre à disposition des appareils de mesure effectivement adaptés à ces émissions particulières.

Recommandation n°8

Compte tenu, d'une part, du développement croissant d'équipements de travail émettant des rayonnements en champ pulsé et, d'autre part, sur le constat des lacunes dans le domaine de la formation, le GT suggère que des formations spécifiques à ces équipements soient développées, avec un approfondissement sur le volet métrologique.

Le GT considère que l'élaboration de guides sectoriels (évoquée dans les précédentes recommandations) pourrait constituer un outil de référence dans le cadre de telles formations à la charge de l'employeur.

Recommandation n°9

Compte tenu du retour d'expérience sur le dispositif de zonage actuel et tenant compte d'une demande de stabilisation de la réglementation, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à conserver les dispositions en vigueur encadrant le zonage radiologique (autre que les zones orange et rouge), tant pour les installations fixes que pour les équipements mobiles.

Recommandation n°10

En réponse à la saisine DGT/ASN, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à conserver en l'état les dispositions introduites par le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 encadrant le zonage radiologique, notamment pour ce qui concerne la délimitation entre les zones orange et rouge.

Le GT a conscience qu'il peut subsister dans certains secteurs et pour des applications particulières des lacunes ou difficultés dans l'application des dispositions en vigueur. Aussi, il suggère de reporter les clarifications utiles en termes d'approche méthodologique et d'outils à mettre en œuvre dans les guides sectoriels précédemment évoqués.

Recommandation n°11

De ce point de vue le GT propose que l'approche méthodologique opérationnelle qu'il a développée dans le rapport, et qui est rappelée ci-après, soit la base pour la délimitation des zones et les vérifications associées ; elle pourrait être ainsi déclinée dans les guides sectoriels précédemment évoqués.

II – Méthodologie générale opérationnelle

Le GT propose par ailleurs une méthodologie générale opérationnelle de délimitation des zones dans le contexte d'émissions en champ pulsé, résumée dans le schéma ci-après.

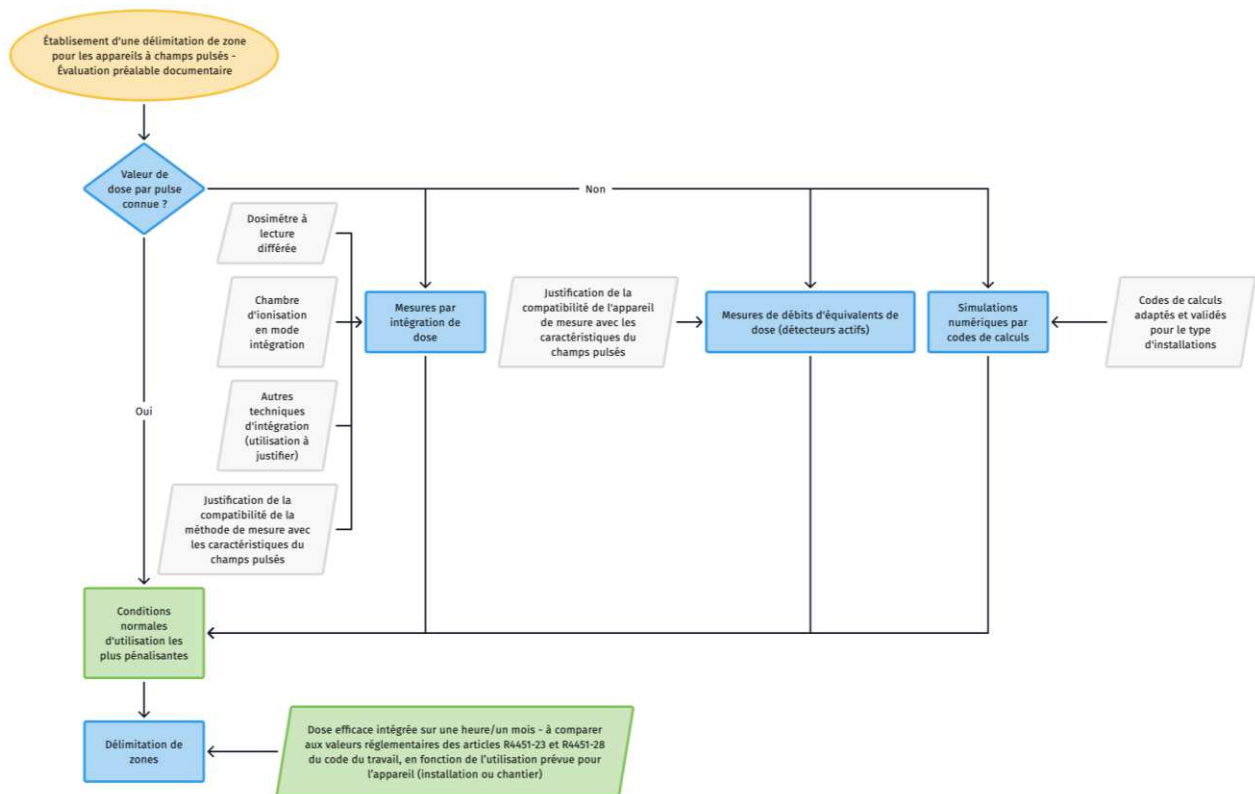


Figure 1 - Méthodologie générale opérationnelle pour la délimitation de zones a priori (Les recommandations du GT sont reprises dans les formes sur fond vert)

SOMMAIRE

1	Historique et évolution du concept de zonage	9
2	Saisine du GPRP	11
2.1	Contexte	11
2.2	Lettre de saisine	12
2.3	Composition du GT	12
2.4	Organisation, démarche et méthodes de travail	13
3	Éléments préliminaires	14
3.1	Définition des « champs pulsés »	14
3.1.1	Recherche bibliographique.....	14
3.1.2	Exemples de « champs pulsés »	16
3.1.3	Paramètres caractérisant ces émissions.....	19
3.1.4	A quel moment la durée des pulses peut-elle poser problème ?	19
3.2	Effets biologiques associés à un champ pulsé	20
3.2.1	Généralités sur les interactions rayonnements - le vivant	20
3.2.2	Principe de la thérapie flash	20
3.2.3	Définition de l'effet flash	21
4	Panorama des équipements	25
4.1	Domaines médical et vétérinaire	25
4.2	Domaines de l'industrie et de la défense	30
4.2.1	Radiographie éclair	30
4.2.2	Autres générateurs X utilisés pour du contrôle non destructif.....	33
4.2.3	Radars de défense/surveillance aérienne.....	35
4.2.4	Scanners à rayons X.....	37
4.3	Domaine de la recherche	39
4.3.1	Généralités	39
4.3.2	Typologie des accélérateurs de particules.....	39
4.3.3	Les différents appareils électriques générateurs de rayonnements ionisants à champs pulsés dans le domaine des accélérateurs de particules.....	40
4.3.4	Synthèse	46
5	Mesurages et limites	46
5.1	Éléments préliminaires	46
5.2	Revue bibliographique des appareils de mesure existants.....	47
5.2.1	Intercomparaison de différents appareils de mesure.....	47
5.2.2	Questionnaire envoyé aux constructeurs	50
5.3	Mesurages recommandés	52
5.3.1	Utilisation de dosimètres à lecture différée	52
5.3.2	Mesures avec des appareils en mode intégration	53

5.3.3	Les nouveaux appareils et les appareils en cours de développement	54
5.3.4	Autres problématiques.....	56
6	Constats et recommandations.....	58
6.1	Appréhender et définir les champs pulsés	58
6.1.1	Quelle définition ?.....	58
6.1.2	Quelle grandeur dosimétrique ?.....	58
6.1.3	Maîtriser la nature du champ pulsé	59
6.2	Effets biologiques et concepts en radioprotection	60
6.3	Diversité des applications.....	61
6.4	Problématique du mesurage	61
6.5	La formation	63
6.6	Le REX de l'international.....	63
6.7	Le zonage radiologique hors ZO et ZR	63
6.8	La délimitation des zones orange et rouge.....	64
6.9	Méthodologie générale opérationnelle pour la délimitation des zones et la vérification de leurs conformités	65
6.10	Commentaire relatif aux vérifications	68
7	Conclusion générale	68
8	Annexes.....	70
8.1	Annexe 1 – Lettre de mission du GT	70
8.2	Annexe 2 – Références et bibliographie	72

1 Historique et évolution du concept de zonage

La notion de zonage trouve son origine dans la CIPR 1 (Commission internationale de protection radiologique) de 1959 qui pose la délimitation d'une zone contrôlée en fonction de l'exposition susceptible d'être reçue par un travailleur. Il n'y a pas encore de notion de zone surveillée, même si elle existe implicitement en tant que « zone au voisinage des zones contrôlées ».

La Directive CEEA (Communauté européenne de l'énergie atomique) de février 1959 pose la définition de la zone surveillée en tant que lieu à la périphérie de la zone contrôlée où il existe un danger permanent de dépasser la dose maximale admissible pour une personne du public.

Le décret n° 66-450 du 20 juin 1966 introduit dans la réglementation de radioprotection les notions de DATR^[1] et NDATR et reprend en grande partie les concepts et les définitions de la CIPR-1 de 1959.

Le décret n° 67-228 du 15 mars 1967, hors installations nucléaires de base (INB), complète ces dispositions avec l'obligation de délimiter une zone contrôlée autour de la source de rayonnements ionisants dès que les limites prévues pour les NDATR sont susceptibles d'être dépassées. Il met en place le contrôle des expositions (pour les DATR) par une dosimétrie individuelle et, par ailleurs, introduit la notion de « personne compétente ».

Pour les INB, au sein de la zone contrôlée verte, des « zones spécialement réglementées » (jaune, orange et rouge) seront définies avec le décret n° 75-306 du 28 avril 1975.

Pour les installations hors INB, le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 introduit la délimitation de zones spécialement réglementées ou interdites au sein de la zone contrôlée et officialise la notion de zone surveillée. Il apporte des notions majeures avec la définition de catégories de travailleurs (A et B). Il érige la « personne compétente » en « personne compétente en radioprotection », en renforçant ses missions et en la soumettant à une formation obligatoire.

Pris en application de ce décret, l'arrêté du 1er juin 1990 définit les méthodes de contrôle et précise les dispositions en matière de zonage prenant en compte le facteur d'occupation.

Le décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 innove en matière de zonage avec une approche basée sur la dose efficace et la dose équivalente et fixe la nature du suivi dosimétrique individuel en relation avec le zonage établi.

Cependant, il renvoie l'essentiel des dispositions de zonage sur un arrêté du 15 mai 2006 prescriptif. Celui-ci introduit notamment les points novateurs suivants :

- limitation possible de la zone (sauf la zone rouge (ZR)) à une partie du local ou un espace de travail délimité de façon continue visible et permanente ;
- dans les locaux ou aires attenants aux zones surveillées (ZS) et zones contrôlées (ZC), la dose efficace reste inférieure à 80 μ Sv par mois ;
- définition des zones spécialement réglementées ou interdites et de la ZC en termes de dose susceptible d'être reçue en une heure (en termes de dose efficace ou, possiblement, en termes de doses équivalentes aux extrémités) ;

^[1] Directement Affecté à Travaux sous Radiations (DATR) et Non Directement Affecté à Travaux sous Radiations (NDATR)

- prise en compte en sus du débit d'équivalent de dose pour la délimitation des zones orange (ZO) et rouge (ZR) ;
- introduction de la notion de zone intermittente et suppression temporaire ou définitive de délimitation de ZS ou de ZC ;
- pour les appareils mobiles ou portables, la zone contrôlée devient zone d'opération délimitée à sa périphérie ;
- les règles spécifiques du zonage s'appliquent aux transports de substances radioactives au sein de l'établissement ;
- parmi les conditions d'accès aux zones, l'accès en ZO et ZR fait l'objet d'un enregistrement nominatif.

Si l'objet du dispositif de zonage est d'assurer le respect des valeurs limites de doses, dans tous les cas, il s'agit d'alerter sur un danger potentiel et d'imposer un certain comportement face à un niveau de risque ainsi gradué. Sachant que dans un tel contexte, si l'on protège les travailleurs, on protège par là-même les personnes du public.

Encadré par le décret n° 2018-437 du 5 juin 2018 modifié par le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021, le dispositif de zonage actuel se veut simplifié dans son approche, notamment à la suite de la modification, en janvier 2020^[2], de l'arrêté du 15 mai 2006.

Ce nouveau dispositif a été conçu pour redonner tout son sens au zonage en considérant que le respect d'une limite d'exposition attribuée à une délimitation entraîne une signalisation spécifique, laquelle impose une action précise pour les travailleurs et pour l'employeur.

^[2] Arrêté du 28 janvier 2020 relatif modifiant l'arrêté du 15 mai 2006

2 Saisine du GPRP

2.1 Contexte

Jusqu'à juin 2021, conformément au décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants (avant sa modification), les zones délimitées orange et rouge étaient établies et signalées par rapport à deux valeurs, en dose efficace : 100 mSv sur une heure et 100 mSv moyennés sur une seconde.

A ce moment, le dispositif de zonage pouvait être schématisé ainsi :

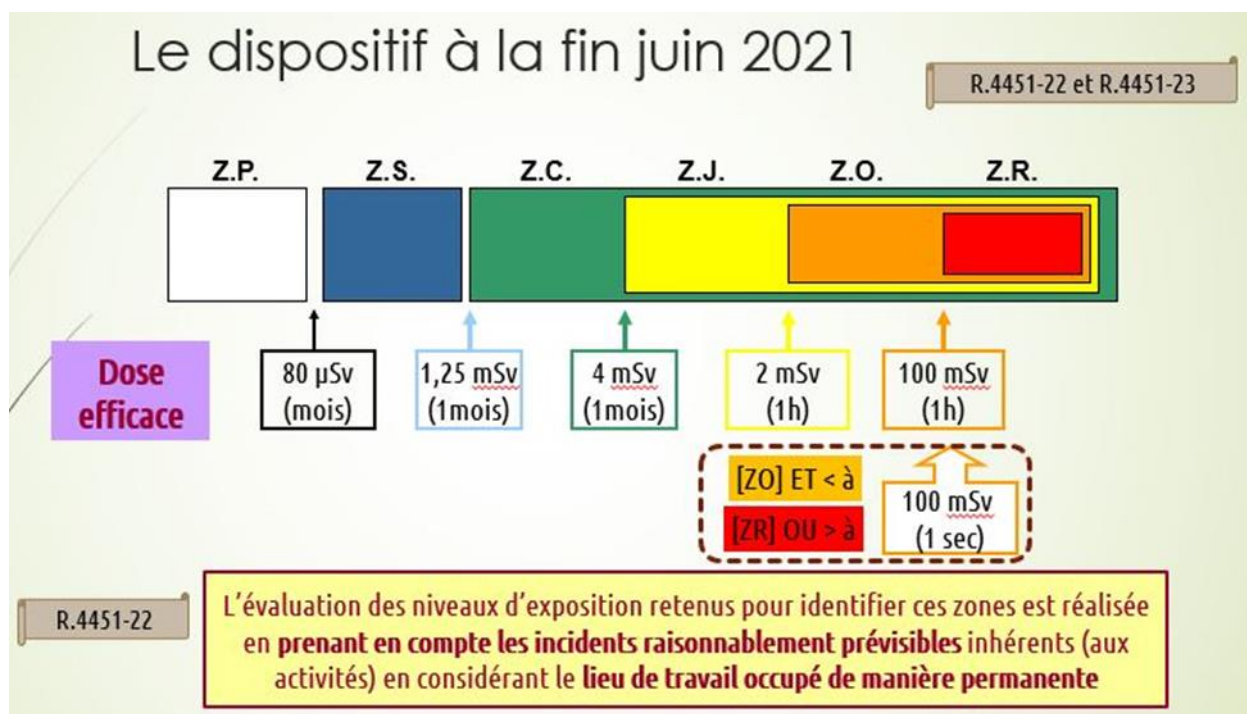


Figure 2 - Schéma du zonage applicable jusqu'en juin 2021

Les difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de ce second critère (100 mSv moyennés sur une seconde), liées à l'identification des appareils concernés, leurs caractéristiques et aux conditions de mesurage (méthodologie, détecteurs) ont rendu cette disposition difficilement applicable malgré l'éclairage apporté par l'avis n° 2019-00161 du 12 juillet 2019 de l'IRSN suite à la saisine conjointe du 1^{er} mars 2019 de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de la Direction générale du travail (DGT).

Ainsi, le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants et non ionisants supprime la valeur moyennée sur une seconde, en énonçant que les modalités de délimitation des zones contrôlées orange et rouge pour les équipements émettant des rayonnements ionisants à champs pulsés seront précisées par arrêté du ministre chargé du travail (article R. 4451-23 du code du travail).

L'ASN et la DGT ont souhaité profiter de la mise en place du GPRP de l'ASN pour lancer une réflexion sur le zonage en champs pulsés et formuler des propositions en vue de combler ce vide juridique.

2.2 Lettre de saisine

Par lettre n° CODEP-2022-018010 du 12 avril 2022, l'ASN et la DGT ont conjointement saisi le Président du GPRP afin qu'une réflexion soit menée sur la révision des valeurs à prendre en compte pour le zonage radiologique des appareils à champs pulsés.

Les experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ont été sollicités par lettre n° CODEP-DIS-026573 du 15 juin 2022 de l'ASN, pour répondre aux questions et sollicitations du GT durant ses travaux.

Dans le cadre de cette saisine, il a été demandé aux experts du GT, au regard de la particularité des rayonnements émis par les appareils à champs pulsés :

- d'établir un panorama des appareils concernés détaillant leurs caractéristiques techniques (nombre de pulses, puissance, durée d'émission, sécurités...);
- d'élaborer une méthodologie générale opérationnelle pour la réalisation des zones délimitées contrôlées ou zones d'opération et, pour ce qui concerne les ZCO et ZCR, de préciser les critères de délimitation et définir les mesurages nécessaires à leur définition.

Ces éléments sont à étayer par des exemples concrets de mise en œuvre de la méthodologie proposée, qui pourront être repris dans le cadre réglementaire.

La lettre de mission du GT est jointe en annexe 1.

2.3 Composition du GT

Le GT est composé de dix experts issus du GPRP et de représentants de plusieurs administrations.

Participants	Fonction	Entité	Domaine
BARBEY Pierre	Vice-président du GPRP Président du GT	Ex-Maître de Conférences de l'Université de Caen Normandie	Recherche et radioprotection
AMMERICH Marc	Expert du GPRP	Ex CEA	radioprotection
AUDIGIE Fabrice	Expert du GPRP	ENVA	vétérinaire
BALDUYCK Sébastien	Expert du GPRP	CHU de Toulouse	médical
CORDELLE Anne	Experte du GPRP	IRSN	expertise radioprotection
DESMULLIEZ Geoffrey	Expert du GPRP	CHU de Lille	médical
HORODYNSKI Jean-Michel	Expert du GPRP	CNRS	recherche
LE DU Jean-François	Expert du GPRP	CNRS	recherche
MARCHAND Carole	Représentante de l'ASND	ASND	radioprotection défense
SOUBIGOU Nicolas	Expert du GPRP	SPRA	radioprotection défense
MICHEL Nicolas	Observateur	DGT	radioprotection
FRADIN Jérôme	Observateur	ASN / DTS	radioprotection
NASSER Marie-Eve	Observatrice	ASN / DIS	radioprotection

TROMPETTE Anne	Observatrice	ASN / DIS	radioprotection
JAUNET Pierrick	Observateur	ASN / DIS	radioprotection
LE DIRACH Bertrand	Secrétariat technique du GT	ASN / DIS	radioprotection

Tableau 1 - Composition du GT

Compte tenu de leur profil, les experts du GT représentent les principaux domaines d'utilisation des rayonnements ionisants concernés par la problématique du zonage en champs pulsés. Ils ont une bonne connaissance des appareils à champs pulsés et de la délimitation des zones et de la signalisation dans leurs secteurs d'activité respectifs.

Le GT est animé par le vice-président du GPRP et son secrétariat technique est assuré par la direction DIS de l'ASN.

Les représentants de la DGT et de l'ASN assistent aux réunions du GT en tant qu'observateurs et éventuellement renseignent les experts sur des travaux parallèles ou antérieurs ainsi que sur certains points de la réglementation.

2.4 Organisation, démarche et méthodes de travail

Compte tenu de l'échéance qui lui a été fixée initialement au 31 décembre 2022, l'organisation et les méthodes de travail du GT ont été fixées dès la première réunion. Un planning de réunions a été établi pour structurer les travaux.

Le GT a retenu de laisser une grande place aux échanges entre ses membres lors des réunions et de procéder par auditions et enquêtes auprès de professionnels travaillant dans le domaine des champs pulsés à différents titres (fabricants, fournisseurs, utilisateurs d'équipements, expertise, mesurage).

Le GT s'est réuni à neuf reprises entre mai 2022 et mars 2023, en veillant à la poursuite des objectifs fixés. Une réunion de relecture/validation finale s'est tenue le 15 mai 2023.

Chaque réunion a fait l'objet d'un ordre du jour et d'un compte rendu pour conserver une trace des échanges et des actions à entreprendre adoptées en séance.

Le GT a décidé d'orienter ses travaux vers 4 axes principaux :

- le panorama des équipements à champs pulsés (caractéristiques techniques, conditions d'utilisation) ;
- la méthodologie de zonage (zones contrôlées, zones d'opération, critère de délimitation) ;
- le mesurage (méthodes, détecteurs) ;
- la relation entre l'émission flash de rayonnements ionisants et les effets radio-induits.

Il a ainsi :

- auditionné l'IRSN/SER/UES, des fabricants d'appareils émettant des rayonnements ionisants (VARIAN, THALES, PMB ALCEN, SMITHS detection) et des utilisateurs (FORMAVETO, experts du GT dans leur domaine respectif) pour réaliser le panorama des équipements à champs pulsés ;
- adressé un questionnaire aux fabricants d'appareils à champs pulsés du domaine médical, par l'intermédiaire du SNITEM ;
- adressé un questionnaire sur le mesurage en champs pulsés aux principaux fabricants et fournisseurs de détecteurs de radioprotection (APVL, BERTIN, BERTHOLD, MIRION, MPE, PTW, SAPHYMO ...) et auditionné des spécialistes de la métrologie (IRSN/SDOS, Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives - CEA) ;

- réalisé une expérimentation sur l'impact de la prise en compte d'un débit de dose moyenné sur une seconde sur le zonage en secteur médical ;
- visité une installation où sont émis des champs pulsés (laser de puissance APOLLON du laboratoire LULI à Saclay) ;
- enquêté auprès des états membres de l'association HERCA (*Heads of Radiation Protection Authorities*) et d'autres pays du monde, afin de disposer de l'expérience à l'international ;
- auditionné des chercheurs de l'IRSN/SERAMED sur les effets biologiques radio-induits d'une émission flash de rayonnements ionisants.

Ces investigations ont permis au GT de disposer d'informations sur lesquelles s'appuyer pour conduire sa réflexion. La visite sur le terrain d'une installation très spécifique a également permis de concrétiser l'application de dispositions de radioprotection qui ont inspiré la démarche du GT sur un des aspects de la méthodologie de zonage qu'il propose.

A noter que l'enquête à l'international n'a pas été concluante, dans le sens où la méthodologie de zonage en champs pulsés ne semble pas être une préoccupation pour la plupart des pays interrogés et ne fait pas l'objet de dispositions particulières.

