

CAUSES D'ACCIDENTS AUPRÈS DES ACCÉLÉRATEURS ET DISPOSITIONS DE RADIOPROTECTION

Henri JOFFRE, Henry VIALETES *

(Manuscrit reçu le 1^{er} février 1968)

RÉSUMÉ

Les auteurs présentent, tout d'abord, quelques accidents typiques rapportés dans la bibliographie ou survenus dans les Centres de Recherches du C.E.A.

Ces accidents sont analysés pour en préciser la cause principale et en dégager les enseignements.

Enfin les auteurs étudient l'intérêt d'un contrôle centralisé des dispositifs de sécurité, de détection et de signalisation mis en œuvre auprès de tout accélérateur important.

SUMMARY

The authors présent, first, some typical accidents mentioned in bibliography or happened in C.E.A. Research Centers.

The accidents are analysed to precise the main cause and get some expérience.

Then the authors study the interest of a centralized control for security, détection and signalling devices used near every important accelerator.

INTRODUCTION

L'expérience quotidienne montre que l'homme demeure fréquemment inconscient du danger en général. A priori, ce fait devait donc se manifester d'une manière accrue dans le domaine des risques radioactifs dont l'évaluation échappe à nos sens.

Pourtant les écrits établissent que, dès les premières années de l'utilisation des rayons X, les pionniers de cette nouvelle technique en connaissaient souvent les dangers et certains même ont préconisé des règles de protection.

Dès 1897 et les années suivantes, une série de publications [1 à 8] montre les recherches effectuées sur l'action des rayonnements sur les yeux et sur la peau; par exemple, la production de cataracte est connue depuis 1897 [1 à 8].

Dès 1896, E. THOMSON, fabricant de tubes de Crookes, définissait les premières recommandations de radioprotection :

- les rayons X endommagent les tissus,
- l'effet biologique n'est pas immédiatement apparent,

* Service de Protection contre les Radiations. Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, B.P. n° 2, 91 - Gif-sur-Yvette.

- le degré du dommage est en rapport avec la durée d'exposition,
- il y a une limite au-delà de laquelle apparaît un trouble grave,
- l'intensité des rayons diminue comme le carré de la distance à la source.

Malheureusement, malgré la connaissance précoce du danger et des moyens de protection, beaucoup de personnes ne prennent souvent conscience du danger que par la leçon des accidents.

I. QUELQUES ACCIDENTS TYPIQUES SURVENUS AUPRÈS DES ACCÉLÉRATEURS

Quelques accidents, rapportés dans la bibliographie ou dont nous avons eu connaissance, sont indiqués ci-dessous et classés en vue d'en faire apparaître la cause principale.

I.1. ACCIDENTS DUS A UN MANQUE D'INFORMATION DU PERSONNEL

I.1.1. *Méconnaissance des effets biologiques des rayonnements*

a) Un technicien avait l'habitude de déterminer la position correcte de l'échantillon dans le faisceau d'un générateur X à l'aide d'un écran fluorescent tout en se plaçant lui-même devant le faisceau. Une ulcération est apparue sur la peau au niveau de la poitrine. Cette procédure déplorable n'a été découverte que par la constatation médicale.

b) Des stagiaires d'un laboratoire de recherches utilisant des générateurs X avaient l'habitude d'assurer le centrage optique d'un dispositif expérimental à l'aide d'un écran fluorescent observé directement dans l'axe du faisceau. Cette méthode de travail, également déplorable, a été découverte au cours d'un contrôle assuré par un organisme extérieur au laboratoire.

Nota : Il est important de signaler que, dans les deux cas ci-dessus, le physicien responsable du laboratoire méconnaissait totalement, par principe, les effets biologiques des radiations.

I.1.2. *Méconnaissance du comportement des rayonnements dans la matière*

Cet accident, bien que déjà ancien, mérite d'être rapporté car il est le premier à signaler une irradiation par électrons diffusés [9].

Six personnes, travaillant avec un accélérateur électrostatique à électrons qui fonctionnait à une haute tension de 1,2 MV et une puissance de faisceau de 60W, ont interposé des plaques radiographiques sur la trajectoire du faisceau. Elles sont restées à peu près deux minutes à 1 ou 2 m du faisceau et se sont approchées quelques secondes pour observer la fluorescence de la fenêtre de sortie de l'accélérateur. Le *rayonnement diffusé* en cause étant peu pénétrant, l'irradiation ne fut pas profonde mais importante : environ 1,5 krem.

I.1.3. *Méconnaissance des signalisations de sécurité*

Cet accident concerne un travailleur, utilisé à temps partiel, dont le travail consistait à remplir les pièges à azote liquide des pompes à vide d'un accélé-

rateur linéaire [10]. N'ayant pas été suffisamment informé des dispositifs de sécurité et d'alarme, auxquels il n'a prêté aucune attention, il a pénétré dans la salle de l'accélérateur en fonctionnement.

L'article ne mentionne pas la dose reçue par l'accidenté; cependant, celle-ci ne semble pas avoir été élevée car, heureusement, un tas de bois se trouvait entre le dispositif expérimental de la cible et les pièges à azote liquide.

1.2. ACCIDENTS DUS A UNE FAUTE DU PERSONNEL

1.2.1. *Oubli du danger ou négligence*

a) Les générateurs X ne sont généralement pas pourvus de dispositifs automatiques de sécurité.

Les accidents sont d'autant plus fréquents sur ce type d'appareil que de nombreux générateurs X, équipant les laboratoires de recherche, permettent souvent l'utilisation simultanée de 2, 3 ou même 4 faisceaux pour un même générateur. Dans ces conditions, il arrive souvent que l'opérateur oublie d'obturer l'une des fenêtres et subisse des irradiations locales dépassant fréquemment dix rems et pouvant atteindre des valeurs très élevées. Les débits de dose dans les faisceaux de générateurs X sont, en effet, particulièrement importants.

Quel que soit le nombre de faisceaux utilisables sur un générateur X, il est également fréquent que l'opérateur retire le dispositif expérimental qui interceptait le faisceau sans prendre la précaution d'obturer la fenêtre.

Enfin la présence de jeux trop importants entre la fenêtre du générateur et le dispositif expérimental est également la cause d'irradiations de l'opérateur à son insu.

La répétition de ces expositions entraîne fréquemment des altérations de la formule sanguine, de la peau (mains et poitrine) et quelquefois du cristallin.

b) Plusieurs physiciens, ayant une longue expérience et connaissant les dangers des radiations, ont subi des irradiations localisées au niveau des doigts au cours d'expérimentations sur un faisceau de deutons de 22 MeV produit par un cyclotron. Le débit de dose qu'ils croyaient faible était, en fait, de 360 rad/s. Plusieurs ulcérations des doigts ont été observées; ces ulcérations sont de faible surface (quelques millimètres carrés) mais profondes.

c) Cet accident s'est produit auprès d'un accélérateur linéaire où deux physiciens ont été irradiés parce qu'ils avaient oublié que l'accélérateur était en fonctionnement et qu'ils