3 Éléments préliminaires

3.1 Définition des « champs pulsés »

3.1.1 Recherche bibliographique

De manière générale, un "champ pulsé" correspond à une émission de rayonnements ionisants de courte durée, par opposition à une émission en continu.

Actuellement, il n'y a pas de définition dans la réglementation française permettant de caractériser ce type d'émission - une recherche bibliographique a été réalisée afin de permettre au GT de proposer une telle définition. Les éléments d'intérêt issus de divers documents français (guides, rapport, etc.) et d'un document ISO ont été regroupés dans les paragraphes suivants.

3.1.1.1 Spécification technique ISO/TS 18090-1 de 2015

Ce document est intitulé « *Radioprotection - Caractéristiques des champs de rayonnement pulsés de référence* ». Il s'agit d'une spécification technique et non d'une norme, car elle contient des informations « pour lesquelles une expérience à l'échelle mondiale n'était pas disponible au moment de son élaboration ».

Les champs de rayonnements évoqués ici ont une durée d'impulsion comprise entre 0,1 ms et 10 s (ce qui couvrirait toute la gamme utilisée dans le domaine médical en 2015).

Un rayonnement pulsé y est défini comme « *un rayonnement ionisant qui n'a jamais un débit de dose constant en un point donné de l'espace pendant des intervalles de temps supérieurs à 10 secondes* ». Un rayonnement continu est ainsi défini comme « *un rayonnement ionisant ayant un débit de dose constant en un point donnée de l'espace pendant des intervalles de temps supérieurs à 10 secondes* ».

3.1.1.2 Documents IRSN

Le guide pratique IRSN de 2015 intitulé « *Réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants* » considère une durée d'émission inférieure à une dizaine de secondes pour les sources pulsées de rayonnements ionisants (ou associées à des temps d'exposition très courts), et ce en raison de la durée de stabilisation des appareils de mesure en mode « débit », de l'ordre de la dizaine de secondes.

Le rapport IRSN n° 2011-009 intitulé « *Évaluation du débit d'équivalent de dose en champs pulsés* », réalisé en réponse à une saisine de l'ASN concernant une méthode de calcul des valeurs de dose de référence réglementaires dans les champs de rayonnements pulsés, précise que « *tout champ de rayonnement dont la durée d'émission est forfaitairement inférieure ou égale à 10 secondes, que cette émission soit unique ou répétée dans le temps, est un champ pulsé* ».

3.1.1.3 Autres documents

La norme 74-100 de 1981 intitulée « *Appareils de radiologie - Construction et essais - Règles* » aborde la notion de « régime intermittent », mais sans préciser de durée associée : « *pour un groupe radiogène, mode de charge d'un tube radiogène dans lequel l'énergie électrique est fournie au tube en charges uniques, intermittentes ou pulsées, comme, par exemple, en radiographie, en radiocinématographie.* »

A noter par ailleurs une difficulté équivalente dans d'autres domaines pour la définition du caractère pulsé d'une émission. Par exemple, dans le domaine des émissions radioélectriques, selon une étude belge sur le caractère pulsé des rayonnements émis par les systèmes de télécommunication sans fil^[3]: « *Le critère définissant une émission radioélectrique pulsée serait le suivant : Émission radioélectrique, qui en fonctionnement normal, subit de manière permanente ou intermittente, des interruptions récurrentes. Est considérée comme une interruption un intervalle de temps de minimum 10 000 périodes des porteuses durant lequel l'immission^[4] (exprimée par la densité de puissance en W/m²) subit une chute de 90 %.* »

Recommandation du GT

Le GT constate que le critère de 10 secondes, en tant que durée maximale d'émission à débit constant à considérer pour définir un champ pulsé, fait l'objet d'un consensus dans les différents documents consultés.

Le GT considère que ce critère est satisfaisant, dans le sens où il est basé sur les capacités techniques des appareils de mesure actuels.

Le GT propose ainsi la définition suivante pour caractériser une émission en champ pulsé : « un rayonnement ionisant émis par un équipement de travail, ayant un débit d'équivalent de dose variable (pulse ou modulation) pendant des intervalles de temps inférieurs à 10 secondes. »

^[3] Rapport de l'institut scientifique de service public Rapport n° 172/2012 Etude du caractère pulsé des rayonnements émis par les systèmes de télécommunication sans fil [RP1-RAP-12-00172-WPI-janv \(issep.be\)](https://www.issep.be/fr/rapports-et-etudes/172-2012-etude-du-caractere-pulse-des-rayonnements-emis-par-les-systemes-de-telecommunication-sans-fil)

^[4] Terme employé notamment en Suisse et en Belgique, pour distinguer l'« émission » de polluants au sortir des installations de l'« immission » au lieu de leur effet

3.1.2 Exemples de « champs pulsés »

Il peut s'agir d'une émission avec une impulsion unique (à gauche sur le schéma ci-après) ou un train d'impulsions (à droite).

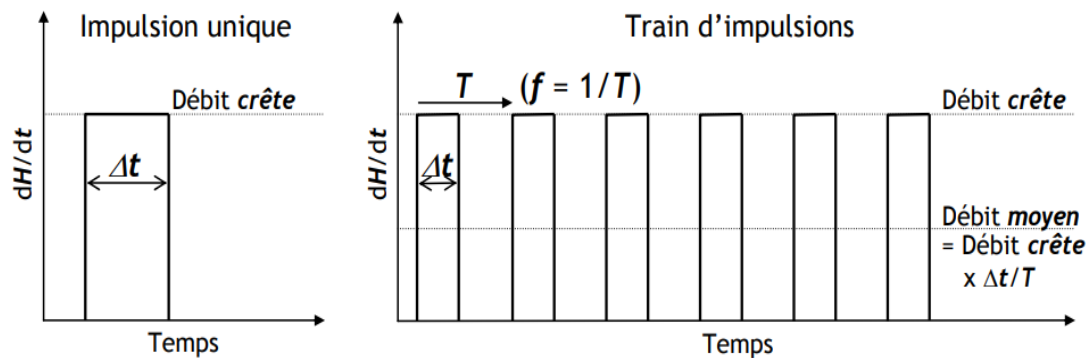


Figure 3 - Exemples d'impulsions

Il peut également s'agir d'une émission avec un champ modulé, notamment dans le secteur médical.

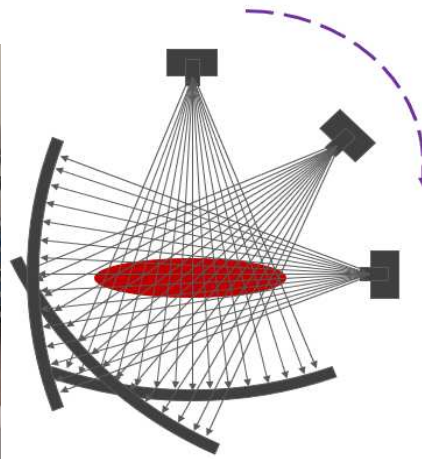
Par exemple, dans le cas de la scanographie, les rayonnements diffusés par le patient sont modulés dans le temps par plusieurs facteurs :

- le tube radiogène tournant autour du patient pour obtenir une image en coupe (cf. figure 4a), le rayonnement reçu par l'opérateur (en un point fixe) varie donc dans le temps en fonction de l'angle formé par le chemin des rayons (tube-patient-opérateur, modulation par effet Compton) ;
- l'épaisseur du patient est plus importante quand le tube est de profil que de face, ce qui entraîne également une variation de la quantité de rayonnements diffusés (modulation morphologique, cf. figure 4b) ;
- le lit se déplace dans le tube pour que chaque coupe soit faite à un endroit différent. Or la composition du patient varie en fonction des organes traversés (moins dense pour le poumon, plus dense pour l'os, entre les deux pour les tissus mous tels que l'estomac ou le foie). Cela va changer les interactions entre les rayons X et le patient, donc la quantité de rayonnement reçu par l'opérateur (modulation d'interaction, cf. figure 4c) ;
- afin de prendre en compte ces variations dans la composition du patient explicitée ci-dessus, on peut choisir de moduler l'intensité du rayonnement, ce qui va influencer directement sur le diffusé (modulation d'intensité, cf. figure 4d) ;
- enfin, pour protéger certains organes périphériques ou l'opérateur, on peut décider de ne pas émettre de rayonnements vers le patient selon certains angles, apportant ainsi une modulation supplémentaire au rayonnement diffusé (modulation par obturation, cf. figure 4e).

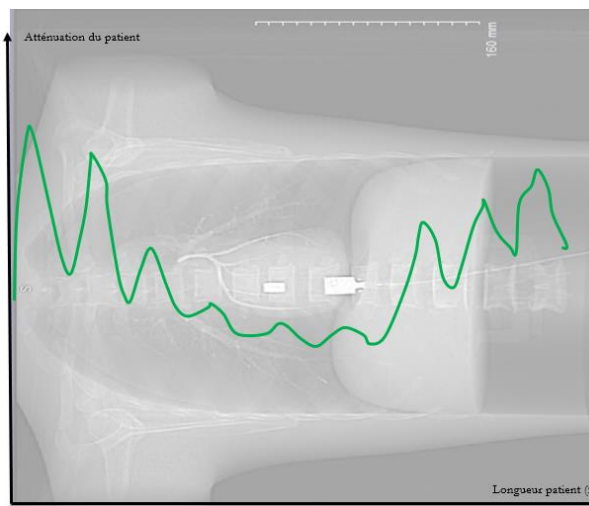
Le rayonnement reçu par le travailleur est donc une convolution de ces différentes modulations, ce qui va entraîner le passage de débits instantanés très faibles (moins de $1 \mu\text{Sv/h}$) à des débits beaucoup plus élevés (supérieurs à 1mSv/h), et ce en moins d'une seconde.

La variation résultante est difficilement prévisible par le calcul et ne suit aucune équation analytique.

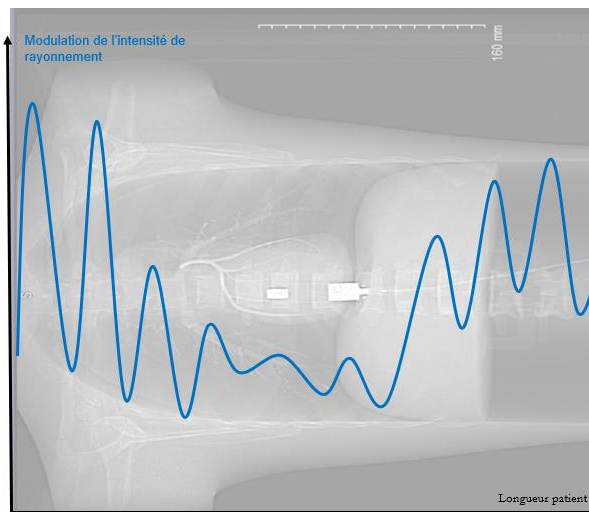
Figure 4 Rayonnements modulés primaire et diffusé (pour l'opérateur) pendant un scanner



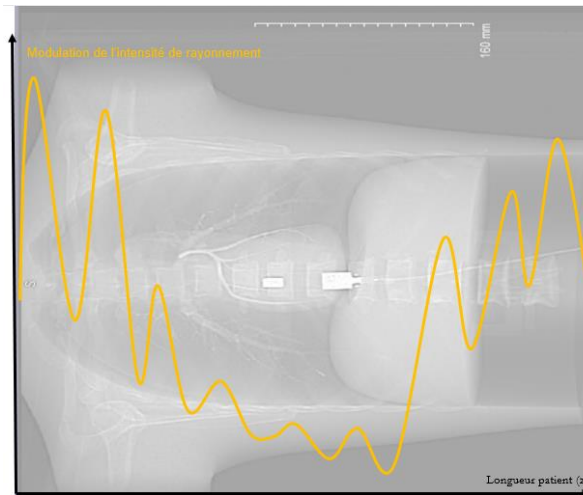
Figures 4a -Rotation du tube



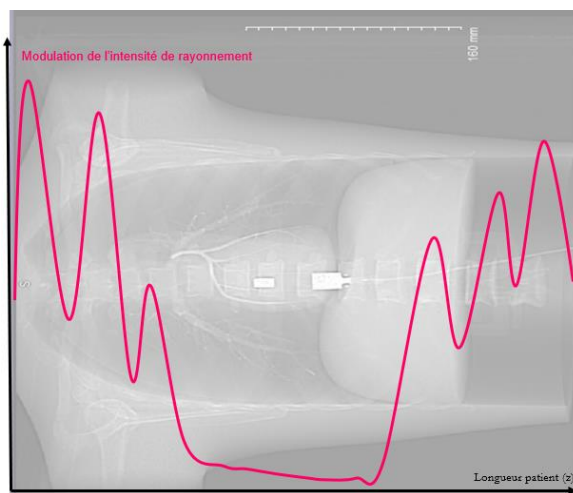
Figures 4b -Modulation due à la morphologie du patient convoluée à la rotation du tube, mesurée à la peau du patient



Figures 4c -Modulation résultante en ajoutant les interactions

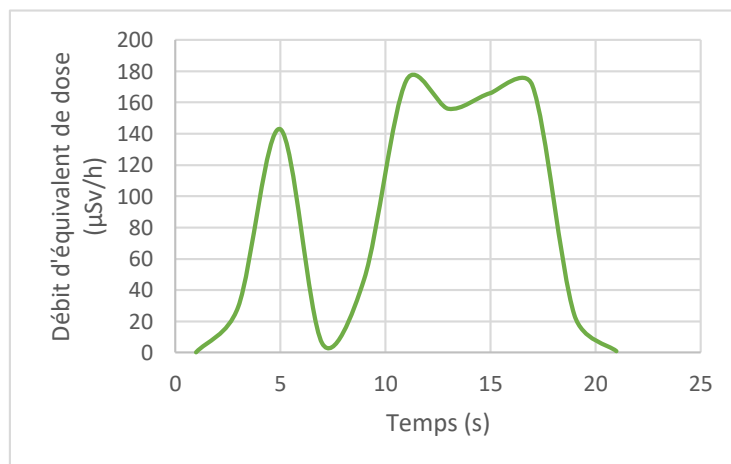


Figures 4d -Modulation obtenue en ajoutant les variations d'intensité du tube



Figures 4e -Modulation obtenue en ajoutant l'obturation

On retrouve la plupart de ces modulations dans tous les systèmes tomographiques comme le scanographe, mais aussi le *cone-beam* utilisé dans le secteur dentaire.



Figures 4f -Cone beam dentaire et exemple de mesure du diffusé en un point fixe à 80 cm du patient

3.1.3 Paramètres caractérisant ces émissions

Les paramètres suivants (intrinsèques à la machine) sont utilisés pour caractériser une émission en champ pulsé :

- Le type d'impulsion (impulsion unique, train d'impulsions, champ modulé) ;
- La durée totale de l'émission ;
- La durée/largeur des impulsions (Δt) ;
- La dose maximale par impulsion ;
- Les débits de dose crête (dH/dt) et débit de dose minimum ;
- La fréquence de répétition (f) dans une séquence d'émissions (cadence/période T) ;
- Les temps de montée et descente d'une impulsion, les pulses ayant, en réalité, une forme se rapprochant plus de celle d'un trapèze (cf. schéma ci-après) ;
- Les capacités intrinsèques de la machine (nombre maximal de pulses par heure...) ;
- Les éléments de verrouillage éventuellement installés par le fabricant.

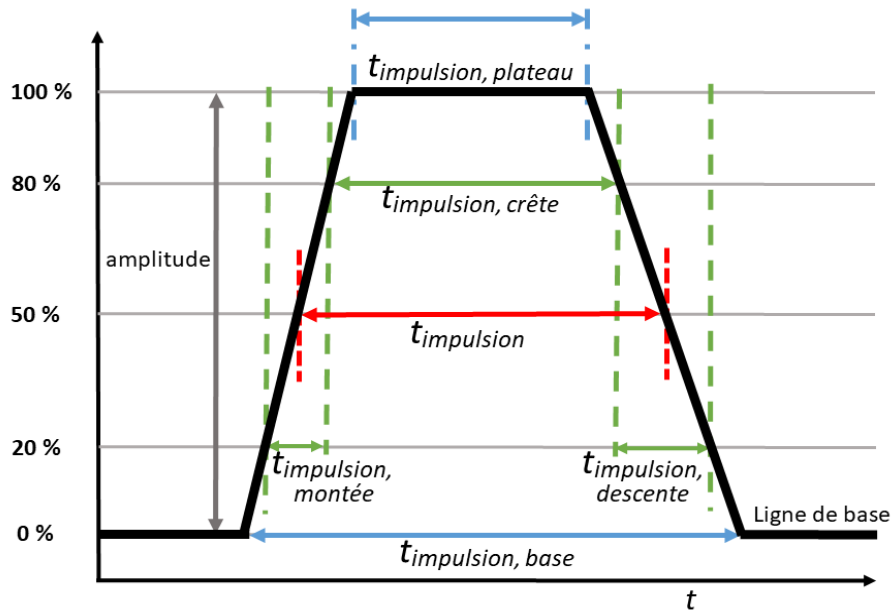


Figure 5 - Impulsion de rayonnement trapézoïdale équivalente avec les paramètres pertinents (cf. ISO/TS 18090-1:2015)

3.1.4 A quel moment la durée des pulses peut-elle poser problème ?

Les variations temporelles du débit de dose issues d'un appareil à champs pulsés peuvent, en fonction de la valeur des paramètres précités (cf. § 3.1.3.), rendre difficile, voire impossible la mesure correcte d'un débit d'équivalent de dose ambiant à l'aide d'appareils électroniques de mesure.

Cette problématique se pose également pour la dosimétrie opérationnelle (mesure d'équivalent de dose personnelle).

De manière générale, plus la durée d'impulsion est courte et plus la détection devient difficile, avec une dose le plus souvent sous-estimée.

3.2 Effets biologiques associés à un champ pulsé

A ce jour, les effets biologiques associés à des émissions en champ pulsé ont essentiellement été étudiés dans le cadre des avancées médicales actuelles, pour comparer les effets de la thérapie flash avec la thérapie conventionnelle.

3.2.1 Généralités sur les interactions rayonnements - le vivant

Les phénomènes biologiques mis en œuvre durant une irradiation peuvent être scindés en deux phases :

- une phase d'induction, pendant laquelle des réactions chimiques sont mises en œuvre et qui ont lieu sur des temps très courts (de l'ordre de la nanoseconde) ;
- une phase d'intégration, qui consiste en la réaction du vivant suite à cette perturbation - la temporalité de cette réaction - qui emprunte une réponse génomique - est au-delà de la minute.

Ces phénomènes sont largement influencés par les caractéristiques de l'émission : le type de rayonnement, le débit de dose, l'énergie du rayonnement.

La probabilité d'occurrence d'anomalies, telle que par exemple une aberration chromosomique est liée au type de particule selon leur Transfert Linéique d'Énergie (TEL) et à la l'intensité du rayonnement (le débit de dose), ces deux paramètres augmentant la probabilité spatiale d'initiation de cette anomalie.

Cependant, il semblerait que pour des impulsions très brèves les phénomènes biologiques n'entrent plus en jeu et que l'augmentation du débit de dose n'ait plus les mêmes conséquences.

3.2.2 Principe de la thérapie flash

La radiothérapie conventionnelle est un des moyens utilisés pour le traitement des cancers. Un tel traitement est dispensé à environ 60 à 70 % des patients touchés par cette maladie^[5]. La dose délivrée lors de la radiothérapie conventionnelle, de quelques Gy à quelques dizaines de Gy, est limitée par les conséquences sur les tissus sains aux alentours de la tumeur. Les irradiations sont fractionnées sur plusieurs semaines, afin de limiter au maximum les effets déterministes sur les cellules saines.

La radiothérapie flash est une nouvelle modalité de radiothérapie. Les doses sont délivrées dans un temps très court, de l'ordre de quelques millisecondes, plutôt que de l'ordre de quelques minutes en radiothérapie conventionnelle. La durée d'un pulse est identique pour les deux techniques (de l'ordre de la microseconde), mais la dose délivrée par pulse est beaucoup plus importante dans le cas de la thérapie flash.

Cette nouvelle méthode de traitement permet a priori une meilleure protection des tissus sains, tout en préservant l'efficacité thérapeutique au niveau des tumeurs.

^[5] Feng Gao. First demonstration of the flash effect with ultrahigh dose rate high-energy X-rays. *Radiotherapy and Oncology* 166 (2022) 44-50.

3.2.3 Définition de l'effet flash

Comme dit précédemment, l'effet « flash » est caractérisé par une limitation de l'effet délétère de l'irradiation sur les cellules saines, tout en gardant un effet identique ou quasi-identique sur les cellules tumorales (cf. figure 6).

L'effet flash a été confirmé par différents instituts, et ce pour différents types de rayonnements (e-, protons, gamma, X)^[6].

Des études réalisées sur les tissus sains ont montré une diminution des dommages à l'ADN, une diminution de l'apoptose, des fibroses et de l'inflammation.

Malheureusement, à ce jour, aucune des hypothèses proposées sur les mécanismes n'a encore été validée.

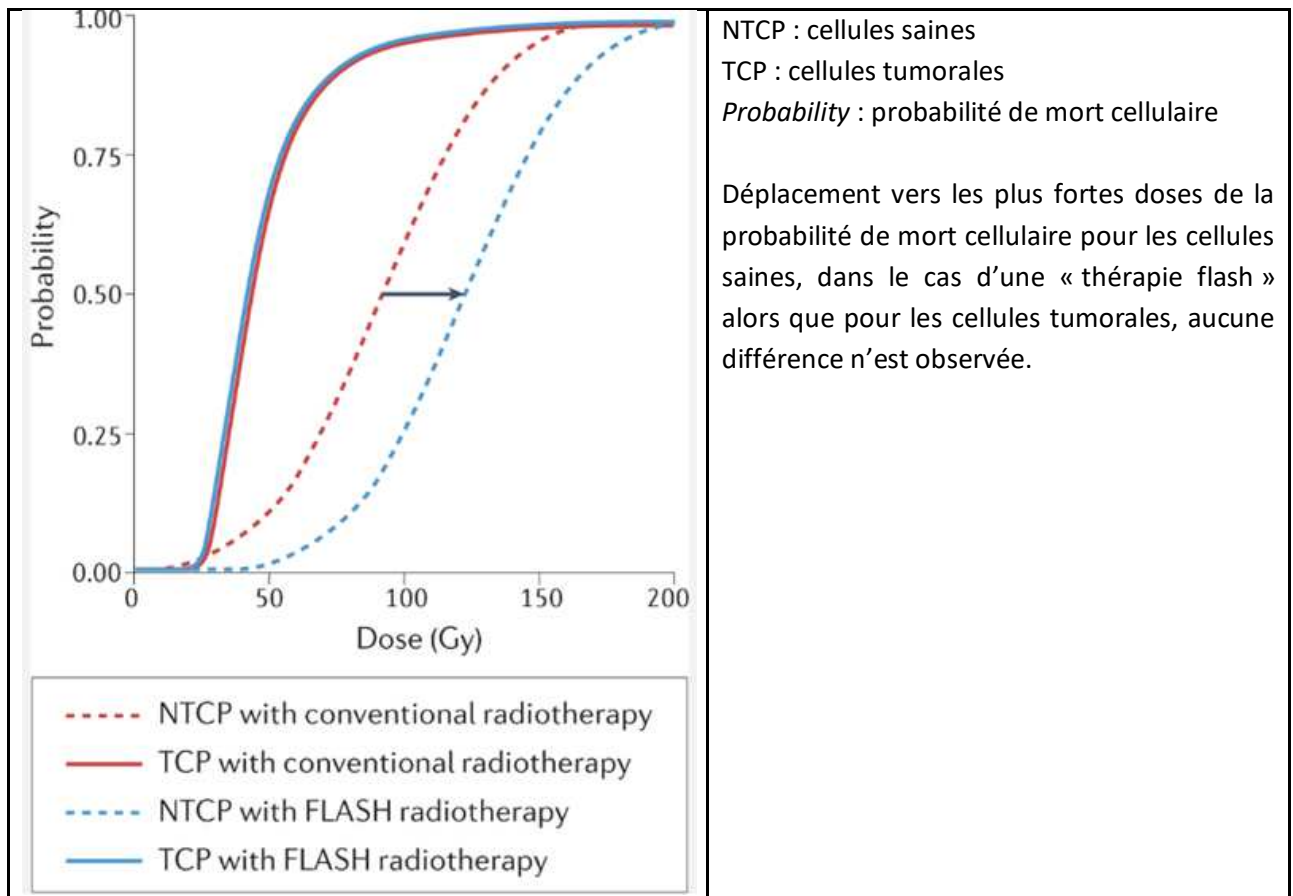


Figure 6 - Effet flash

^[6] Till Tobias Böhlen. Normal tissue sparing by flash as a function of single fraction dose : a quantitative analysis. international journal of radiation oncology-biology, physics. may 24, 2022.

3.2.3.1 Validation expérimentale

Des études ont toutefois permis de valider expérimentalement l'effet flash, en comparant les effets obtenus lors d'un traitement en thérapie conventionnelle et en thérapie flash (exemple de l'étude de Feng Gao citée au § 3.2.2).

Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure ci-après.

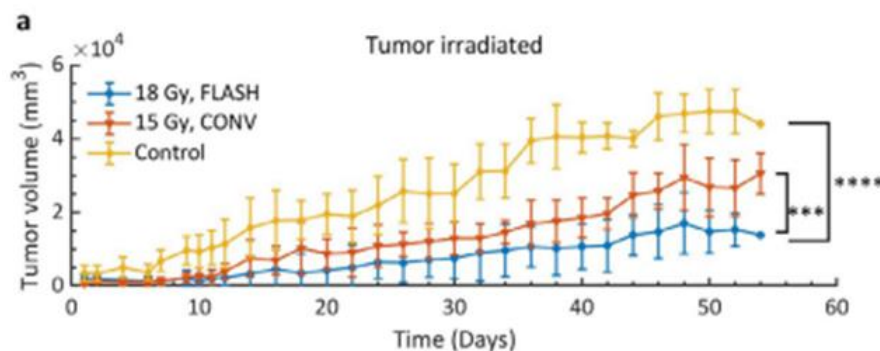


Figure 7 - Comparaison de l'effet flash à la radiothérapie conventionnelle

Il a été également observé que le risque de mortalité chez la souris diminuait de façon significative, entre une thérapie classique et une thérapie flash.

Cependant, il faut aussi prendre en compte la radiosensibilité des organes exposés qui, au-delà d'un certain seuil, conduit à un fort pourcentage de létalité quel que soit le type de thérapie. On peut citer le cas des tissus de l'abdomen, pour lesquels la dose létale (50 Gy) est très inférieure à celles des poumons.

Il faudra par ailleurs porter une attention particulière aux conditions opératoires mises en œuvre avec les différentes machines utilisées pour comparer les thérapies.

3.2.4 Mécanismes proposés

A l'heure actuelle, plusieurs hypothèses ont été avancées pour tenter d'expliquer l'effet flash : les phénomènes de diminution de l'oxygène, de recombinaison radicalaire, la « non peroxydation » des lipides de la membrane cellulaire et la variation de la réponse immunitaire de la cellule.

3.2.4.1 Rôle de l'oxygène : Radicaux libres de type ROO*

Les cellules saines exposées à un débit de dose très élevé durant un temps très court sont dépourvues en oxygène (temps de diffusion trop long), ce qui peut entraîner une meilleure résistance à l'irradiation.

En effet les radicaux libres générés par la radiolyse, combinés à la présence d'oxygène, conduisent à la formation de radicaux libres oxygénés. Ces espèces, très oxydantes, entraînent des destructions cellulaires.

Pour les cellules tumorales, l'irrigation est plus importante que pour les cellules saines - le taux en oxygène diminue de façon moins significative. Les espèces radicalaires oxygénées étant toujours produites et

favorisant la destruction des cellules tumorales, elles sont donc touchées de la même façon en thérapie conventionnelle et en thérapie flash^[7].

3.2.4.2 Recombinaison radicalaire

La recombinaison radicalaire peut également contribuer à la diminution de l'effet à fort débit de dose, car les concentrations en espèces radicalaires augmentent et conduisent à plus de recombinaisons.

Les lipides peroxydés sont responsables indirectement de la mort cellulaire. Il était établi que les phénomènes d'oxydation des lipides dans la cellule diminuaient avec le débit de dose, avec pour hypothèse une recombinaison radicalaire plus importante quand le débit de dose augmentait.

Mais une étude récente^[8] a mis en évidence que l'oxydation des lipides chutait brutalement dès lors que la dose délivrée par pulse était supérieure à 0,2 Gy. Une telle inhibition de la peroxydation des lipides est donc susceptible de limiter la mort cellulaire.

Cependant la différence entre les cellules saines et les cellules tumorales ne peut pas s'expliquer par ce phénomène. Par contre, la différence de réactivité peut être due au fait que les cellules tumorales ne sont pas sensibles à la peroxydation des lipides, car l'augmentation de la quantité de Fe²⁺ intracellulaire due au caractère tumoral conduit à une augmentation de la mort cellulaire par ferroptose (augmentation de la réaction de Fenton catalysée par Fe²⁺). Ce point reste à prouver expérimentalement.

3.2.4.3 Réponse immunitaire fonction du taux d'oxygène

La réponse immunitaire pourrait elle aussi être fonction du taux d'oxygène présent dans les cellules. De plus, le temps de réponse du système immunitaire est supérieur à la durée d'irradiation dans le cas de la thérapie flash. Ceci a pour conséquence l'absence des espèces immunitaires au moment de l'irradiation.

En cas de radiothérapie classique, l'irradiation est répétée durant quelques minutes les espèces présentes envoyées par le système immunitaire subissent alors les effets de l'irradiation. Elles sont alors moins efficaces, d'où un effet délétère additionnel.

3.2.4.4 Quelle incidence possible sur le système de radioprotection ?

Les effets décrits au travers de la radiothérapie flash font actuellement débat. Cependant, globalement et comparativement avec la radiothérapie conventionnelle, les données issues de la littérature soulignent plutôt un effet bénéfique pour ce qui concerne la protection des tissus sains périphériques alors que le contrôle de la progression tumorale serait similaire.

Alors que la dose totale délivrée reste du même ordre de grandeur dans les deux types de traitements thérapeutiques, la grande distinction porte sur le débit de dose qui est au moins de trois ordres de grandeurs supérieur pour la radiothérapie flash.

^[7] Guangming Zhou. Mechanisms underlying FLASH radiotherapy, a novel way to enlarge the differential responses to ionizing radiation between normal and tumor tissues. *Radiation Medicine and Protection* 1 (2020) 35–40.

^[8] Pascal Foidevaux et al. Flash irradiation does not induce lipid peroxidation in lipids micelles and liposomes, *radiation physics and chemistry* 205 (2023) 110733.

En première approche, cela pourrait paraître paradoxal et aller à l'encontre des notions acquises en matière d'effets biologiques des rayonnements ionisants, lesquelles suggèrent que - à dose égale - les effets néfastes radio-induits seraient moindres si la dose est délivrée avec un débit de dose plus faible (dose aiguë vs dose chronique).

Cette question est traitée dans le système de radioprotection par le biais du DDREF (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor) ou facteur de réduction pour estimer l'effet des rayonnements délivrés à faibles doses et faibles débits de dose. Depuis la CIPR-60 (1990), un DDREF égal à 2 est retenu et maintenu avec la CIPR-103 (2007), même si, aujourd'hui, certains auteurs en contestent le bien-fondé.

Tout parallélisme ou transposition avec ce qui vient d'être décrit dans le contexte de la radiothérapie flash serait sans doute hasardeux, voire erroné et ceci pour plusieurs raisons, en premier lieu parce que les débits de dose ne sont pas du tout du même ordre de grandeur.

Pour la CIPR, la prise en compte du DDREF s'entend pour des doses absorbées $< 0,2$ Gy et des débits de dose $< 0,1$ Gy/h, alors qu'en radiothérapie flash les doses sont en dizaines de Gy et les débits de dose voisins de 100 Gy/s.

De plus les mécanismes biologiques qui sous-tendent les effets décrits seraient bien distincts en raison de leur temporalité : mécanismes de réparations moléculaires impliquant la voie génomique qui justifieraient la prise en compte du facteur de réduction DDREF versus mécanismes biophysiques (action radicalaire et recombinaisons, effet oxygène...) dans l'effet flash.

Pour autant, en se plaçant du point de vue de l'exposition des travailleurs (retenant des doses potentielles de 3 ordres de grandeur plus faibles dans le diffusé par rapport au faisceau direct), le domaine d'exposition est alors celui des « faibles doses » considérées par la CIPR pour l'application du DDREF. Dès lors, quid de l'influence de débits de dose associés qui demeurent élevés (de l'ordre de 0,1 Gy/s en regard du critère de 0,1 Gy/h de la CIPR) ?

Il n'existe pas pour l'heure de réponse mais un début d'hypothèse.

Or, compte tenu de l'apparition accélérée d'équipements de travail émettant des rayonnements ionisants de façon très intense sur des temps extrêmement courts, il est essentiel que la recherche en radiobiologie explore cette question et que les répercussions possibles sur le système de radioprotection soient traitées par les instances concernées.

Recommandation du GT

Le GT constate l'apparition accélérée d'équipements de travail émettant des rayonnements ionisants de façon très intense et très brève.

Le GT recommande que la recherche en radiobiologie explore la question des effets biologiques associés aux champs pulsés, et que les répercussions possibles sur le système de radioprotection soient traitées par les instances concernées.

4 Panorama des équipements

4.1 Domaines médical et vétérinaire

L'émission de champs pulsés est utilisée dans tous les domaines du secteur médical, afin de garantir une image nette malgré les mouvements internes du patient (battements du cœur, mouvement des poumons, etc..) ou encore pour réduire l'exposition aux rayonnements. Les temps d'exposition peuvent varier de l'ordre de quelques microsecondes à plusieurs secondes, voire plusieurs minutes selon les modalités.

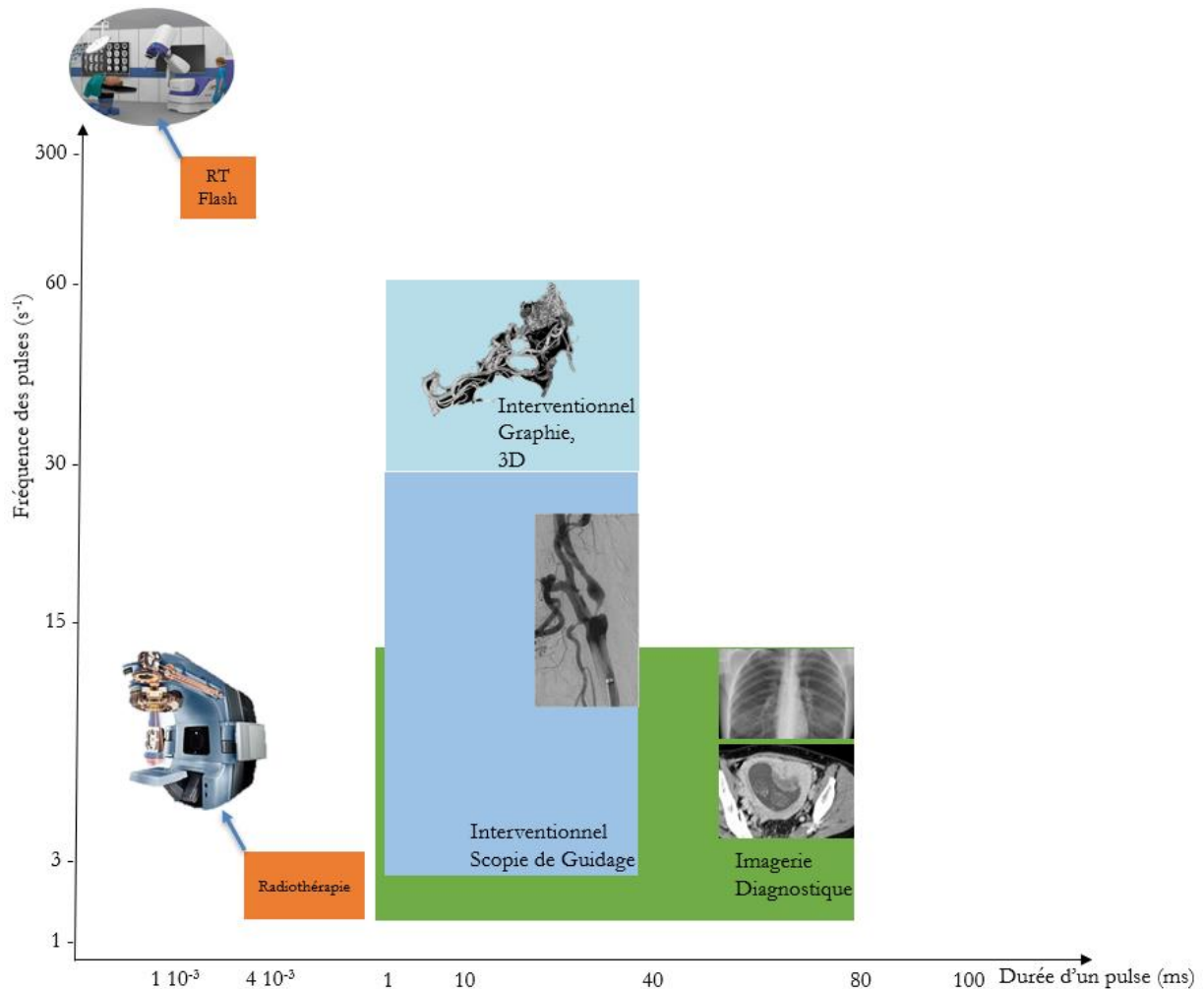
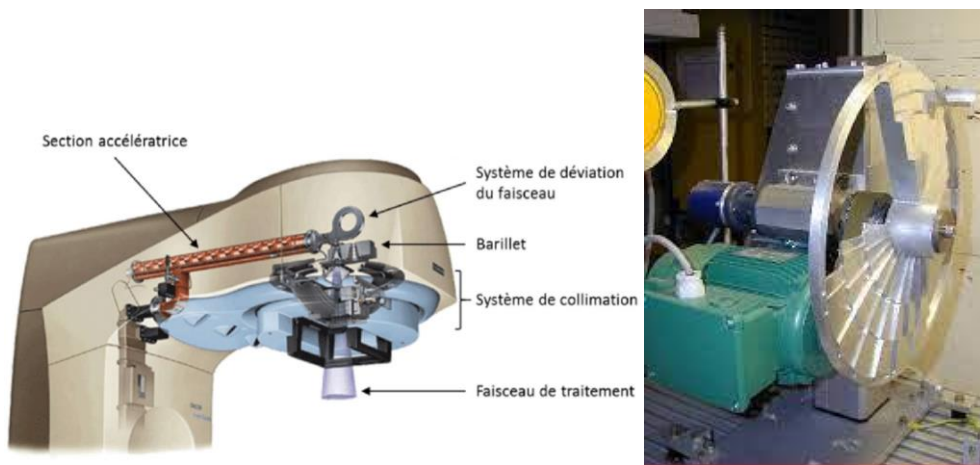


Figure 8 - Plages d'utilisation des rayonnements pulsés dans le secteur médical

En radiothérapie externe, l'irradiation peut être impulsionnelle avec l'utilisation d'un accélérateur de particules et/ou modulée.



Figures 9 - Schéma de fonctionnement d'un accélérateur médical (rayons X) et exemple de modulateur (protonthérapie)

Les pulses d'émissions sont de l'ordre de quelques microsecondes.

Il est également à noter l'utilisation grandissante de la radiothérapie flash. Les effets biologiques liés à l'utilisation de cette technique innovante font l'objet d'un chapitre spécifique (cf. § 3.2.2).

Dans le domaine de l'imagerie planaire conventionnelle (radiographie), les temps d'émission sont compris entre quelques millisecondes et 250 millisecondes.

Avec l'utilisation des capteurs numériques, les temps d'exposition sont réduits et désormais de l'ordre de quelques millisecondes.



Figure 10 - Appareil de radiologie mobile

Protocole	Moyenne des kV_P	Moyenne de l'intensité du courant (mA)	Moyenne des temps d'exposition (ms)	Temps minimal d'exposition (ms)
Poumon AP	85,00	182,41	7,33	2

Tableau 2 - Exemple de paramètres d'exposition pour des radiographies du poumon

Dans le domaine de la radiographie panoramique dentaire, les temps d'émission sont généralement compris entre 6 et 15 secondes.



Figure 11 - CBCT et console

Dans le domaine de l'imagerie volumique (scanographie et CBCT (*Cone Beam Computed Tomography*)), les temps d'émissions sont compris entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes. Cependant, afin d'optimiser l'exposition, le champ d'irradiation n'est pas continu et oscille/est modulé suivant les différents organes irradiés lors de l'exposition du patient (cf. figures 4a à 4e).

Dans le domaine de l'imagerie interventionnelle, utilisée à des fins de guidage pendant des interventions, la durée totale de l'exposition peut varier entre quelques secondes et plusieurs heures. A des fins d'optimisation, les champs sont maintenant le plus souvent pulsés. Les arceaux mobiles utilisés dans les blocs opératoires peuvent encore fonctionner en champ continu.



Figure 12 - Utilisation des rayons X en chirurgie, à gauche le détecteur et au centre l'image produite (le tube RX est placé sous le patient)

Mode	Moyenne des kV _p	Durée du pulse maximale (ms)	Durée du pulse minimale (ms)	Moyenne de l'intensité du courant (mA)	Nombre maximal de séquences par seconde	Nombre minimal de séquences par seconde
Scopie Continue	83,20	-	-	3,90	-	-
Scopie Pulsée	81,56	8	33,5	4,15	15	4
Total général	82,11			4,07	15	4

Tableau 3 - Extraction des paramètres de scopie pulsée ou continue d'un arceau

En mode pulsé, le paramétrage est de 15 images par seconde, avec des durées de pulses de 4 à 33,5 millisecondes.

Pour ce qui concerne les installations fixes utilisées en cardiologie ou en radiologie interventionnelle, les rayonnements sont presque uniquement émis en mode pulsé.

Les durées de pulses peuvent varier de quelques millisecondes à 500 millisecondes selon les organes ciblés et leur fréquence varie de 1 à 25 pulses par seconde.



Figure 13 – Installation de radiologie interventionnelle

Mode	Moyenne des kV _P	Durée du pulse maximale (ms)	Durée du pulse minimale (ms)	Moyenne de l'intensité du courant (mA)	Nombre maximal de séquences par seconde	Nombre minimal de séquences par seconde
Scopie	93,99	7,46	2,9	183,13	15	7,5
Graphie	81,23	10,78	3,2	773,27	30	7,5
Total général	77,76			295,38	30	

Tableau 4 - Exemple d'extraction de données pour une salle de coronarographie

Mode	Moyenne des kV _P	Durée du pulse maximale (ms)	Durée du pulse minimale (ms)	Moyenne de l'intensité du courant (mA)	Nombre maximal de séquences par seconde	Nombre minimal de séquences par seconde
Scopie	78,30	7,2	2	78,58	15	7,5
Graphie 3D	88,36	9,1	6,8	206,66	30	30
Graphie	74,12	220	2,9	247,17	15	1
Total général	77,76			182,41	2	1

Tableau 5 - Exemple d'extraction de données pour une salle de neuroradiologie

Il est à noter que la durée des pulses est rarement affichée sur les consoles de traitement. Sur l'exemple d'affichage présenté ci-dessous, le nombre et la durée des pulses sont bien indiqués pour les séquences de graphie (« Dynamic » : 15 pulses par seconde et 5 ms).

En revanche, pour la scopie pulsée, seul le nombre de pulses par seconde est indiqué (« Scopie » : 7,5 images par seconde).

Dynamic	
Détail	Bas
i/s	15.0
kV	71
mA	27.3
ms	5
Scopie	
Détail	Bas
i/s	7.5
kV	68
mA	6.3
Temps total	0:08:21
Dose d'exposition	
Durée Rx	0:08:52
mGy	198

Figure 14 - Exemple d'affichage sur console en temps réel

Ainsi, la grande majorité des utilisations dans le domaine médical font intervenir des rayonnements pulsés, tels que définis dans le paragraphe 4.1.

Seuls les rayonnements en radioscopie continue sont émis avec une durée supérieure à 10 secondes (domaine de la radiologie interventionnelle), situation de plus en plus rare aujourd'hui.

Par ailleurs, les domaines du panoramique et le CBCT en dentaire échappent à la définition du pulsé, tel que précisé précédemment.

Pour ce qui concerne le secteur vétérinaire, celui-ci se rapproche du secteur médical, aussi bien en termes d'utilisation des rayonnements pulsés que du matériel utilisé, qui est bien souvent identique.

Les principales différences portent sur les volumes diffuseurs, plus variables dans le secteur vétérinaire (liés à la taille de l'animal), ainsi que la position des opérateurs (qui doivent le plus souvent rester en salle d'examen pour l'acquisition des images et/ou la contention de l'animal) et la présence plus fréquente de personnes extérieures à l'établissement.



Figure 15 - Scanner de la tête d'un cheval. Le cheval est debout tranquilisé par voie intra-veineuse pour le placement dans la machine et l'acquisition des images

4.2 Domaines de l'industrie et de la défense

4.2.1 Radiographie éclair

4.2.1.1 Définition et principe de fonctionnement

La radiographie éclair est utilisée pour étudier les phénomènes physiques ultra-rapides dans des matériaux denses. Le suivi de ces phénomènes nécessite en effet une émission intense et brève de rayons X.

Les domaines dans lesquels la radiographie éclair est utilisée sont par exemple la balistique, la détonique, les phénomènes de combustion comme les moteurs cryogéniques lanceurs de fusée, les atomisations de spray, les injections de carburant.

Cette technique permet^[9] :

- l'observation des ondes de chocs dans les gaz, les liquides et les solides ;
- la mesure de vitesse de détonation, mesure de densité et vitesse à l'arrière d'un front de détonation ;
- la position et la vitesse d'un projectile le long de son parcours, déformation à la traversée de la cible.

Les deux types de sources de rayonnements utilisés à ce jour sont :

- soit un accélérateur de particules permettant d'obtenir des électrons de forte énergie focalisés sur une cible, produisant ainsi des rayons X ;
- soit un générateur impulsionnel couplé avec une diode.

Le schéma expérimental est celui-ci-après.

Les rayons X sont produits lors du freinage des électrons émis par un générateur ou un accélérateur lorsqu'ils interagissent avec le matériau cible (interaction électron / matière)^[10].

^[9] J.Cl. Brion. Radiographie à l'aide d'un générateur pulsé de rayons X. Filtrage équilibré pour la mesure de largeur de dose à l'aide d'une diode PIN, 1996.

^[10] Revue Chocs (Revue scientifique et technique de la direction des applications militaires) N°38 janvier 2010 et N°47 décembre 2016

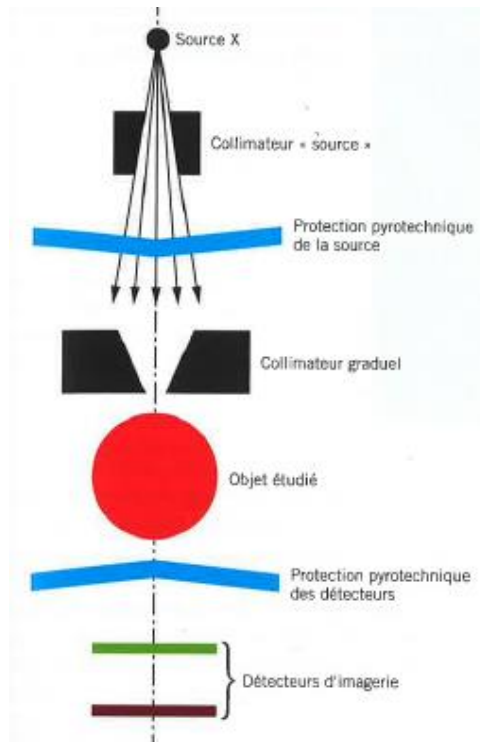


Figure 16 - Production de rayons X (diode de type Self-Magnetic-Pinch)

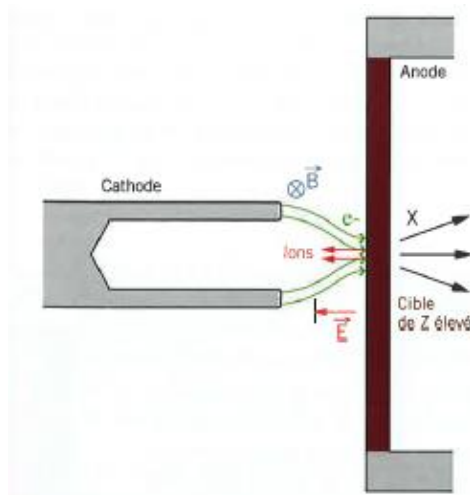


Figure 17 - Chaîne radiographique

La production de rayons X est caractérisée par les paramètres suivants :

- le spectre énergétique des photons émis. Pour observer des matériaux avec un numéro atomique élevé, l'absorption d'un rayon X est minimale à 4 MeV, cela nécessite des énergies des électrons générateurs d'au moins 6 à 8 MeV ;
- la dose délivrée, qui est proportionnelle à l'intensité du faisceau et croît avec son énergie. Afin d'optimiser l'image finale, la dose doit être d'autant plus élevée que l'objet à radiographier est absorbant et que le détecteur est éloigné ;
- la tache focale, qui correspond à la distribution spatiale de l'émission photonique. Sa réduction permet d'optimiser la résolution de la radiographie ;
- la durée d'émission des photons X, liée à la rapidité des phénomènes à observer.

4.2.1.2 Système impulsionnel

Un système impulsionnel est un circuit électrique qui a stocké de l'énergie et la restitue en un temps très court. En 1923, Erwin Marx a l'idée de charger en basse tension des condensateurs en parallèle et de les décharger rapidement en série grâce à des éclateurs pour obtenir une haute tension.

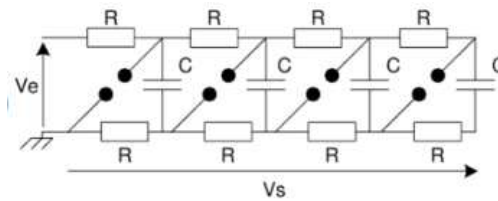
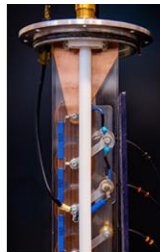


Figure 18 - Schéma de principe d'un générateur de Marx

A ce jour, il existe 3 types de générateurs impulsionnels :

- les générateurs de Marx : ils peuvent délivrer des impulsions pouvant aller jusqu'à environ 10 MV et 150 kA en moins de 100 ns ;
- les générateurs IVA (*Inductive Voltage Adder*) : ils somment les impulsions délivrées (de très forte puissance) à des cellules à induction par des générateurs de Marx ;
- les LTD (*Linear Transformer Driver*) : reprise en partie du principe d'un générateur IVA, avec intégration directe des condensateurs et éclateurs.



Générateur de Marx



Générateur Linear Transformer Driver (LTD)

Figure 19 - Illustrations d'un générateur de Marx et d'un LTD

4.2.1.3 Caractéristiques physiques des impulsions

La durée caractéristique d'une impulsion va d'une dizaine de nanosecondes à quelques millisecondes.

Les tensions et les courants sont respectivement de 1 kV à 50 MV et de 1 kA à 30 MA.

Les impulsions peuvent être uniques ou répétées.

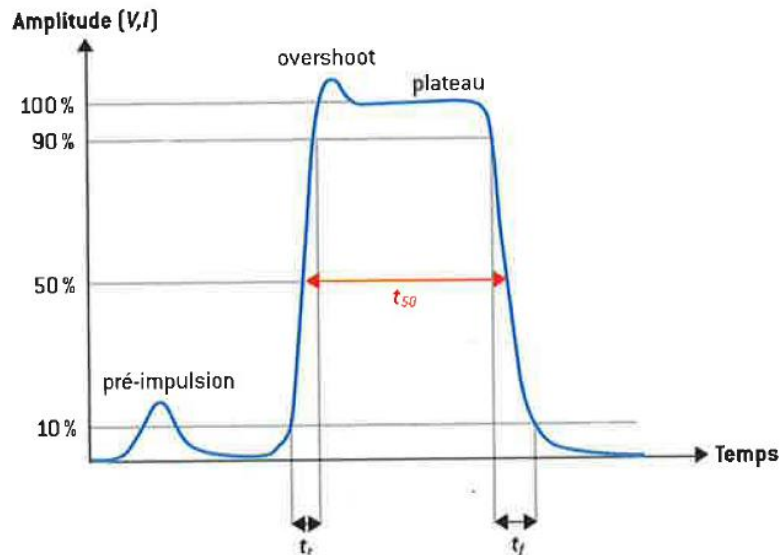


Figure 20 - Temps caractéristiques d'une impulsion et son profil

Un exemple de temps caractéristique pour un EUROPULSE 600 kV :

- temps de montée du signal < 10 ns
- $t_{50} = 70 \text{ ns} \pm 10$

4.2.1.4 Radioprotection liée à l'utilisation de la radiographie éclair

Les doses associées à un pulse sont variables mais, de manière générale, relativement élevées. A titre d'exemple, un générateur de 230 kV entraîne un débit de dose de 15 Gy/h, de 157 Gy/h pour un générateur de 450 kV et une installation comme EPURE du CEA Valduc (délivrant des électrons de 20 MeV) délivre 6 Gy en quelques dizaines de nanosecondes à 1m de la source. Aux vues des doses délivrées, ces équipements sont utilisés dans des installations reprenant les prescriptions de la norme NF M 62-105, les sécurités d'accès associées garantissant l'absence de personnel dans la zone d'irradiation pendant l'émission.

4.2.2 Autres générateurs X utilisés pour du contrôle non destructif

L'utilisation d'appareils électriques émettant des rayons X pour réaliser des contrôles non destructifs est fréquente, que ce soit dans le domaine de l'industrie ou de la défense. L'utilisation d'appareils électriques émettant des rayons X pulsés de très courtes durées (quelques dizaines de nanosecondes) s'est, dans un premier temps, fortement développée dans les armées notamment grâce à la portabilité, la facilité d'utilisation et la rapidité de mise en œuvre de ce type de générateur. Les armées utilisent ce type d'équipement pour réaliser des radiographies sur des colis suspects ou lors de la neutralisation d'engins explosifs.



Figure 21 - Préparation d'un tir radiographique sur une munition (crédit photo scopex.fr)

Désormais, les champs pulsés sont également de plus en plus utilisés dans le domaine « civil ».

Par exemple, la détection par imagerie de matières et objets illicites ou dangereux cachés dans du fret ou des véhicules est basée sur le phénomène de rétrodiffusion Compton des rayons X émis par l'appareil lors de leur interaction avec les objets scannés (ce qui fait apparaître sur les images les surfaces métalliques quasiment transparentes et les éléments légers, comme le plastique, opaques).



Figure 22 - Image d'un véhicule scanné - crédit photo Ditta Technology

4.2.2.1 Caractéristiques des rayons X émis

Les caractéristiques des rayons X émis vont varier en fonction des différents modèles d'appareils.

Les données ci-dessous ne sont pas exhaustives, mais sont représentatives des équipements actuellement utilisés dans le domaine du contrôle non destructif par émission de rayons X pulsés de très courtes durées :

- Dose par pulse à 30 cm : 0,02 à 0,085 mSv
- Débit crête à 30 cm : $1,4 \cdot 10^{+6}$ à $3 \cdot 10^{+7}$ Gy/h
- Largeur à mi-hauteur d'un pulse (FWHM) : 10 à 50 ns
- Energie maximum des X émis : 150 à 370 keV
- Nombre de pulses par seconde : 6 à 20 pulses
- Cycle de tir maximum : 3000 pulses par heure

- Nombre de pulses nécessaires pour radiographier 13 mm d'acier : 50 pulses.



Figure 23 - Générateur de rayons X pulsés XRS3 de la société goldenengineering
(crédit photo goldenengineering.com)

Pour ce qui concerne le domaine de l'inspection de fret et de véhicules, on utilise un appareil équipé d'un dispositif mécanique en sortie de faisceau, constitué d'une roue en plomb percée de trous et en rotation. Ce dispositif permet d'obtenir une émission X pulsée à partir d'un flux constant, pour la reconstitution de l'image de l'objet analysé. En fonction de son utilisation, l'appareil peut être portable ou encore fixé dans un véhicule.

4.2.3 Radars de défense/surveillance aérienne

Les radars, de défense aérienne, qu'ils soient militaires ou civils, peuvent détecter les cibles, leur position, leur trajectoire et leur vitesse sur un large territoire. La portée maximale d'un tel radar peut être de plus de 300 milles nautiques (560 km) dans toutes les directions. On les divise généralement en deux catégories, selon la quantité d'information obtenue : en deux dimensions pour ceux donnant la portée et l'azimut de la cible, en trois dimensions pour ceux ajoutant l'altitude.



Figure 24 - Photographie aérienne de l'ancien radar ARES de l'EAR 901 de Drachenbronn.
(Crédit photo armée de l'air et de l'espace)

Les applications les plus importantes des radars de défense aérienne sont :

- La détection longue distance ;
- La détection de tirs balistiques et l'acquisition de leurs mouvements ;
- La détermination de la hauteur des cibles ;
- Le guidage d'avion intercepteur à partir d'un poste de commandement au sol.

Afin de détecter un objet, le radar émet des ondes électromagnétiques, qui vont se réfléchir sur l'objet.

Ainsi, si après l'émission d'un signal on est capable de recevoir une partie de son énergie qui retourne vers la source, alors on a la preuve qu'un obstacle se trouve dans la direction de sa propagation.

Afin d'être performants, les radars doivent émettre des ondes électromagnétiques de forte puissance. Pour ce faire, ils utilisent des klystrons ou des magnétrons, qui servent d'amplificateur d'ondes électromagnétiques.

4.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un magnétron

Un magnétron va transformer l'énergie cinétique d'électrons en énergie électromagnétique. Les électrons émis par une cathode se dirigent vers une anode en étant déviés par un champ magnétique appliqué parallèlement à l'axe du tube afin de courber les trajectoires des électrons.

Une oscillation est obtenue lorsque la vitesse angulaire des électrons est telle qu'il y a résonance. Les électrons cèdent alors de leur énergie aux ondes hyperfréquences régnant dans les cavités successives.

De conception simple, cette technologie permet des puissances crêtes de plusieurs Mégawatts.

Pour obtenir ces puissances une tension électrique de plusieurs milliers de volts est nécessaire.

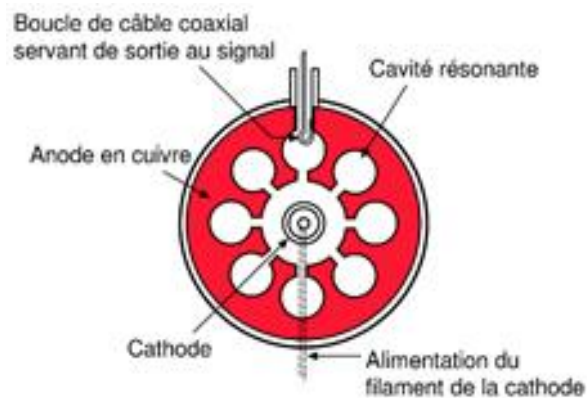


Figure 25 - Diagramme d'un magnétron à cavités (Vanessa Ezekowitz CC By SA)

4.2.3.2 Principe de fonctionnement d'un klystron

Tout comme le magnétron, le klystron va transformer l'énergie cinétique d'électrons en énergie électromagnétique grâce à l'onde primaire.

4.2.3.3 Principe de fonctionnement d'un tube à ondes progressives (T.O.P.)

Le tube à ondes progressives comporte un canon à électrons dans lequel la cathode, chauffée par le filament, émet des électrons qui sont accélérés par l'anode et concentrés en faisceau de très faible diamètre.

L'amplification résulte d'un échange d'énergie entre le faisceau électronique et l'onde hyperfréquence se propageant le long d'une structure périodique en forme d'hélice transformant l'énergie du faisceau en énergie RF.

L'onde RF (Radiofréquence) amplifiée est recueillie et les électrons du faisceau sont récupérés par le collecteur.

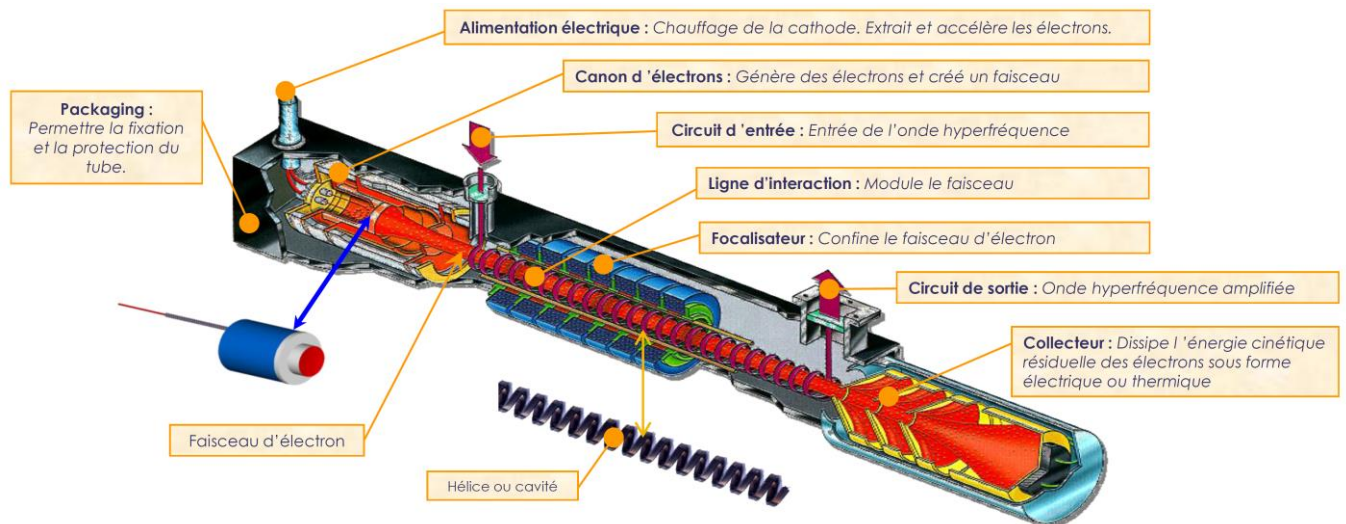


Figure 26 - Schéma de principe d'un tube TOP (crédit Thales)

4.2.3.4 Caractéristiques des rayons X émis

Les rayons X émis sont dits « parasites », car ces rayonnements ne sont pas désirés et ne sont pas utiles au fonctionnement de l'appareil.

Les rayons X sont produits par rayonnement de freinage, principalement lorsque les électrons viennent perdre leur énergie cinétique résiduelle dans le collecteur. Des rayons X sont également produits au niveau de la cavité de sortie et potentiellement au niveau de la ligne d'interaction.

De manière générale, les X émis sont de faible énergie, quelques dizaines de keV, avec des largeurs d'impulsions allant de la dizaine de microsecondes à la centaine de microsecondes et des fréquences de répétition de plusieurs centaines de hertz.

4.2.4 Scanners à rayons X

Les équipements HCV (HEIMANN CARGO VISION) proposés par SMITHS Detection sont équipés d'accélérateurs de particules et utilisés par les Douanes pour la détection de produits illicites dans des camions, trains ou conteneurs de marchandises.

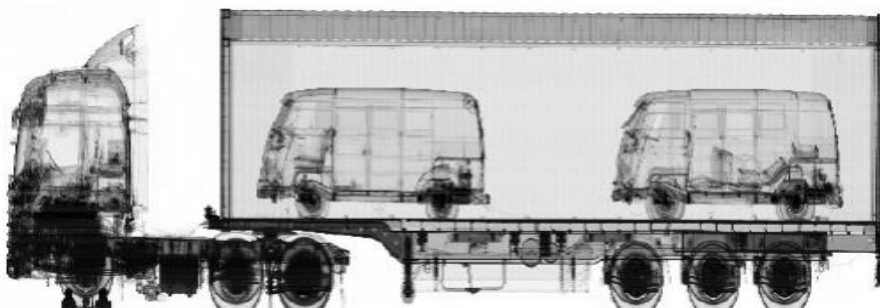


Figure 27 - Image d'un camion scanné

Des électrons sont accélérés avec une énergie comprise entre 4 et 6 MeV et envoyés sur une cible, entraînant la production de rayons X.

Les rayons X sont émis par impulsions avec une fréquence allant de 100 à 800 Hz. Les impulsions ont une durée d'environ 3 μ s. Selon l'équipement, la dose par impulsion varie de 12 à 170 μ Gy à 1 m et la dose émise par l'accélérateur de 4,5 à 180 Gy/h à 1 m, dans le faisceau. Le blindage autour de l'accélérateur atténue le flux d'un facteur 10^6 .

Des filtres (plomb, acier) sont positionnés en sortie d'accélérateur pour augmenter l'énergie moyenne des rayons X émis. Le collimateur en sortie, qui peut être ouvert de 2 à 6 mm, atténue d'un facteur 400 le faisceau incident.

L'équipement HCV peut être déployé de différentes façons (sur rail, fixe, mobile) :



Figures 28 - Les principaux types de HCV de Smiths Detection

En bordure de zonage, le débit de dose est limité à 2,5 μ Sv/h pour les équipements mobiles.

Les radiomètres utilisés pour les mesures par la société sont les suivants :

- détecteur AT1123 en mode intégration (fluctuations du mode débit de dose) ;
- détecteur Innovision 451P pour les mesures dans le faisceau (dose fret) ;
- détecteur FH40, dans la cellule de l'opérateur.

4.3 Domaine de la recherche

4.3.1 Généralités

Certains appareils générateurs de rayonnements ionisants à champs pulsés utilisés dans le domaine de la recherche sont identiques à ceux utilisés dans les domaines médicaux et industriels (générateur X à champs pulsés, scanners...). Par conséquent, les problématiques rencontrées seront les mêmes que celles issues de ces domaines.

On notera que l'inventaire présenté ne peut être exhaustif du fait de la diversité des applications possibles et du nombre de laboratoires utilisant les appareils à champs pulsés.

Toutefois, la particularité première de la recherche est de concevoir et de mettre en œuvre des appareils innovants, le plus souvent unique ou à utilisation extrêmement spécialisée.

Ces appareils préfigurent souvent l'avenir des applications industrielles et médicales.

C'est pourquoi ce panorama s'attachera à présenter un type particulier d'appareils générateurs de rayonnements ionisants à champs pulsés : les accélérateurs de particules.

4.3.2 Typologie des accélérateurs de particules

4.3.2.1 Accélérateurs électrostatiques

Les premiers accélérateurs de particules ont utilisé des systèmes électrostatiques à cette fin. Les générateurs de Marx^[11] et de Cockroft-Walton^[12] utilisent la tension créée par une décharge de condensateurs en série pour générer des tensions accélératrices de l'ordre de la dizaine de MV.

Les générateurs type Van De Graaff^[13] ou Pelletron^[14] produisent une tension électrostatique entre la terre et un point terminal par transfert mécanique de charge (courroie ou chaîne) de l'ordre de quelques dizaines de MV pour des gradients électriques de l'ordre de 2 MV m^{-1} .

Ces accélérateurs peuvent produire des champs continus mais également pulsés à des fréquences allant d'un pulse par jour à 1.10^7 Hz ^[15].

4.3.2.2 Accélérateurs à onde électromagnétique radiofréquence

Le développement des radars durant la Seconde guerre mondiale a permis l'émergence de sources d'ondes électromagnétiques (magnétrons, klystrons...). La possibilité d'utiliser les champs électriques

^[11] Marx, E. (1932). New H.T., high-power rectifier. 53 : 737-737-738

^[12] Cockroft, J. D. and E. T. S. Walton (1932). "Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions." Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 136(830): 619-630

^[13] Van de Graaff, R., P. Rose and A. Wittkower (1962). "High-voltage acceleration tubes utilizing inclined-field principles." Nature 195(4848): 1292-1293

^[14] Herb, R. G. (1974). Pelletron accelerators for very high voltage. 122: 267-267-276

^[15] TANDEM, IJCLab(UMR9012), Orsay

générés par ces appareils a été entrevue dès 1924^[16] et mise en œuvre dès 1928^[17] et 1931^[18] pour accélérer des ions chargés. C'est au sortir de la Seconde guerre mondiale que l'équipe de Hansen, Ginzton et Kennedy met au point le premier accélérateur linéaire d'électrons^[19].

Le principe est d'utiliser l'amplitude maximale du champ électrique de l'onde électromagnétique afin d'appliquer des accélérations successives des particules le long de son parcours. C'est pourquoi les particules doivent être regroupées en paquet afin d'optimiser le transfert d'énergie avec l'onde radiofréquence.

4.3.3 Les différents appareils électriques générateurs de rayonnements ionisants à champs pulsés dans le domaine des accélérateurs de particules

4.3.3.1 Les sources primaires de particules

Cette catégorie regroupe les systèmes produisant les particules primaires qui seront injectées dans les accélérateurs de particules. Ils peuvent être à émission continue ou pulsée. Dans le premier cas, des groupements peuvent être mis en œuvre en aval afin de créer les paquets de particules avant injection.

Suivant les particules à produire, différentes technologies sont utilisées en fonction des applications et du type de faisceau souhaité (durée d'impulsion, émission...). Le tableau ci-après présente différents exemples de sources primaires de particules, en indiquant le domaine de durée d'impulsion et de fréquence d'émission des particules primaires.

^[16] Ising, G. (1924). "Prinzip einer methode zur herstellung von kanalstrahlen hoher spannungen." Arkiv för matematik, astronomi och fysik18(30) : 1-4

^[17] Wideröe, R. (1928). "Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen." Archiv für Elektrotechnik21(4): 387-406

^[18] Lawrence, E. O. and M. S. Livingston (1932). "The production of high speed light ions without the use of high voltages." Physical Review 40(1): 19

^[19] Post, R. F. and N. S. Shiren (1955). "The Stanf

^[19] Marx, E. (1932). New H.T., high-power rectifier. 53: 737-737-738

^[19] Cockcroft, J. D. and E. T. S. Walton (1932). "Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions." Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 136(830): 619-630

^[19] Van de Graaff, R., P. Rose and A. Wittkower (1962). "High-voltage acceleration tubes utilizing inclined-field principles." Nature195(4848): 1292-1293

^[19] Herb, R. G. (1974). Pelletron accelerators for very high voltage 122: 267-267-276

^[19] TANDEM, IJCLab(UMR9012), Orsay

^[19] Ising, G. (1924). "Prinzip einer methode zur herstellung von kanalstrahlen hoher spannungen." Arkiv för matematik, astronomi och fysik 18(30): 1-4

^[19] Wideröe, R. (1928). "Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen." Archiv für Elektrotechnik21(4): 387-406

^[19] Lawrence, E. O. and M. S. Livingston (1932). "The production of high speed light ions without the use of high voltages." Physical Review 40(1): 19

^[19] Post, R. F. and N. S. Shiren (1955). "The Stanford Mark II Linear Accelerator." Review of Scientific Apparails26(2): 205-209

Particules	Injecteur	Continue/Pulsée	Durée d'impulsion	Fréquence
Électrons	Thermoionique	C	-	-
	Photocathode	C/P	~ps	.1 Hz-1 MHz
Protons/Ions	Magnétron/Penning	C/P	10 s - 1 ms	1 Hz - 100 Hz
	Duoplasmatron	C/P	~ μ s	0,1 Hz - kHz
	ECR ^[20]	C/P	100 μ s - 1 ms	Hz - 100 Hz
	EBIS ^[21] /ESIS ^[22]	C/P	μ s - ms	0,1 Hz - kHz

Tableau 6 : Exemples de sources primaires de particules

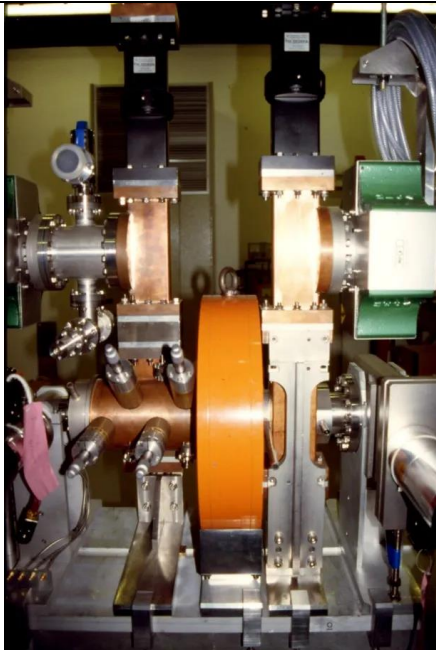


Figure 29 - Canon photocathode ELYSE^[23], 4-5 MeV, ≤ 10 ps, 0;1 Hz - 10 Hz



Figure 30 - Canon photocathode LCLS-II^[24], 1-100 fs, 1 MHz

^[20] ECR : *Electron Cyclotron Resonance* ou Résonance cyclotron électronique

^[21] EBIS : *Electron Beam Ion Source* ou Source d'ions par faisceau d'électrons

^[22] ESIS : *Electron String Ion Source* ou Source d'ions par faisceau continu d'électrons

^[23] <https://elyse-platform.academy/historical-photos/>

^[24] Galayda, J. N. (2018). The LCLS-II: A high power upgrade to the LCLS, SLAC National Accelerator Lab., Menlo Park, CA (United States)

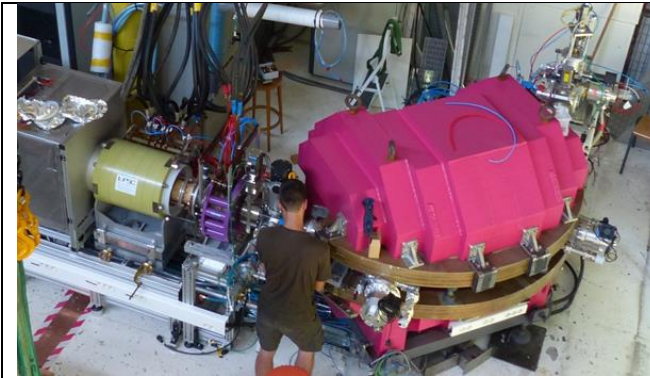


Figure 31 - Source ECR SPIRAL 2, 10 Hz^[25]



Figure 32 - Source protons de l'ESS^[26], 6 ms, 14 Hz

4.3.3.2 Sources radiofréquences

Ces équipements produisent l'onde électromagnétique radiofréquence qui sera injectée dans les cavités accélératrices. Plusieurs technologies sont utilisées en fonction de la puissance souhaitée : magnétrons, IOT (*Inductive Output Tube*), SST (*Solid-State Transistors*) pour des applications nécessitant des puissances faibles à moyennes.

Dans la grande majorité des cas, le klystron sera la technologie privilégiée.

Le principe de fonctionnement se base sur le transfert d'énergie cinétique, provenant d'un faisceau d'électrons, en énergie potentielle à un signal radiofréquence.

Un klystron est basé sur un canon à électrons de type thermoionique.

Les électrons alors produits vont traverser un guide d'onde dans lequel un signal radiofréquence de faible puissance est injecté.

Un champ magnétique (aimants permanents ou électro-aimants) permet de garder le faisceau d'électrons focalisé le long du parcours.

^[25] <https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/accelerateurs-et-sources-d-ions/activite-recentes-pole>

^[26] <https://www.lns.infn.it/it/ricerca/progetti/ess.html>

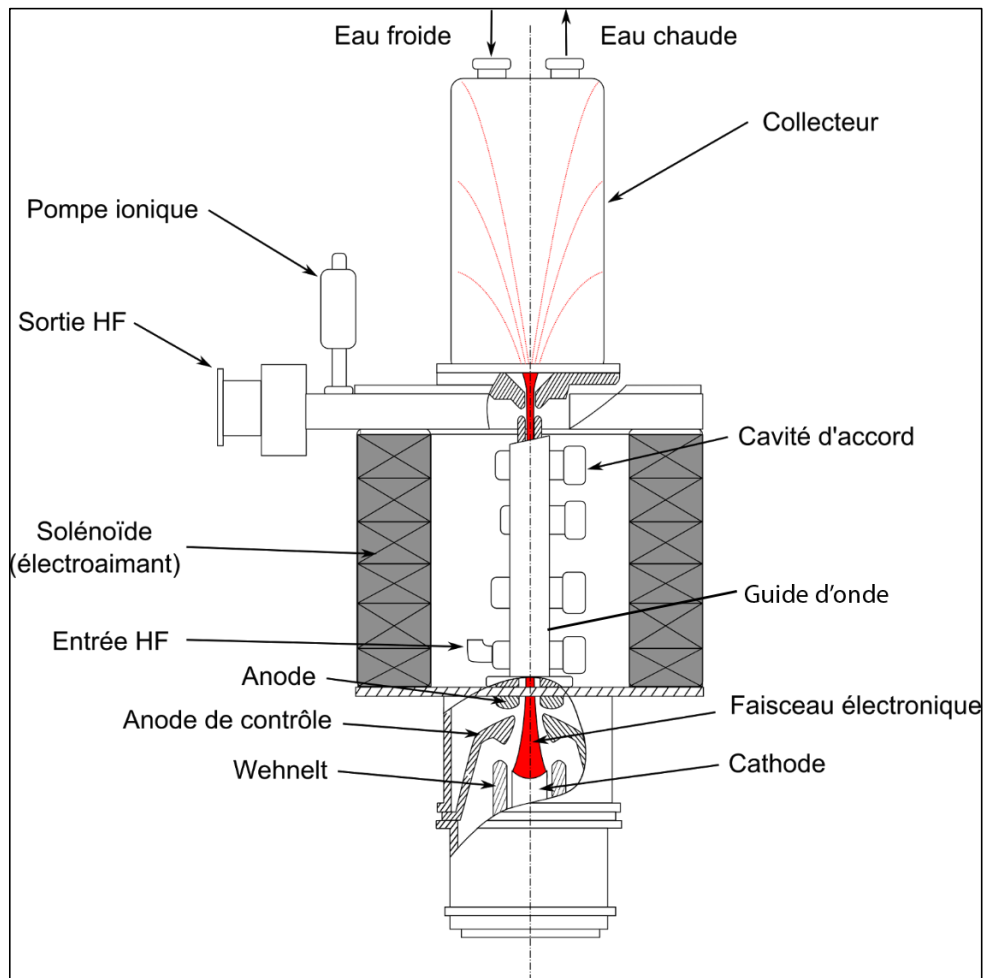


Figure 33 - Schéma d'un klystron (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Klystron-fr.png>)

Le passage combiné du faisceau d'électrons et de l'onde RF dans les cavités successives assure le transfert d'une partie de l'énergie cinétique des électrons à l'onde électromagnétique par la modulation de la vitesse du faisceau primaire.

Le signal RF est ainsi amplifié et extrait au niveau d'une cavité d'accord pendant que le faisceau d'électrons est envoyé dans un collecteur pour le stopper.

Le faisceau d'électrons est regroupé en paquets et est donc un générateur de rayonnements ionisants pulsés (rayonnement de freinage).

La largeur d'impulsion caractéristique est de l'ordre de $6 \mu\text{s}$ pour une fréquence de 50 Hz.

4.3.3.3 Accélérateur linéaire - LINAC

Les accélérateurs linéaires permettent le transfert d'énergie potentielle provenant de l'onde radiofréquence amplifiée par la source RF au faisceau de particules sous forme d'énergie cinétique. Les faisceaux accélérés ainsi produits sont utilisés pour de nombreuses applications : irradiation de cibles, collisions de particules, production de rayonnements secondaires (lasers à électrons libres, neutrons (spallations), sources RF (TBA (*Two-Beam Accelerator*), production de faisceau pour injection dans des anneaux de stockages...).

Installations	Particules	Largeur du pulse	Fréquence
ThomX ^[27] (Orsay, FR)	Électrons	10-20 ps	10 - 50 Hz
ALTO ^[28] (Orsay, FR)	Électrons	0,2-3 μ s	\leq 100 Hz
CLIO ^[29] (Orsay, FR)	Électrons	10 μ s	25 Hz
XFEL ^[30] (Hamburg, DE)	Électrons	650 μ s	10 Hz
ESS ^[31] (Lund, SE)	Protons	6 ms	14 Hz
LHC-LINAC4 ^[32] (Genève, CH)	Protons	400 μ s	2 Hz
SNS ^[33] (Oak Ridge, USA)	Protons	1 ms	60 Hz

Tableau 7 : Exemples d'accélérateurs linéaires et caractéristiques de faisceau

Les faisceaux de particules mis en œuvre ont un domaine de fréquence et de largeur d'impulsion très large (du Hz au MHz, de la pico à la dizaine de millisecondes).

4.3.3.4 Anneau de stockage

Ce sont des accélérateurs circulaires qui sont utilisés pour stocker un faisceau de particules préalablement accélérés. Ces anneaux sont utilisés entre autres pour :

- la production de rayonnement synchrotron (ex : Synchrotron SOLEIL (Saint-Aubin, France)) ;
- la réalisation de collisions de particules (ex : LHC (Genève, Suisse)) ;
- la production de rayonnement par effet Compton inverse (ex : ThomX (Orsay, France)).

Le rayonnement synchrotron est produit lorsque des particules chargées relativistes sont soumises à une accélération centripète (*Bremsstrahlung*). En effet, la perte d'énergie cinétique est transférée par l'émission d'une onde électromagnétique. Ce rayonnement est anisotrope, polarisé et tangentiel à la trajectoire du faisceau primaire. Le spectre de rayonnement produit est continu, la longueur d'onde des photons produits étant fonction de l'angle d'émission par rapport à la tangente à la trajectoire du faisceau.

^[27] Dupraz, Kevin, Muath Alkadi, Manuel Alves, Loic Amoudry, Didier Auguste, Jean-Luc Babigeon, Michel Baltazar, *et al.* "The Thomx lcs Source." *Physics Open* 5 (2020/12/01/ 2020) : 100051
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100051>.<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666032620300387>

^[28] Lesrel, Jean, J Arianer, M Arianer, Olivier Bajeat, J-M Buhour, H Bzyl, F Carrey, *et al.* "Commissioning of the Alto 50 Mev Electron Linac." Paper presented at the Tenth European Particle Accelerator Conference" EPAC'06", 2006

^[29] Chaput, R, B Kergosien, P Joly, and J Lesrel. "Optimisation of the Fel Cl10 Linear Accelerator." EPAC1994, 1994

^[30] https://www.xfel.eu/facility/comparison/index_eng.html

^[31] Neri, Lorenzo, L Celona, S Gammino, A Miraglia, O Leonardi, Giuseppe Castro, G Torrissi, *et al.* "Beam Commissioning of the High Intensity Proton Source Developed at Infn-Lns for the European Spallation Source." *Proc. of IPAC'17* (2017): 2530-32

^[32] Lettry, J., D. Aguglia, J. Alessi, P. Andersson, S. Bertolo, S. Briefi, A. Butterworth, *et al.* "Linac4 H- Ion Sources." *Review of Scientific Apparails* 87, no. 2 (2016/02/01 2015) : 02B139

<https://doi.org/10.1063/1.4936120>.<https://doi.org/10.1063/1.4936120>

^[33] Morozov, V. S, C. C Peters, and A. P Shishlo. "Oak Ridge Spallation Neutron Source Superconducting Rf Linac Availability Performance and Demonstration of Operation Restoration with Superconducting Rf Cavity Off."

Physical Review Accelerators and Beams 25, no. 2 (02/17/ 2022) : 020101

<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.020101>

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.020101>

La largeur d'impulsion est souvent identique à celle du faisceau préalablement injecté, cette valeur étant imposée par les performances requises pour l'application souhaitée. La fréquence des pulses est fonction de la fréquence de rotation dans l'anneau, c'est-à-dire fonction de son rayon, et pour les particules non relativistes, également fonction de l'énergie cinétique du faisceau.

Installations	Largeur de pulse	Fréquence
SOLEIL ^[34] (Saint-Aubin, FR)	15 - 98 ps	0,85 MHz
ESRF ^[35] (Grenoble, FR)	13-37 ps	0,36 MHz
MAX IV ^[36] (LUND, SE)	40-60 ps	0,57 MHz

Tableau 8 : Exemples d'installations synchrotrons et caractéristiques des faisceaux

4.3.3.5 Lasers à haute puissance

Ces installations produisent des faisceaux lasers de largeur d'impulsion courte (de l'ordre de la ps à la fs) dont la densité d'énergie est suffisante pour appliquer une force pondéromotrice dans la matière (plasmas ou solides) engendrant une onde plasma dans laquelle un champ électrique important est créé^[37].

Des faisceaux de particules chargées (électrons, protons, ions) sont alors créés dans le sillage laser dont le spectre énergétique est continu et pouvant aller de quelques dizaines de MeV à plusieurs GeV.

Installations	Puissance laser (W.cm-2)	Fréquence de tirs	Largeur de l'impulsion laser	Largeur d'impulsion
APOLLON ^[38] (Saclay, FR)	$10 \cdot 10^{23}$	1 tir.min-1	15 fs	~ps
LULI2000 ^[39] (Palaiseau, FR)	$2 \cdot 10^{14}$	1tir.90 min-1	10 ps	
LOA ^[40] (Palaiseau, FR)	$3-6 \cdot 10^{18}$	1 kHz	3,5 fs	
EUPRAXIA ^[41] (Projet)	10^{18}	20 Hz - kHz	6 - 20 fs	> 8 fs

Tableau 9 : Exemples d'installations de lasers à haute puissance et caractéristiques des faisceaux

^[34] <https://www.synchrotron-soleil.fr/en/research/sources-and-accelerators/electron-beam-parameters>

^[35] <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Accelerators/ebs---extremely-brilliant-source/ebs-parameters.html>

^[36] Tavares, PF, Eshraq Al-Dmour, Åke Andersson, Jonas Breunlin, Francis Cullinan, Erik Mansten, Stephen Molloy, *et al.* "Status of the Maxiv Accelerators." Paper presented at the Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019), Melbourne, Australia, 2019.

^[37] Tajima, T, K Nakajima, and G Mourou. "Laser Acceleration." *La Rivista del Nuovo Cimento* 40, no. 2 (2017): 33-133

^[38] <https://apollonlaserfacility.cnrs.fr/faisceaux-laser/>

^[39] Rigon, G, A Casner, Bruno Albertazzi, Th Michel, P Mabey, E Falize, J Ballet, *et al.* "Rayleigh-Taylor Instability Experiments on the Luli2000 Laser in Scaled Conditions for Young Supernova Remnants." *Physical Review E* 100, no. 2 (2019): 021201

^[40] Faure, J., D. Gustas, D. Guénot, A. Vernier, F. Böhle, M. Ouillé, S. Haessler, R. Lopez-Martens, and A. Lifschitz. "A Review of Recent Progress on Laser-Plasma Acceleration at Khz Repetition Rate." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 61, no. 1 (2018/11/13 2018): 014012

<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aae047> <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/aae047>

^[41] <http://www.eupraxia-project.eu/eupraxia-conceptual-design-report.html>

4.3.4 Synthèse

Les accélérateurs de particules utilisés dans la recherche couvrent une large gamme de fréquence et de largeur d'impulsion, tout en présentant des caractéristiques différentes de plusieurs ordres de grandeurs des appareils pouvant être utilisés dans d'autres domaines.

Leur nombre est toutefois faible et leur exploitation est habituellement assurée par des équipes ayant une connaissance précise des spécificités de leurs installations du point de vue de la radioprotection.

De plus, de par les énergies et les intensités de faisceau mises en jeu, les zones où se situent les accélérateurs de particules sont principalement interdites d'accès par conception lors de leur fonctionnement (cf. prescriptions de la norme NF M 62-105). À la conception, des codes Monte-Carlo de calculs de transport et d'interaction des particules sont utilisés afin de définir les blindages radiologiques nécessaires afin d'assurer la protection des travailleurs, du public et de l'environnement.

Les mesures autour des zones attenantes sont principalement assurées à l'aide de capteurs de rayonnements de type chambre d'ionisation ou à l'aide de dosimètres d'ambiance à lecture différée.

5 Mesurages et limites

5.1 Éléments préliminaires

La valeur de 10 secondes (cf. § 4.1.1) en tant que durée d'émission maximale à considérer pour définir un champ pulsé, liée aux capacités techniques des appareils de mesure en mode « débit » disponibles sur le marché, fait l'objet d'un consensus auprès des membres du GT.

En effet il est possible de considérer que, pour une émission d'une durée supérieure à 10 s, la grande majorité des radiomètres disponibles sur le marché sont capables de fournir une mesure fiable, que ce soit en dose ou en débit d'équivalent de dose.

En dessous de cette valeur des 10 s, la fiabilité des résultats de mesure des radiomètres sera fonction de plusieurs paramètres :

- les caractéristiques du champ pulsé (en particulier le type d'impulsion, la durée totale de l'émission, la durée des impulsions ainsi que les débits de dose crête) ;
- le type de détecteur utilisé (chambre d'ionisation, scintillateur plastique, semi-conducteur...) ;
- la technologie utilisée pour le traitement du signal (numérique, analogique).

En matière de mesurage, il est important de souligner que plus les durées d'émissions seront courtes, plus une mesure (en particulier de débit de dose) avec des appareils réalisant un traitement du signal électronique sera difficile, voire quasiment impossible pour des durées d'impulsions extrêmement brèves : en-dessous de la nanoseconde, aucun appareil basé sur une électronique n'est actuellement capable de donner avec exactitude une information en débit de dose.

En effet, le temps nécessaire à la collection des charges ou au traitement du signal fait que l'électronique de beaucoup d'appareils de mesure atteint ses limites.

De même, le risque de saturation des appareils de mesure en termes de débit de dose est également à prendre en compte : à titre d'exemple, un pulse de 50 ns, délivrant une dose de 3,6 μSv , correspond à un débit de dose crête de $2,59 \cdot 10^5 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$.

Le GT a toutefois pu noter que le développement de technologies utilisant des champs pulsés de plus en plus courts est en plein essor, aussi bien dans le domaine médical qu'industriel. Plusieurs organisations

telles qu'EURADOS (European radiation dosimetry group) et EURAMET (European association of national metrology institutes) ont par ailleurs engagé des travaux sur la métrologie en champ pulsé, avec de nombreux projets prévus dans les années à venir comme par exemple :

- l'appel à projet Flashdose (EURAMET) qui doit faire l'objet d'une proposition d'étude en 2023 et qui, s'il est accepté, aborderait notamment les thèmes suivants : les nouveaux détecteurs (chambres d'ionisation à paroi fine-diamant) à tester et à comparer dans les faisceaux flash, l'extension des études aux faisceaux d'« ultra » haut débit d'électron, l'extension à la protonthérapie scannée flash, l'étude et des propositions relatives au cadre réglementaire ;
- un futur appel à projet (EURAMET - Call industrie) qui doit faire l'objet d'une proposition et qui, s'il est accepté (avec un lancement au plus tôt en 2025) aborderait des thèmes tels que la réglementation (dose hebdomadaire, dose totale, harmonisation internationale...) et le test de détecteurs (seuil de sensibilité, étalonnage, modélisation...).

5.2 Revue bibliographique des appareils de mesure existants

Dans ce chapitre il est présenté, dans un premier temps, quelques études portant sur des intercomparaisons d'appareils de radioprotection qui illustrent la difficulté, pour certains des appareils testés, de réaliser des mesures en champs pulsés. Dans un second temps, sont présentées les réponses de fabricants/fournisseurs d'appareils de mesure à un questionnaire, envoyé en 2022 par le GT, sur les caractéristiques de leurs appareils en champs pulsés.

5.2.1 Intercomparaison de différents appareils de mesure

La première étude présentée ici est un rapport de 2008 d'un étudiant du Master radioprotection de Grenoble^[42] ayant, dans le cadre de son stage, réalisé une intercomparaison de matériels.

Au cours de cette intercomparaison, la difficulté de réaliser des mesures lors d'émissions brèves avait déjà été soulignée. Les appareils de mesure utilisés étaient les suivants : BABYLINE, FH40F, FH40-G, FH40-GL, FH40 GL10, GRAETZ X5 DE, GRAETZ X5 E, RADCAL, LB123D, RAMDA 3.

La conclusion du rapport fut la suivante :

« Aucun des appareils utilisés, malgré leur conformité aux normes NF EN 60846^[43], ne possède les caractéristiques suffisantes à la mesure correcte du débit de dose lors d'impulsions de moins de 1 seconde. (radiologie interventionnelle, radiologie conventionnelle, mammographie, radiologie rétroalvéolaire, etc.) Ils auront donc tous tendance à sous-estimer le débit d'équivalent de dose ambiant ou le débit de kerma. »

^[42] Thomas Le Gouefflec. Mémoire de stage année 2008 : Université Joseph Fourier – Grenoble. Élaboration d'un plan de renouvellement du parc de matériel du département radioprotection de l'Apave nord-ouest

^[43] Norme NF EN 60846 de février 2005 annulée et remplacée par la norme NF EN 60846-1 de mars 2015 : Instrumentation pour la radioprotection - Appareils pour la mesure et/ou la surveillance de l'équivalent de dose (ou du débit d'équivalent de dose) ambiant et/ou directionnel pour les rayonnements bêta, X et gamma - Partie 1 : appareils de mesure et de surveillance portables pour les postes de travail de l'environnement

L'intérêt du mode de mesure en intégration a été souligné dans le rapport :

« Certains appareils comme les chambres d'ionisation offrent la possibilité d'effectuer une mesure de la dose par cliché. Si on connaît la durée de l'exposition, il est alors possible de calculer le débit de dose instantané. On peut alors s'affranchir de ce problème de temps de réponse. Ceci dit, il est bon de rappeler ici que cette durée est de moins en moins indiquée sur les pupitres de commandes des installations. »

Enfin, ce rapport mettait en exergue que même un appareil commercialisé pour réaliser des mesures en champ pulsé (AT 1123) montrait ses limites et, qu'en dessous de 10 ms, il n'y avait pour les paramètres de tirs et la configuration utilisée aucune mesure probante (cf. figure ci-après).

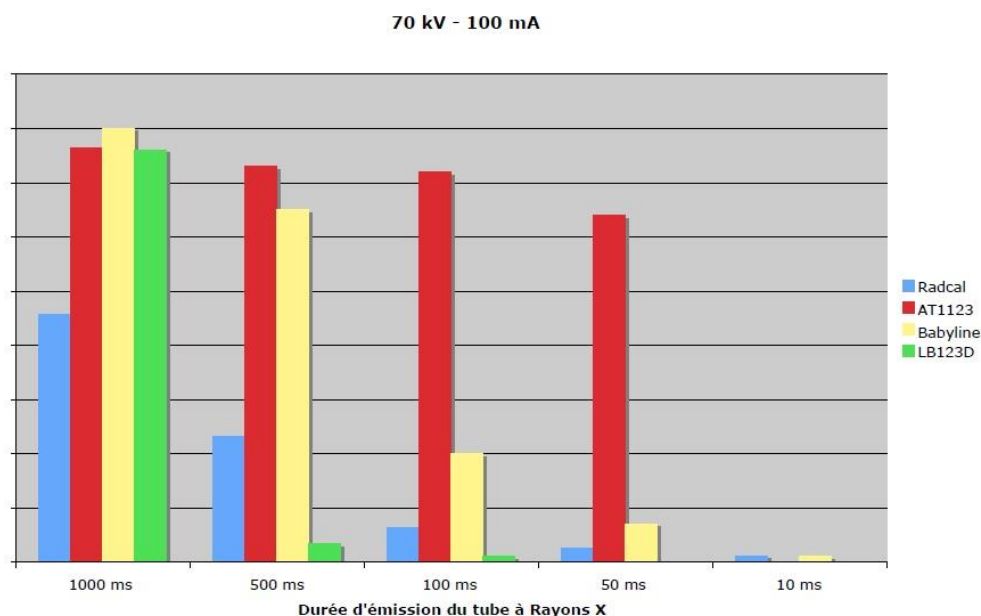


Figure 34 – Mesurages par radiomètres

La seconde étude ^[44] présentée ici date également de 2008. Elle avait pour objectif de comparer la réponse de détecteurs commercialisés pour la mesure de la dose et du débit de dose dans le rayonnement diffusé dans le domaine de la radiologie médicale.

Les appareils de mesure utilisés étaient les suivants : RADCAL, BABYLINE 81, FH-40 G-L10, VICT. 451, P BERTHOLD TOL/F, UNFORS EDD-30, MGP DMC 2000X.

Les réponses relatives des détecteurs (référence : BABYLINE 81) pour des expositions réalisées en graphie mode cellule pour différentes durées d'émission du faisceau primaire (488 ms, 220 ms et 35 ms) sont présentées sur la figure suivante.

^[44] J.M. VRIGNEAUD, A. JEAN-PIERRE, J. RAGOT, C. COLLEU, C. HERMETET-FILEZ. Comparaison de la réponse des détecteurs pour la mesure de l'exposition externe en radiologie, APCRAP, 2008, Association des Personnes Compétentes en Radioprotection de l'Assistance Publique

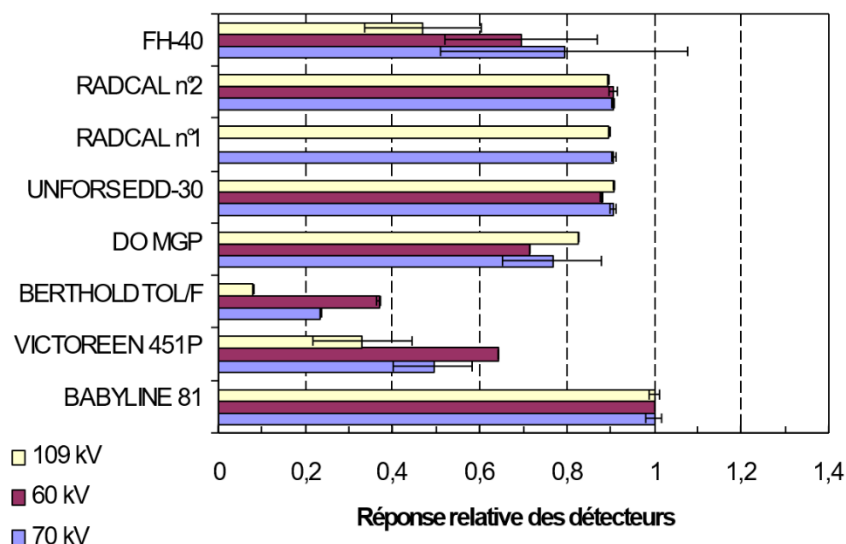


Figure 35 - Réponse relative des détecteurs (référence = BABYLINE 81) pour des expositions réalisées en mode cellule à 60 kV (142 mAs, 488 ms), à 70 kV (63 mAs, 220 ms) et 109 kV (10 mAs, 35 ms)

La conclusion de cette étude était la suivante : « Les détecteurs les mieux adaptés pour la mesure de l'exposition externe en radiologie sont les chambres d'ionisation de grand volume (BABYLINE, RADCAL). Les détecteurs de type Victoreen 451P, FH-40, TOL/F saturent assez vite aux débits de dose rencontrés en radiologie. Les détecteurs solides de type MGP et EDD-30 donnent une mesure acceptable (< 30 % en radioprotection).

Différentes études ont également été réalisées sur des dosimètres opérationnels. On peut par exemple citer une intercomparaison réalisée dans le cadre du groupe de travail 9, *Medical staff Radiation Protection Dosimetry* d'EURADOS⁴⁵. La durée des pulses étaient de 100 ms et sur les 6 dosimètres testés en faisceaux pulsés dans le champ diffusé, un type de dosimètre était « aveugle » en faisceau pulsé, même dans le champ diffusé.

La conclusion de cette étude était que le contrôle de la bonne adéquation des dosimètres opérationnels avant usage, particulièrement dans les champs pulsés, est essentiel afin de s'assurer que ceux-ci sont adaptés.

Une intercomparaison de dosimètres opérationnels dans des champs pulsés de 50 ns a également été réalisée lors d'une étude⁴⁶ de l'école des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA). On peut noter qu'une BABYLINE avait été utilisée pour obtenir la valeur de référence de l'équivalent de dose.

Cette étude avait montré qu'aucun dosimètre opérationnel ne donnait une valeur acceptable de l'équivalent de dose en profondeur (sous-estimation d'un facteur 2 par rapport à la valeur de référence à 8 mètres du générateur X).

D'autres paramètres, comme la capacité de l'appareil à se mettre en alarme pour des niveaux de « dose » ou de « débit de dose », avaient également été pris en compte.

^[45] Intercomparaison de dosimètres personnels actifs dans des champs de photons réalistes de la radiologie interventionnelle, WP 7 of CONRAD SG 3-4, (WG 9 - *Medical staff Radiation Protection Dosimetry*) EURADOS

^[46] Etude relative aux moyens de métrologie, et de prévention de l'exposition, pour les équipes NEDEX utilisant les générateurs de rayons X pulsés de type XRS3, EAMEA, 24/06/2019

La conclusion de cette étude était que, pour le dosimètre considéré comme étant le plus adapté : « *celui-ci est uniquement utilisé comme un système d'alerte d'une possible exposition d'un opérateur. En tout état de cause l'estimation de la dose efficace en profondeur par exposition externe ne doit jamais être déduite de la valeur affichée par le dosimètre.* »

Le GT note qu'il existe de nombreuses études se rapportant à la mesure en champs pulsés. Cependant il existe une grande disparité du nombre d'études suivant les caractéristiques des champs pulsés : ainsi, on peut trouver un nombre important d'études réalisées dans le domaine de l'imagerie médicale, pour des pulses ayants une durée d'émission de l'ordre de la dizaine de ms ; a contrario, pour des pulses ayants une durée d'émission de l'ordre de la ns ou moins, le nombre d'informations disponibles diminue fortement. Il en est de même pour des champs pulsés dits « complexes » (neutrons, X et neutrons, installations de recherche...).

5.2.2 Questionnaire envoyé aux constructeurs

Un questionnaire a été envoyé en 2022 (courriels de mai et juin et courriers du 27 juin), ainsi qu'aux sociétés proposant une vérification de l'étalonnage des appareils vis-à-vis des caractéristiques des appareils de mesures en champs pulsés. Leurs réponses sont présentées ci-dessous. Un dernier paragraphe présente également les appareils de mesure utilisés par certains fabricants/fournisseurs de générateurs X fonctionnant en champs pulsés.

5.2.2.1 Réponses de la société MPE

La société MPE, spécialisée dans la métrologie et la maintenance des appareils de radioprotection, a apporté les éléments suivants : il existe deux écoles pour la mesure en champs pulsés, l'utilisation de l'AT1123 (très répandue) ou d'une chambre d'ionisation type BABYLINE 81 quand cela est possible.

L'AT1123 est un instrument numérique à technologie scintillateur plastique. Toutefois, l'utilisation de cet appareil peut s'avérer complexe (configuration du bon mode (et sous-mode) de fonctionnement avant son utilisation. Une mauvaise configuration de l'appareil peut ainsi engendrer de mauvais résultats de mesure. Comme tout matériel, cet instrument possède des limites techniques à bien prendre en compte. Il faut porter une attention particulière aux durées des impulsions et du train d'impulsion, qui doivent être dans la plage de détection de l'appareil.

La BABYLINE 81 est un instrument analogique à technologie chambre d'ionisation. Elle peut être utilisée en mode intégration de dose pour réaliser la mesure d'un champ pulsé, avec une durée d'intégration suffisante. Contrairement à l'AT1123, il n'y a aucun algorithme informatique de mesure interne. La réponse est analogique.

Point important : il est à noter que ces appareils ne sont pas contrôlés en champ pulsé. Il n'existe, à ce jour, aucun prestataire ou solution technique pouvant répondre à cette problématique. Les appareils sont étalonnés en usine par le constructeur et vérifiés par la suite à l'aide d'une source de ¹³⁷Cs, qui reste le radioélément de référence.

5.2.2.2 Réponse de la société Berthold

La société prévoit l'industrialisation d'un nouveau matériel (TOL-G) pour la fin de l'année 2023.

Il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'un appareil fonctionnant avec une électronique. Dans le descriptif technique, il n'est pas fait mention du temps de réponse concernant les champs pulsés. Certains membres du GT ont pu réaliser des tests sur cet appareil, qui montrent que l'efficacité de la mesure en champs pulsés devrait être améliorée pour des durées inférieures à 100 ms.

5.2.2.3 Réponse de sociétés fournissant des appareils émettant des rayonnements ionisants en champs pulsés

5.2.2.3.1 Société Europulse

Europulse utilise un dosimètre PTW UNIDOS associé à une chambre d'ionisation 30cc type 233361. Le matériel est étalonné avec une source de ^{60}Co .

On note ici qu'il n'y a pas non plus de vérifications avec un champ pulsé.

L'utilisation de ce matériel de mesure pour caractériser la dose émise par des générateurs RX flash (300 à 1 MV) a été historiquement introduite dans les années 1990 par la DGA Techniques Terrestres (Établissement Technique de Bourges à l'époque). Europulse indique que la mesure de dose obtenue par ce matériel, pour la même émission de photons X, est comparable à l'indication donnée par des stylos dosimètres.

A ce jour, DGATT, Europulse et le CEA/DAM (CEG) sont équipés de ce même matériel. Les autres clients utilisent toujours des stylos dosimètres. Lorsque nous livrons du matériel, nous effectuons des mesures de dose chez nos clients avec notre matériel. Les études de sécurité radioprotection de nos clients se basent sur les caractéristiques des sources annoncées par les constructeurs.

Europulse a par ailleurs développé une cellule à diode PIN compensée en réponse spectrale qui permet de visualiser le profil temporel de la dose émise. Les résultats en termes de dose sont purement qualitatifs et seul le profil est quantitatif (temps de montée, largeur, anomalie...).

5.2.2.3.2 Société Smiths detection

Les radiomètres utilisés pour les mesures par la société sont les suivants :

- détecteur AT1123 en mode intégration (fluctuations du mode débit de dose) ;
- détecteur Innovision 451P pour les mesures dans le faisceau (dose fret) ;
- détecteur FH40, dans la cellule de l'opérateur.

Il n'y a pas eu d'autres réponses techniques.

Nota : des membres du GT ont également eu connaissance de l'existence d'un appareil de mesure, l'IC3 Ion Chamber fabriqué par la société ROTEM, pour lequel le fabricant annonce, dans sa brochure commerciale : « *La chambre d'ionisation IC3 est capable de mesurer des trains d'impulsions de rayons X à partir d'impulsions de 50 nanosecondes* ».

Toutefois, cette information ayant été connue tardivement par les membres du GT, aucune donnée supplémentaire n'a pu être obtenue et aucun test réalisé, le fabricant indiquant une commercialisation pas avant mi 2023.

En conclusion de cette revue bibliographique des appareils existants, plusieurs éléments importants aux yeux des membres du GT se dégagent :

- les appareils de mesures à technologie « chambres d'ionisations », utilisés en mode « intégration de dose », sont considérés par beaucoup comme des appareils de référence (en particulier la BABYLINE, bien qu'elle ne soit pas un appareil de mesure primaire) ;
- d'autres appareils sont capables de fournir des mesures de dose ou de débit de dose en champ pulsé. Toutefois, ces appareils peuvent s'avérer être compliqués à utiliser et les limites de mesure de l'appareil doivent être impérativement connues (en fonction de la durée des impulsions, de la durée du train d'impulsion, des débits de dose crête...);
- il n'existe à ce jour, que très peu, voire aucun prestataire ou aucune solution technique permettant d'étalonner/vérifier les appareils de mesure avec des champs pulsés (cf. § 5.3.4).



Figure 36 - BABYLINE (à gauche) et AT1123 (à droite) deux appareils souvent cités pour la mesure de champs pulsés

5.3 Mesurages recommandés

5.3.1 Utilisation de dosimètres à lecture différée

Les dosimètres à lecture différée intègrent des doses sur une période donnée. Les technologies utilisées actuellement pour ces dosimètres sont les suivantes :

- dosimètres thermo-luminescents TLD ;
- dosimètres radio-photoluminescence RPL ;
- dosimètres par luminescence optiquement stimulée OSL ;
- dosimètres par chambre d'ionisation.



Figure 37 - dosimètres utilisant différentes technologies avec de gauche à droite : TLD (Dosilab), RPL (IRSN), OSL (Landauer) et chambre d'ionisation (Mirion)

Ces technologies ne sont a priori pas sensibles à la durée du pulse, de plus leur mise en œuvre est simple et rapide.

Les principaux inconvénients peuvent être une limite de détection relativement élevée et le délai nécessaire pour obtenir les résultats (nécessité d'intégration sur une période plus ou moins longue pour garantir un résultat significatif, auquel s'ajoute le délai nécessaire à la lecture du dosimètre).

Les membres du GT considèrent que l'utilisation de dosimètres à lecture différée est le moyen de mesure à privilégier, que ce soit pour réaliser les vérifications initiales ou périodiques dans une installation dans laquelle sont émis des champs pulsés ou pour vérifier la délimitation en zone de celle-ci. Ce moyen pourrait être complété par l'utilisation d'appareils de mesures à chambre d'ionisation en mode intégration pour limiter le nombre d'essais à mettre en œuvre afin d'atteindre des doses plus faibles que la limite de détection des dosimètres à lecture différée.

5.3.2 Mesures avec des appareils en mode intégration

Il peut être intéressant, lors de la réalisation de mesures, de disposer rapidement des résultats (vérification d'une zone d'opération, par définition temporaire, caractéristiques de l'installation mal connues ne permettant pas d'estimation fiable des niveaux d'exposition...). Dans ce cas, la mesure par dosimétrie à lecture différée peut ne pas être la plus pertinente et une mesure avec un radiomètre pourrait être plus adaptée.

Comme il est exposé dans le chapitre 5.2, parmi les radiomètres couramment utilisés, les chambres d'ionisations représentent une technologie particulièrement intéressante pour la mesure en champs pulsés. En effet, le fonctionnement de ces appareils, qui consiste à collecter les charges créées lors de l'interaction d'un rayonnement ionisant avec le gaz du détecteur est, en mode intégration, indépendant de la durée du pulse d'émission de ces rayonnements ionisants. La durée pendant laquelle les charges sont créées et le temps de collecte de celles-ci n'influent pas sur la mesure de la dose. Il ne faut toutefois pas négliger (et donc prendre en compte) les inconvénients possibles liés en particulier au volume du détecteur.

Les stylos dosimètres (qui se rapprochent des électromètres associés à une chambre d'ionisation) restent également une solution possible pour la détection d'impulsions brèves.

Il convient de souligner que ces solutions ne sont valables que pour des installations entraînant des doses compatibles avec la plage de mesure des appareils (au-dessus du seuil de détection et en-dessous de la limite de saturation).

Lorsqu'une dose par pulse est faible, il est nécessaire d'intégrer une série de pulses, ce qui peut engendrer des temps de mesure longs en fonction de la fréquence de ces pulses. Enfin, il est important de noter qu'il est quasiment impossible pour ce type d'appareil de réaliser une mesure acceptable du débit crête d'une impulsion si la durée de celle-ci est inférieure à la dizaine de ms.



Figure 38 différents radiomètres de type chambre d'ionisation. De gauche à droite : mini smart ION (Thermo Scientific), RAMION (ROTEM), 451P (Fluke Biomedical)

5.3.3 Les nouveaux appareils et les appareils en cours de développement

5.3.3.1 Appareils commercialisés ou en phase de l'être

L'utilisation d'équipements émettant des champs de rayonnements pulsés étant de plus en plus répandue, des appareils de mesures pour lesquels les fabricants/fournisseurs mettent en avant leur capacité de détection en champs pulsés commencent à voir le jour : l'AT1123 pour APVL, le Raysafe 452P de chez FLUKE, l'IC3 de la société ROTEM, appareil en cours de développement chez Berthold...

Toutefois, en l'absence d'installation adaptée aucun de ces appareils ne peut, pour le moment, être étalonné en champ pulsé. De même, comme indiqué précédemment, leur vérification est le plus souvent réalisée à l'aide d'une source radioactive ou dans un champ de rayons X constant.

Les membres du GT estiment qu'il est nécessaire que le domaine de fonctionnement des appareils de mesure vis-à-vis des champs pulsés soit précisé dans la documentation technique (durée des impulsions, durée du train d'impulsion, débits de dose crête...). En particulier pour les appareils dont la capacité de mesure des champs pulsés est mise en avant.

En l'absence de ces informations, il reviendra aux utilisateurs, éventuellement en concertation avec les fournisseurs, de s'assurer que les appareils sont bien adaptés aux champs de rayonnements de leur installation (intercomparaison avec un instrument de mesure de référence - chambre d'ionisation, stylo

dosimètre ou dosimètre à lecture différée - ou avec des codes de calcul éprouvés et utilisés par des personnels dûment formés).

5.3.3.2 Appareils en cours de développement

Les détecteurs « diamants », utilisés principalement en radiothérapie pour mesurer la dose délivrée, ne peuvent pas, à l'heure actuelle, être considérés comme des appareils de radioprotection « grand public ». Toutefois, les recherches autour de cette technologie s'intensifient fortement ces dernières années avec des projets européens (MAESTRO^[47], MetrExtRT^[48] et le projet de l'Agence Nationale de Recherche (DIADOMI^[49]).

La possibilité d'utiliser le matériau semi-conducteur diamant est de plus en plus considérée dans d'autres domaines : la physique des hautes énergies (monitorage faisceau, détection de MIP⁵⁰), la physique nucléaire (détection de fragments de fission ou neutrons) et les applications environnementales (radioprotection et surveillance de sites « chauds »).

Cette technologie, capable de réaliser des mesures en champs pulsés, devrait permettre, à terme, d'élargir le domaine de fonctionnement des appareils de mesure en radioprotection en champs pulsés, même si la gamme des pulses couverts par ce type de détecteur reste à affiner.

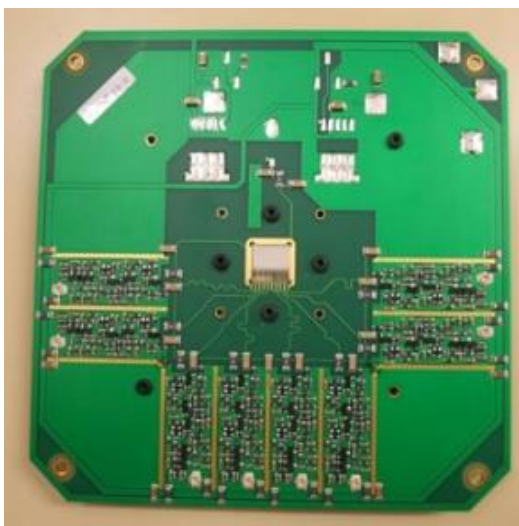


Figure 39 - Détecteur diamant développé au LPSC dans le cadre du projet CLARYS UFT

^[47] Projet Maestro «*Methods and advanced equipment for simulation and treatment in radio-oncology*»

^[48] *Metrology for radiotherapy using complex radiation fields*

^[49] Développement d'un dosimètre Diamant pour une mesure de la Dose absorbée dans les Mini-faisceaux utilisés en radiothérapie stéréotaxique

^[50] *Minimum Ionising Particle*

5.3.4 Autres problématiques

La dosimétrie opérationnelle

En plus des études d'intercomparaison réalisées sur les dosimètres opérationnels (cf. § 5.2.1), un rapport EURADOS^[51] soulève par ailleurs des questions en indiquant que des travaux sont encore nécessaires dans ce domaine : « *Les dosimètres personnels actifs (DPA) peuvent être utilisés dans de nombreuses situations d'exposition professionnelle. Cependant, leurs performances doivent correspondre aux conditions dans lesquelles ils sont utilisés, ce qui est particulièrement vrai pour certaines applications médicales des rayonnements ionisants telles que les procédures guidées par fluoroscopie.*

Par conséquent, ils doivent être testés pour tous les domaines pertinents dans lesquels ils sont utilisés. Par exemple, leur réponse sur le débit de dose, la réponse dans les champs pulsés, ainsi que la dépendance angulaire ou énergétique doivent être étudiées. Les procédures pour tester les DPA dans des champs de rayonnement réalistes doivent être établies. »

Le GT souligne que plus la durée des pulses sera courte, plus la possibilité de disposer de dosimètres opérationnels réalisant des mesures acceptables sera difficile, voire impossible.

Trois situations ont été identifiées par le GT lors de l'utilisation de dosimètres opérationnels dans un champ pulsé :

- la durée des pulses est suffisamment longue (de l'ordre de la centaine de millisecondes, en fonction des dosimètres opérationnels) et les performances des dosimètres opérationnels sont adaptées aux conditions dans lesquelles ils sont utilisés, les réponses en dose et en débit de doses sont correctes. Cette situation est normale, elle n'appelle pas de remarque de la part des membres du GT ;
- la durée des pulses est brève (de l'ordre de la centaine de nanosecondes en fonction des dosimètres opérationnels) et les performances des dosimètres opérationnels ne sont plus adaptées aux conditions dans lesquelles ils sont utilisés, les réponses en dose et débit de doses sont erronées (de manière générale les valeurs seront fortement sous-estimées) - les dosimètres sont tout de même capables de détecter les pulses et la fonction alarme des dosimètres peut être utilisée.
- dans ce cas, **le GT estime que, lorsque la réglementation impose le port d'un tel dispositif, celui-ci soit maintenu. Le dosimètre ne sera alors qu'un outil d'alerte en cas d'exposition non maîtrisée, la valeur affichée par le dosimètre ne devant pas être utilisée pour l'estimation de la dose efficace ou l'optimisation de la radioprotection ;**
- la durée des pulses est si brève que les dosimètres opérationnels ne sont pas capables de détecter les pulses, aucune mesure ne peut alors être réalisée. Dans ce cas, **le GT estime que, même si la réglementation impose le port d'un tel dispositif, il serait souhaitable de ne pas l'utiliser afin de ne pas donner un sentiment de « sécurité » aux utilisateurs. Une attention particulière devra être portée aux règles de sécurité afin de palier à l'absence d'alerte du dosimètre.**

^[51] EURADOS Report 2020-04 : *Visions for Radiation Dosimetry over the Next Two Decades - Strategic Research Agenda of the European Radiation Dosimetry Group* : Version 2020

La calibration des appareils

Comme il a été précédemment indiqué, il n'existe quasiment aucune structure capable de réaliser une vérification des appareils de mesure avec des sources de rayonnements émettant des champs pulsés.

Pour les champs pulsés utilisés en diagnostic médical (durée d'impulsion de l'ordre de la dizaine de ms), seuls deux établissements ont été identifiés : le LNHB, qui a établi des références primaires et peut donc étalonner des appareils de mesure dans ce type de champ, et la société SOFIMAE – MEDIXLAB qui travaille en partenariat avec le CEA-LNE-LNHB qui peut également réaliser cette prestation.

Pour certains champs pulsés de durées inférieures, le LNHB a fait des propositions pour établir une traçabilité à leurs références primaires existantes. Actuellement, elles ne sont pas mises en œuvre par les sociétés réalisant l'étalonnage et la vérification des appareils de radioprotection.

Dans ce cas, l'utilisateur de l'installation émettant des champs pulsés pourra procéder lui-même à la vérification de ses appareils de mesure, dans sa propre installation, en utilisant par exemple des dosimètres à lecture différée comme référence. Mais cette possibilité peut trouver des limites, notamment pour des installations de recherche dans lesquelles les caractéristiques du champ pulsé sont susceptibles d'être modifiées à chaque expérience.

Des problématiques peuvent également survenir dans des installations plus « classiques », liées à la stabilité et la reproductibilité du champ de rayonnement.

Les interférences électromagnétiques

Bien que les interférences électromagnétiques ne soient pas des phénomènes spécifiques ou systématiques lors de l'émission de rayonnements ionisants en champ pulsé, elles restent tout de même fréquentes sur certains types d'équipement (klystron, magnétron...). Cette problématique sera donc éventuellement à prendre en compte pour les appareils de mesure avec des solutions de blindage de l'électronique à mettre en place, des protections dans des cages de Faraday, la mise en place de tresse de masse, etc...

L'activation des matériaux

L'activation des structures et matériaux environnants reste par ailleurs une problématique dont il faudra tenir compte, notamment lors des accès à la zone concernée (réalisation de mesures gamma). **Cependant, cette problématique (évoquée pour mémoire) n'appelle pas de recommandations de la part du GT, car l'émission due aux produits d'activation est continue.**

6 Constats et recommandations

Pour rappel, l'objectif est d'élaborer une méthodologie générale pour la réalisation des zones délimitées contrôlées ou des zones d'opération pour les équipements de travail à champ pulsé. Cette méthodologie doit être opérationnelle et tenir compte :

- des caractéristiques techniques et de fonctionnement des équipements ;
- des capacités techniques de l'appareil et de l'installation ;
- des conditions de travail et d'utilisation réalistes.

La saisine demande par ailleurs de préciser des critères de délimitation des zones contrôlées orange et rouge et de définir les modalités de mesurage nécessaires à leur définition.

Au cours de ses différentes réunions et auditions, le GT a fait une série de constats partagés dont plusieurs conduisent à des recommandations formulées ci-après.

6.1 Appréhender et définir les champs pulsés

6.1.1 Quelle définition ?

De manière générale, un "champ pulsé" correspond à une émission de rayonnements ionisants de courte durée, par opposition à une émission en continu.

Le GT constate cependant qu'il n'y a pas de définition dans la réglementation française qui permette de caractériser ce type d'émission.

Après une recherche bibliographique, le GT a toutefois relevé des éléments d'intérêt provenant de divers documents français et d'un document ISO, lui permettant de proposer une telle définition.

Sur cette base, le GT formule une 1^{ère} recommandation :

Recommandation n°1 du GT

Le GT constate que le critère des 10 secondes, en tant que durée maximale d'émission à débit constant à considérer pour définir un champ pulsé, fait l'objet d'un consensus dans les différents documents consultés.

Le GT considère que ce critère est satisfaisant, dans le sens où il est basé sur les capacités techniques des appareils de mesure actuels.

Le GT propose ainsi la définition suivante pour caractériser une émission en champ pulsé : « un rayonnement ionisant émis par un équipement de travail, ayant un débit d'équivalent de dose variable (pulse ou modulation) pendant des intervalles de temps inférieurs à 10 secondes. »

6.1.2 Quelle grandeur dosimétrique ?

Sur la base du retour d'expérience des acteurs de terrain, le GT constate l'emploi de multiples expressions pour caractériser l'intensité de rayonnements émis dans le contexte des champs pulsés, qui peuvent porter à confusion et se révéler être source de difficultés d'interprétation.

Sur ce constat, et même si cela relève de grandeurs opérationnelles, le GT formule une 2^{ème} recommandation, laquelle pourrait être utilement portée dans un guide.

Recommandation n°2 du GT

Pour ce qui concerne les impulsions uniques et les trains d'impulsion, afin d'éviter l'utilisation des concepts de débits de dose ou de débits d'équivalent de dose moyen, instantané, de crête, etc..., parfois compliqués à déterminer pour des champs pulsés, le GT recommande de se baser sur la notion de dose par pulse (à traduire en dose efficace), à multiplier ensuite par le nombre de pulses délivrés en une heure/en un mois pour obtenir la dose efficace intégrée sur une heure/un mois, à comparer ensuite aux valeurs réglementaires figurant dans le code du travail en fonction de l'utilisation prévue pour l'appareil (installation ou chantier).

Concernant les émissions en champs modulés, une approche similaire est adoptée en déterminant la dose efficace intégrée au cours d'une émission et en tenant compte du nombre d'émissions sur une période d'une heure/d'un mois.

Il est à noter que l'information relative à la dose par pulse dans le faisceau, pouvant être facilement communiquée par le fabricant/fournisseur, devra dans certains cas être complétée par la dose par pulse dans le rayonnement diffusé.

Recommandation 3 du GT

Pour ce qui concerne le nombre de pulses délivrés en une heure/un mois, il est bien précisé dans la saisine que la méthodologie tiendra compte des conditions de travail et d'utilisation réalistes.

Ainsi, comme pour les autres équipements de travail, le GT recommande de se placer dans les conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes, et non dans les conditions maximales de fonctionnement de l'appareil.

6.1.3 Maîtriser la nature du champ pulsé

La démarche d'évaluation des risques nécessite d'avoir une bonne connaissance de la source de danger et elle commence par une approche documentaire. Les fabricants/fournisseurs d'un tel équipement se doivent de fournir aux futurs responsables détenteurs les éléments essentiels le caractérisant.

A minima, les paramètres suivants (intrinsèques à la machine) permettant de caractériser les émissions en champ pulsé doivent être maîtrisés par les utilisateurs :

- le type d'impulsion (impulsion unique, train d'impulsions, champ modulé) ;
- la durée totale de l'émission ;
- la durée/largeur des impulsions ;
- la dose maximale par impulsion ;
- la fréquence de répétition dans une séquence d'émissions (cadence/période) ;
- les capacités intrinsèques de la machine (nombre maximal de pulses par heure...) ;
- les éléments de verrouillage éventuellement installés par le fabricant.

Recommandation 4 du GT

Le GT constate que les informations documentaires associées à ce type d'appareil en particulier et servant à l'évaluation des risques sont souvent limitées, voire absentes.

Le GT recommande ainsi aux autorités compétentes d'obtenir que les fabricants/distributeurs fournissent, dans leur documentation technique, les caractéristiques des émissions produites permettant de déterminer in fine la dose efficace pour une séquence d'émission. Il s'agira à titre d'exemple :

- *du type d'impulsion (impulsion unique, train d'impulsions, champ modulé) ;*
- *de la durée totale de l'émission ou du nombre total d'impulsions par unité de temps ;*
- *de la durée/largeur des impulsions (Δt) ;*
- *de la dose maximale par impulsion ;*
- *des capacités intrinsèques de la machine (nombre maximal de pulses par heure...).*

6.2 Effets biologiques et concepts en radioprotection

La période actuelle se caractérise par un développement technologique d'équipements de travail à champs pulsés avec des intensités de rayonnement extrêmement élevés. L'illustration avec la radiothérapie flash en est un bon exemple, présenté comme très prometteur par des publications récentes (cf. § 3.2.2 et suivant).

Délivrer des doses très fortes sur un temps extrêmement court pourrait-il engendrer des effets biologiques insoupçonnés – aggravation ou réduction des effets néfastes - et, incidemment, questionner le système de radioprotection ?

Les effets décrits au travers de la radiothérapie flash font actuellement débat. Cependant, globalement et comparativement avec la radiothérapie conventionnelle, les données de la littérature soulignent plutôt un effet bénéfique. Alors que la dose totale délivrée reste du même ordre de grandeur dans les deux types de traitements thérapeutiques, la grande distinction porte sur le débit de dose, au moins de 3 ordres de grandeurs supérieurs pour la radiothérapie flash.

En première approche, cela pourrait paraître paradoxal et aller à l'encontre des notions acquises en matière d'effets biologiques des rayonnements ionisants, lesquelles suggèrent que, à dose égale, les effets néfastes radio-induits sont moindres si la dose est délivrée avec un débit de dose plus faible (dose aiguë vs dose chronique).

Sur la base des données de la littérature qu'il a explorées ainsi qu'une audition de chercheurs, le GT constate un défaut de connaissance quant à une éventuelle modification des effets biologiques radio-induits dans un tel contexte d'exposition.

Compte-tenu de l'enjeu, le GT formule la recommandation suivante :

Recommandation n°5 du GT

Compte tenu du développement actuel des équipements de travail émettant des rayonnements ionisants de façon très intense sur des temps extrêmement courts, le GT s'est penché sur la question des effets biologiques insoupçonnés (aggravation ou réduction des effets néfastes), qui n'a pas pour l'heure de réponse mais fait uniquement l'objet d'hypothèses.

Le GT estime qu'il est essentiel que la recherche en radiobiologie approfondisse cette question et recommande que les répercussions possibles sur le système de radioprotection soient traitées par les instances concernées.

6.3 Diversité des applications

Le GT a mené un travail d'investigation en vue d'établir un panorama actualisé des équipements à champs pulsés, sans prétendre qu'il soit exhaustif. Il en ressort une grande diversité de matériels avec des caractéristiques propres extrêmement variables selon les applications, notamment en ce qui concerne la durée d'un pulse, l'intensité de rayonnement par impulsion et les temps d'émission lorsqu'il s'agit de trains de pulses.

Le chapitre 4 décrit ce panorama pour le secteur médical (volets diagnostic, interventionnel et thérapeutique), où les équipements émettant en champs pulsés sont désormais largement dominants.

Mais ils sont aussi bien présents dans les secteurs industriels et de la Défense pour des applications telles que la radiographie éclair, les contrôles non destructifs ou encore les systèmes radar.

Pour la détection de produits illicites ou de clandestins dans des véhicules de transports de marchandises, les Douanes ont recours à des accélérateurs de particules.

Enfin, le secteur de la recherche présente, sous le terme générique d'accélérateurs, des équipements très spécifiques et parfois uniques.

De ce large panorama, on note des temps d'impulsions qui peuvent aller de quelques centaines de millisecondes (10^{-3}) à quelques nanosecondes (10^{-9}), voire quelques picosecondes (10^{-12}). Durant ce pas de temps, les débits de doses (exprimés en $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$) peuvent être considérables.

Face à une telle diversité des équipements de travail, de leurs caractéristiques intrinsèques et de leurs conditions d'utilisation, l'encadrement réglementaire certes incontournable doit cependant viser avant tout des objectifs généraux de prévention et de protection et renvoyer d'éventuelles mesures spécifiques vers des guides techniques ou professionnels.

Sur le constat d'un tel panorama, le GT formule la recommandation suivante :

Recommandation n°6 du GT

Le GT constate le développement croissant d'équipements de travail de plus en plus complexes, qui peuvent néanmoins représenter des sources de danger important en cas de non maîtrise.

De manière générale, compte tenu de la grande diversité des équipements de travail étudiés dans le cadre de cette saisine, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire, de viser avant tout des objectifs généraux de prévention et de protection des travailleurs, replaçant l'employeur face à ses responsabilités, et de renvoyer d'éventuelles mesures spécifiques vers d'autres outils non réglementaires.

Le GT considère ainsi que l'élaboration de guides sectoriels, impliquant fortement les acteurs de la radioprotection dans les secteurs concernés, pourrait constituer l'outil adapté et évolutif au regard des retours d'expérience.

6.4 Problématique du mesurage

La possibilité de mesurages pour des émissions en champs pulsés a été un point essentiel dans les réflexions du GT. Elle est également un élément déterminant dans la démarche d'évaluation des risques.

C'est pourquoi le GT s'est d'abord tourné vers les fabricants/fournisseurs d'appareils de mesurage des rayonnements ionisants en leur adressant un questionnaire, dont les retours sont traités dans le chapitre 5.

Il ressort de ces investigations les constats importants suivants :

- au-delà de la valeur de 10 secondes, retenue par le GT en tant que durée maximale d'émission à débit constant à considérer pour définir un champ pulsé, la grande majorité des radiomètres disponibles sur le marché sont capables de fournir une mesure fiable, que ce soit en dose ou en débit d'équivalent de dose ;
- en dessous de cette valeur de 10 secondes, la fiabilité des résultats de mesure des radiomètres va dépendre de plusieurs paramètres :
 - les caractéristiques du champ pulsé (en particulier le type d'impulsion et la durée totale de l'émission, la durée des impulsions ainsi que les débits de dose crête) ;
 - le type de détecteur utilisé (chambre d'ionisation, scintillateur plastique, semi-conducteur...) ;
 - la technologie utilisée pour le traitement du signal (numérique, analogique).

Dès lors, il faudra impérativement s'assurer que l'appareil utilisé soit bien adapté aux caractéristiques de l'émission.

Pour des durées d'impulsions inférieures à 10 millisecondes, peu d'appareils basés sur une électronique sont capables de donner avec exactitude une information en débit d'équivalent de dose.

Ces constats sont d'autant plus importants que le panorama des équipements de travail rapporté au chapitre 4 montre que ceux-ci ont le plus souvent des durées d'impulsion (unique ou répétée) inférieures à 0,1 s.

A cela s'ajoute la question toute aussi essentielle de l'étalonnage et, incidemment, celle de la vérification de l'étalonnage. Sur ce point, les fabricants/fournisseurs reconnaissent que l'étalonnage n'est réalisé que dans des champs de rayonnements en émissions continues (les sources de référence de ¹³⁷Cs et de ²⁴¹Am étant les plus couramment utilisées). Quant aux sociétés spécialisées dans les vérifications d'étalonnage, elles admettent qu'aucune vérification d'instrument de mesure n'est effectuée en champ pulsé de référence.

En définitive, les possibilités de mesure en champ pulsé reposent pour l'essentiel sur des mesures intégrées dans le temps à l'aide d'outils tels les chambres d'ionisations ou encore des dosimètres intégrateurs à lecture différée, sachant que dans certains cas particuliers il sera nécessaire de recourir à des outils spécifiques de modélisation.

Sur la base de ces constats, qui soulignent les limites des mesurages en champ pulsé, le GT formule la recommandation qui suit.

Recommandation n°7a du GT

Le GT constate les limites importantes du mesurage en champ pulsé. Aussi, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à ne pas réintroduire les dispositions antérieures portant sur des mesurages en débit d'équivalent de dose ou encore des mesurages intégrés sur 1 seconde pour ce qui concerne les champs pulsés.

Le GT invite les administrations à renvoyer sur des guides sectoriels, toute modalité pratique relative à la métrologie lorsqu'il s'agit d'émissions non continues dont la durée d'impulsion est inférieure à 10 secondes.

Recommandation n°7b du GT

Le GT recommande que les fabricants/distributeurs d'appareils de mesure fournissent des informations détaillées concernant les conditions d'utilisation de leurs appareils et leurs limites, y compris pour les dosimètres opérationnels.

Recommandation n°7c du GT

Le GT recommande que la recherche en dosimétrie et en métrologie soit soutenue en vue de mettre à disposition des appareils de mesure adaptés à ces émissions particulières.

6.5 La formation

Des rapports antérieurs produits au sein du GPRADE (sur saisine ASN/DGT) avaient souligné la grande disparité de niveau parmi les formations PCR.

Cette disparité demeure et on observe que le volet « accélérateur » (dans l'option « sources scellées ») est parfois réduit voire inexistant.

Par ailleurs, le défaut de moyens matériels (en appareils, sources et équipements) conduit à une formation en métrologie des rayonnements ionisants également réduite dans certaines formations.

Ce constat prend toute son importance en écho aux difficultés et limites de mesurage en champ pulsé évoquées précédemment (cf. § 5).

A cet égard, le GT formule la recommandation qui suit.

Recommandation n°8 du GT

Compte tenu, d'une part, du développement croissant d'équipements de travail émettant des rayonnements en champ pulsé et, d'autre part, sur le constat des lacunes dans le domaine de la formation, le GT suggère que des formations spécifiques à ces équipements soient développées, avec un approfondissement sur le volet métrologique.

Le GT considère que l'élaboration de guides sectoriels (évoquée dans les précédentes recommandations) pourrait constituer un outil de référence dans le cadre de telles formations à la charge de l'employeur.

6.6 Le REX de l'international

Dès le début de ses travaux, le GT a jugé utile de s'enquérir des réflexions analogues dans d'autres pays, en matière de radioprotection autour d'équipements de travail émettant des champs pulsés, afin de profiter d'un éventuel retour d'expérience de la scène internationale.

Les réponses obtenues, malgré plusieurs relances, n'ont malheureusement pas apporté d'information utile, donnant le sentiment d'une réflexion essentiellement franco-française sur ce sujet, même si certaines administrations étrangères n'ont pas manqué de demander en retour de leur faire part du résultat des travaux du GT.

6.7 Le zonage radiologique hors ZO et ZR

Les nouvelles dispositions réglementaires introduites par le décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 et la modification de l'arrêté « zonage » en février 2020 constituent une réelle simplification de la délimitation des zones surveillées et des zones contrôlées verte et jaune dans le cadre d'installations fixes. Le passage à un pas de temps mensuel (en remplacement de l'heure la plus pénalisante), comme critère pour l'analyse de risque, et la réduction à une seule zone pour les extrémités ont rendu la disposition plus adaptée et plus opérationnelle pour les acteurs de la radioprotection.

Il en est de même pour les zones d'opération, qui constituent l'équivalent d'une zone contrôlée verte pour des équipements mobiles.

Les évaluations - tant pour l'exclusion de certains appareils mobiles que pour la délimitation en périphérie - portant sur la dose efficace intégrée sur 1 heure ont là aussi rendu le dispositif réglementaire plus opérationnel.

Dans les deux situations (installations fixes et mobiles), le GT n'a pas observé de retours critiques de la part des acteurs de la radioprotection présents sur le terrain.

Une mesure intégrée en dose efficace durant les pas de temps indiqués étant de fait réalisable sans difficulté.

Sur ce constat, le GT formule la recommandation suivante :

Recommandation n°9 du GT

Compte tenu du retour d'expérience sur le dispositif actuel de délimitation en zones et tenant compte d'une demande de stabilisation de la réglementation, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à conserver les dispositions en vigueur encadrant le zonage radiologique (autre que les zones orange et rouge) tant pour les installations fixes que pour les équipements mobiles.

6.8 La délimitation des zones orange et rouge

Le point central de la saisine DGT/ASN porte sur le (ou les) critère(s) de délimitation entre les zones orange et rouge, dans le contexte d'émissions en champs pulsés, suite aux modifications apportées sur ce point par le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021.

Le positionnement du GT a pu être établi au terme de différents constats, qu'il est utile de résumer ici :

- le premier critère de délimitation - basé sur la dose efficace intégrée sur 1 heure - est globalement appliqué dans les différents secteurs, même si parfois l'approche méthodologique peut être confortée pour les champs pulsés (cf. § 5 et 6.1) ;
- le second critère instauré par le décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 - basé sur une dose efficace moyennée sur une seconde - n'a globalement pas été mis en œuvre, notamment dans le secteur médical où ces équipements de travail sont nombreux. L'intérêt de ce second critère n'a en effet pas été perçu par les acteurs de la radioprotection mais ensuite - et surtout - les limites très fortes de possibilité de mesurage (cf. § 5) en champs pulsés et les lacunes en matière de formation (cf. § 6.5) ont rendu l'application de cette disposition non opérationnelle ;
- enfin, compte tenu du fait que dans de nombreuses applications les émissions de rayonnements ionisants peuvent être d'une très grande intensité mais sur des durées extrêmement courtes, le GT s'est interrogé sur la justification possible d'une telle disposition (2nd critère) en regard de potentiels effets délétères. En l'état actuel des connaissances, les données de la littérature ne permettent pas de conclure quant à un effet biologique radio-induit, dans un tel contexte d'irradiation, que ce soit dans un sens aggravant ou dans un sens bénéfique.

Fondée sur ces constats, le GT formule la recommandation suivante :

Recommandation n°10 du GT

En réponse à la saisine DGT/ASN, le GT invite les administrations compétentes en charge d'élaborer le cadre réglementaire à conserver en l'état les dispositions introduites par le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 encadrant le zonage radiologique, notamment pour ce qui concerne la délimitation entre les zones orange et rouge.

Le GT a conscience qu'il peut subsister dans certains secteurs et pour des applications particulières des lacunes ou difficultés dans l'application des dispositions en vigueur. Aussi, il suggère de reporter les clarifications utiles en termes d'approche méthodologique et d'outils à mettre en œuvre dans les guides sectoriels précédemment évoqués.

6.9 Méthodologie générale opérationnelle pour la délimitation des zones et la vérification de leurs conformités

L'évaluation des risques au préalable repose en priorité sur une approche documentaire. L'employeur, avec l'aide du salarié compétent ou du conseiller en radioprotection, devra obtenir les informations relatives aux caractéristiques de l'appareil émettant des rayonnements en champs pulsés. Dans le cadre de la délimitation de zones, la valeur de dose par pulse devra être obtenue (par l'intermédiaire du fabricant, du distributeur, sur la base de données provenant de la littérature ou de retour d'expérience).

Si cette valeur n'est pas connue, elle devra être mesurée soit à l'aide de techniques d'intégration (méthode à privilégier et à justifier en fonction des caractéristiques du champ pulsé), soit à l'aide de techniques actives de mesures de débits d'équivalents de dose (leur mise en œuvre devra être particulièrement justifiée en fonction des caractéristiques du champ pulsé). Dans le cas où la mesure ne serait pas possible, des codes de calculs de transports et d'interaction de particules pourront être utilisés. Il sera toutefois nécessaire de s'assurer de l'adéquation du code utilisé avec les paramètres physiques du champ pulsé (domaine d'énergie, types de particules et interactions possibles...). Leur mise en œuvre devra être assurée par des personnes ayant la compétence et l'expérience nécessaires.

À partir de la valeur de dose par pulse obtenue, la délimitation de zones a priori se basera sur les conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes, afin de déterminer la dose efficace intégrée sur une heure/ un mois et de comparer la valeur obtenue aux valeurs réglementaires. Cette démarche est synthétisée en page suivante sous la forme d'un logigramme.

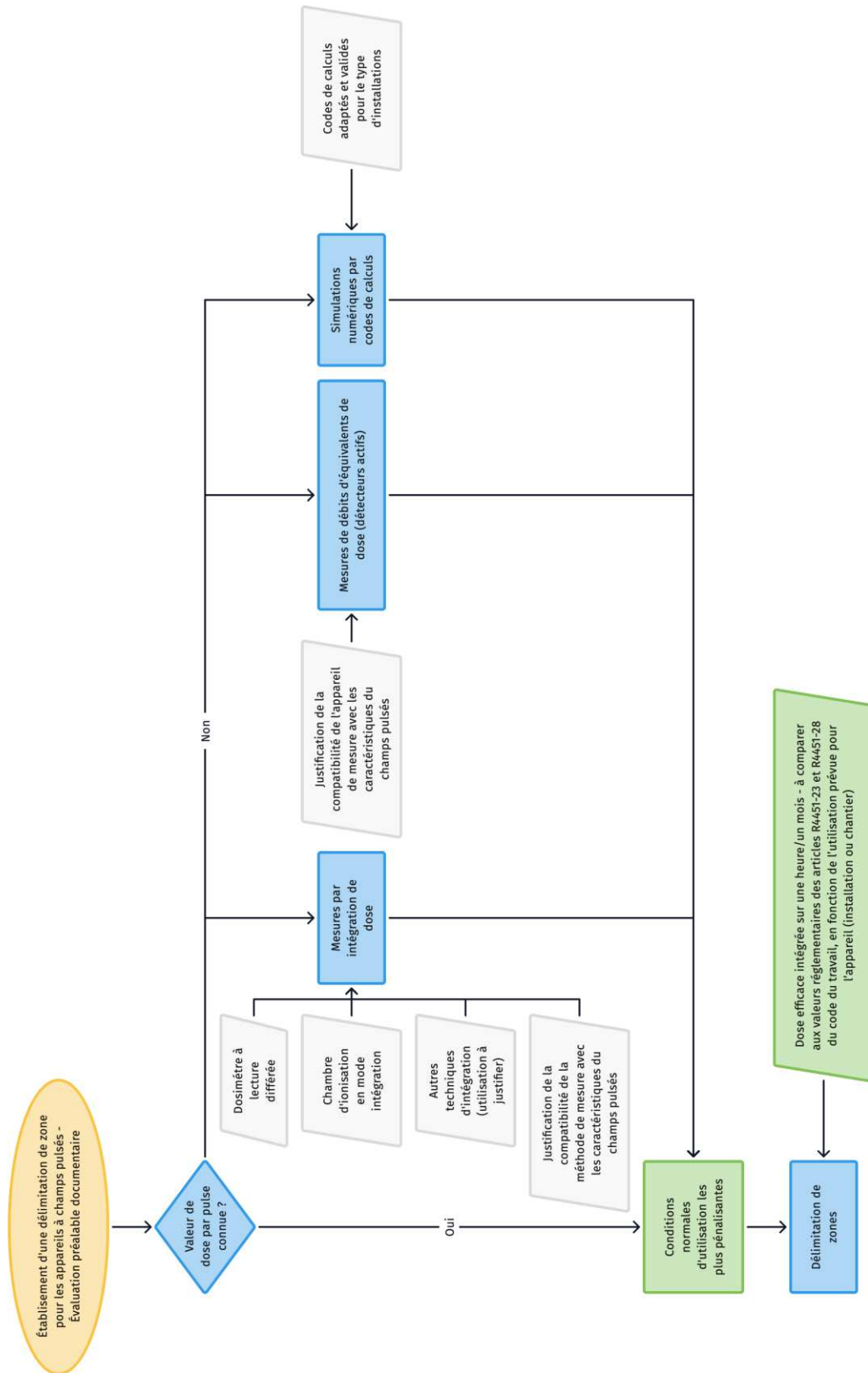


Figure 40 - Méthodologie générale opérationnelle pour la délimitation de zones a priori (Les recommandations du GT sont reprises dans les formes sur fond vert)

En fonction des résultats de l'évaluation préalable des risques et de la délimitation de zones a priori, plusieurs cas de figures sont à prendre en compte pour la réalisation des vérifications initiales et périodiques.

Dans le cas d'une zone à accès interdit lors de l'émission de rayonnements ionisants, les vérifications initiales et périodiques par mesurage au sein des lieux de travail ne sont pas nécessaires. La conception de l'installation doit alors prévoir les dispositifs de protection et de signalisation permettant de garantir l'absence de travailleurs dans les zones à accès interdit, dès lors que l'émission de rayonnements est possible. Cette conception - relevant de la sûreté et donc des rapports préliminaires de sûreté - doit reposer sur des normes existantes ou sur des spécifications réglementaires. Lors de l'émission de rayonnements ionisants, les vérifications initiales et périodiques des zones attenantes et des dispositifs de protection et de signalisation sont à réaliser, en utilisant préférentiellement des mesures par intégration de dose. La mesure de débits d'équivalents de dose devra être dûment justifiée sur la base des paramètres physiques du champ pulsé. Les vérifications initiales et périodiques seront réalisées dans la zone concernée afin de vérifier la délimitation une fois l'émission des rayonnements ionisants arrêtée, en particulier lors de l'existence de risques d'activation de matériaux. Dans cette configuration, la mesure de débits d'équivalents de dose par détecteur actif est possible.

Si aucune zone à accès interdit n'est mise en place, les vérifications initiales et périodiques seront réalisées au niveau des zones délimitées et attenantes, lors de l'émission des rayonnements ionisants et à l'arrêt.

Comme dans le cas précédent, la mesure par intégration de doses est à privilégier lors de l'émission de rayonnements ionisants en champs pulsés. La mesure de débits d'équivalent de dose devra quant à elle être dûment justifiée en fonction des paramètres physiques du champ pulsé.

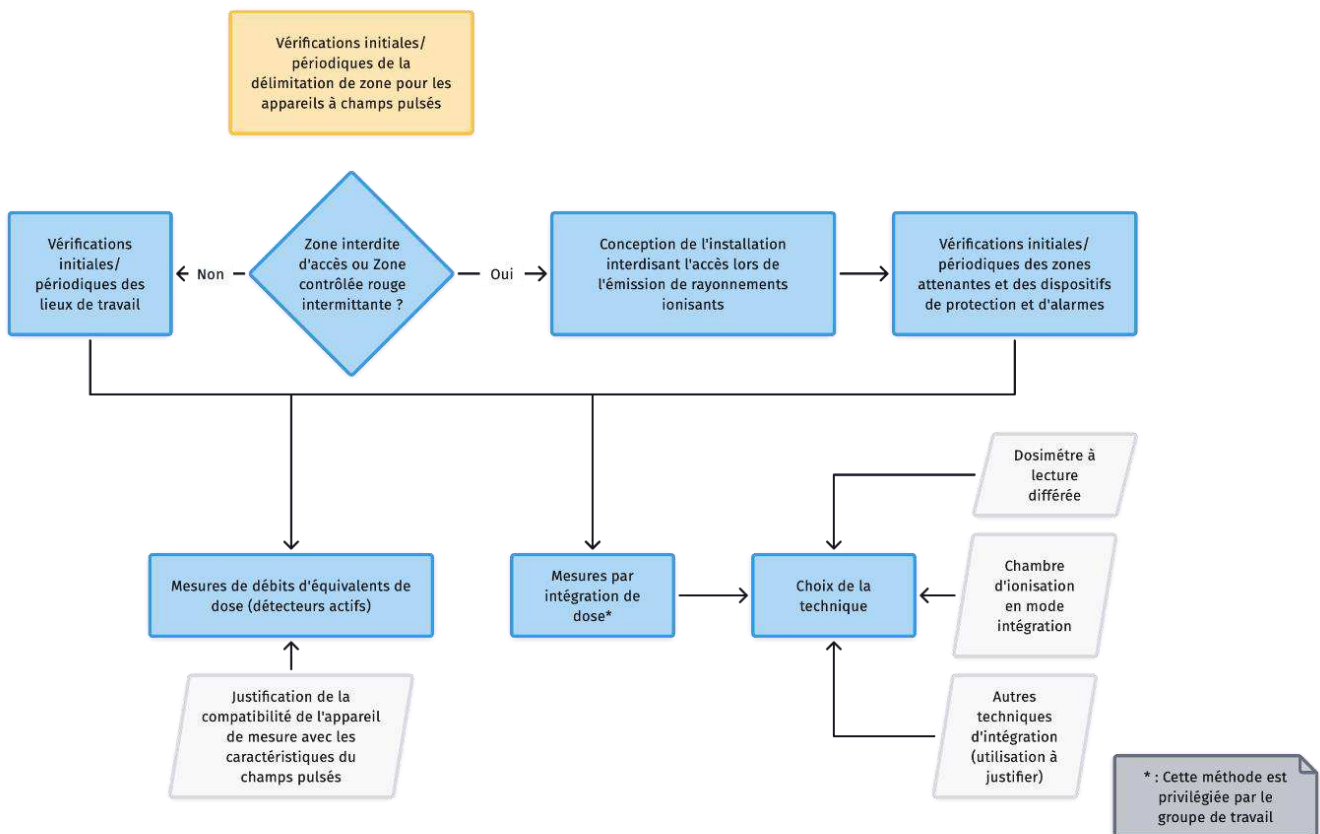


Figure 41 - Méthodologie générale de vérification de la conformité de la délimitation de zones

Recommandation n°11 du GT

De ce point de vue le GT propose que l'approche méthodologique opérationnelle qu'il a développée dans le rapport soit la base pour la délimitation des zones et les vérifications associées ; elle pourrait être ainsi déclinée dans les guides sectoriels précédemment évoqués.

6.10 Commentaire relatif aux vérifications

En établissant le panorama des équipements de travail émettant en champ pulsé, les réflexions du GT l'ont conduit à s'interroger sur les dispositions relatives aux vérifications initiales. Hors INB, celles-ci doivent être effectuées par un organisme vérificateur accrédité.

Même si la saisine ne portait pas sur ce sujet, le GT a estimé utile de porter son point de vue partagé à la connaissance des autorités signataires de la saisine.

Certaines installations disposent d'équipements de travail hautement sophistiqués, relevant d'une technologie éminemment complexe et peu répandue dont la maîtrise du fonctionnement et des dangers en présence repose avant tout sur les personnels œuvrant dans ces mêmes installations. Le GT s'interroge sur l'aptitude et la compétence d'organismes accrédités pour conduire pleinement les vérifications initiales ainsi que le renouvellement des vérifications initiales sur ce type d'installations. Le GT considère que la compétence nécessaire est en interne portée par des personnels qui assurent au quotidien leur propre vérification.

Si le regard externe est toujours utile et source de remise en question, le GT considère qu'une évaluation croisée des dispositifs de vérification en radioprotection par des équipes issues d'établissements possédant des équipements similaires ou proches lors de séminaires ou de journées d'études serait plus pertinente pour garantir un bon niveau de prévention et de sécurité pour les travailleurs.

7 Conclusion générale

En réponse à une saisine conjointe du Directeur général du Travail et du Directeur général de l'ASN, le GPRP a constitué en son sein un petit groupe d'experts en charge d'établir un rapport sur les questions posées dans la saisine et de formuler des recommandations.

Au terme de 10 mois de travail intense, le Groupe de travail (dit « GT-Champs pulsés ») présente ici son rapport, comportant en premier lieu :

- un panorama des appareils émettant des rayonnements ionisants en champ pulsé soulignant, d'une part, leur extrême diversité d'application selon les secteurs où ils sont mis en œuvre et, d'autre part, selon leurs caractéristiques techniques propres (type de pulses, fréquence, intensité, durées d'émission...);
- le résultat d'une recherche bibliographique sur ce qui pourrait être la définition d'un champ pulsé ;
- la problématique d'effectuer des mesurages dans un tel contexte ainsi que les difficultés métrologiques associées ;
- le résultat d'une recherche bibliographique pour tenter de cerner les effets biologiques conséquents à une irradiation intense et brève.

A partir des constats qu'il a pu établir au cours de ses investigations multiples, le GT a formulé onze recommandations en évoquant incidemment des besoins particuliers en termes :

- d'informations de la part des constructeurs/fournisseurs, permettant d'engager la démarche d'évaluation des risques ;
- de recherche, tant dans le domaine de la radiobiologie que dans les domaines de la dosimétrie et de la métrologie ;
- de formation appliquée pour les utilisateurs d'appareils de mesure.

En ce qui concerne la question principale posée dans la saisine sur la délimitation des zones orange et rouge, eu égard au manque de justification des critères de dose moyennée sur 1 sec (introduits en juin 2018) mais aussi aux difficultés d'application sur le terrain, le GT recommande de conserver en l'état les dispositions introduites par le décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 encadrant le zonage radiologique et donc de ne pas modifier le contenu du 1° de l'alinéa I de l'article R. 4451-23 du code du travail actuellement en vigueur.

Plus globalement, le GT invite les administrations compétentes à ne pas procéder à d'éventuelles modifications des dispositions actuelles relatives à la délimitation en zone – y compris pour les zones d'opération – qui constituent une simplification du précédent dispositif et pour lesquels le retour d'expérience est positif.

Le GT souligne que l'ensemble des recommandations formulées dans le présent rapport a fait l'objet d'un consensus au sein du Groupe.

Comme invité par la saisine, le GT propose par ailleurs une méthodologie générale opérationnelle de délimitation des zones dans le contexte d'émissions en champ pulsé.

Partant de la démarche d'évaluation du risque radiologique et de la définition retenue pour un champ pulsé, le mesurage repose en premier lieu sur des mesures intégrées de doses (dosimètres à lecture différée, chambres d'ionisations...), dans les conditions normales d'utilisation les plus pénalisantes. Les temporalités prises en compte s'appuient sur les dispositions actuelles pour la délimitation en zone.

S'il y a nécessité, les mesurages complémentaires en débit d'équivalent de dose doivent reposer sur une justification de la compatibilité des méthodes de mesure avec les caractéristiques du champ pulsé.

Enfin, la méthodologie proposée pour les vérifications (initiales et périodiques) doit conforter le dispositif réglementaire et apprécier son absence de dérive, notamment dans le cas d'installations spécifiques dont la conception repose avant tout sur des codes de calculs et des dispositifs de sûreté interdisant tout accès de personnes pendant l'émission.

Le sujet évoqué dans le présent rapport peut paraître à première vue très technique et spécialisé.

Pour autant, eu égard au développement important des équipements de travail émettant en champ pulsé ces deux dernières décennies et l'apparition de techniques nouvelles délivrant des doses intenses sur des temps très brefs (i.e. radiothérapie FLASH...), le Groupe considère qu'il existe en la matière de forts enjeux en radioprotection et souligne par là-même l'importance des recommandations qu'il formule.

8 Annexes

8.1 Annexe 1 – Lettre de mission du GT

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Référence courrier :
CODEP-DIS-2022-018010
Affaire suivie par :
Bertrand LE DIRACH et Jérôme FRADIN
Nicolas MICHEL et Hervé VISSEAU
Tél. : 01 46 16 42 17 / 01 46 16 41 21
01 44 38 24 43
Courriel :
bertrand.le-dirach@asn.fr
jerome.fradin@asn.fr
nicolas.michel@travail.gouv.fr

Montrouge, le 12 avril 2022

à

Monsieur le Président du GPRP

Objet : Saisine portant sur la délimitation des zones applicables aux équipements de travail à champs pulsés

Références : [1] Décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants et non ionisants

Monsieur le Président,

La révision des valeurs à prendre en compte pour le zonage radiologique lors de la préparation du décret du 18 août 2021 [1] n'ayant pas fait l'objet d'un consensus entre les parties prenantes et les partenaires sociaux dans le cas des équipements de travail émettant des rayonnements ionisants à champs pulsés, la direction générale du travail (DGT) a décidé de renvoyer à un arrêté du ministre chargé du travail les modalités de délimitation de zones contrôlées orange ou rouge (2° de l'article R. 4451-23 du code du travail) pour ce type d'équipements.

Au regard de la particularité des rayonnements émis par ce type d'équipements et avant de fixer des dispositions réglementaires pour la délimitation des zones contrôlées orange ou rouge, il conviendrait :

1. d'établir un panorama des appareils concernés détaillant leurs caractéristiques techniques (nombre de pulses, puissance, durée d'émission, sécurité...);
2. d'élaborer une méthodologie générale pour la réalisation des zones délimitées contrôlées ou zones d'opération concernant ces équipements de travail à champs pulsés.

Plus globalement, la méthodologie proposée, qui devra être opérationnelle, devra permettre la délimitation de toutes les zones contrôlées ou des zones d'opération. Elle prendra nécessairement en compte :

- les caractéristiques techniques et de fonctionnement des équipements de travail concernés ;
- les capacités techniques de l'appareil et de l'installation ;
- des conditions de travail et d'utilisation réalistes.

La méthodologie proposée précisera, en particulier, des critères de délimitation des zones contrôlées orange ou rouge, ainsi que les mesurages nécessaires à leur définition. Ces critères pourront être repris dans le cadre réglementaire.

Ces éléments devront être étayés par des exemples détaillant la mise en pratique de cette méthodologie dans des installations (industrielles, médicales...) mettant en œuvre différents types de zones délimitées contrôlées ou zones d'opération.

C'est dans ce cadre que la DGT et l'ASN saisissent le GPRP et suggèrent la constitution d'un groupe de travail pour répondre à cette demande, avec comme échéance le 31 décembre 2022 au plus tard.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de notre considération distinguée.

*L'adjointe à la sous-directrice des conditions
de travail, de la santé au travail et de la
sécurité au travail*



Anne AUDIC

La directrice générale adjointe



Anne-Cécile RIGAIL

Destinataire

- DGT

Diffusion interne

- DIS
- DTS
- MEA

8.2 Annexe 2 – Références et bibliographie

Références

CIPR 1 (1959)

CIPR 60 (1990)

CIPR 103 (2007)

Directive CEEA (Communauté européenne de l'énergie atomique) de février 1959 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des radiations ionisantes

Décret n° 66-450 du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants

Décret n° 67-228 du 15 mars 1967 portant règlement d'administration publique relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants

Décret n° 75-306 du 28 avril 1975 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants dans les installations nucléaires de base

Décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants

Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants

Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants

Décret n° 2021-1091 du 18 août 2021 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants et non ionisants

Arrêté du 15 mai 2006 modifié relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées dites zones délimitées compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants

Arrêté du 1^{er} juin 1990 définissant les méthodes de contrôle prévues par le décret no 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants

Arrêté du 28 janvier 2020 relatif modifiant l'arrêté du 15 mai 2006 modifié relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées

NF 74100 de juin 1981 Appareils de radiologie - Construction et essais - Règles

NF EN 60846 de février 2005 annulée et remplacée par la norme NF EN 60846-1 de mars 2015 : Instrumentation pour la radioprotection - Appareils pour la mesure et/ou la surveillance de l'équivalent de dose (ou du débit d'équivalent de dose) ambiant et/ou directionnel pour les rayonnements bêta, X et gamma - Partie 1 : appareils de mesure et de surveillance portables pour les postes de travail de l'environnement

ISO/TS 18090-1 de 2015 Radioprotection - Caractéristiques des champs de rayonnement pulsés de référence - Partie 1: Radiation de photons

NF M 62-105 de juin 2021 Energie nucléaire - Accélérateurs utilisés dans les domaines industriels et de la recherche : installations

Bibliographie

Rapport de l'institut scientifique de service public Rapport n° 172/2012 Etude du caractère pulsé des rayonnements émis par les systèmes de télécommunication sans fil RP1-RAP-12-00172-WPI-janv (issep.be)

First demonstration of the flash effect with ultrahigh dose rate high-energy X-rays : Radiotherapy and Oncology 166 (2022) 44-50 ; Feng Gao

Normal tissue sparing by flash as a function of single fraction dose : a quantitative analysis, international journal of radiation oncology-biology, physics, Till Tobias Böhlen, may 24, 2022

Mechanisms underlying FLASH radiotherapy, a novel way to enlarge the differential responses to ionizing radiation between normal and tumor tissues, Radiation Medicine and Protection 1 (2020) 35–40, Guangming Zhou

Flash irradiation does not induce lipid peroxidation in lipids micelles and liposomes, radiation physics and chemistry 205 (2023) 110733, Pascal Foidevaux et al

Radiographie à l'aide d'un générateur pulsé de rayons X. Filtrage équilibré pour la mesure de largeur de dose à l'aide d'une diode PIN, J.Cl. Brion, 1996

Revue Chocs (Revue scientifique et technique de la direction des applications militaires) N°38 janvier 2010 et N°47 décembre 2016

Mémoire de stage année 2008 : Université Joseph Fourier – Grenoble Thomas Le Gouefflec Élaboration d'un plan de renouvellement du parc de matériel du département radioprotection de l'Apave nord-ouest

Intercomparaison de dosimètres personnels actifs dans des champs de photons réalistes de la radiologie interventionnelle, WP 7 of CONRAD SG 3-4, (WG 9 - Medical staff Radiation Protection Dosimetry) EURADOS

Étude relative aux moyens de métrologie, et de prévention de l'exposition, pour les équipes NEDEX utilisant les générateurs de rayons X pulsés de type XRS3, EAMEA, 24/06/2019

EURADOS Report 2020-04 : Visions for Radiation Dosimetry over the Next Two Decades - Strategic Research Agenda of the European Radiation Dosimetry Group : Version 2020

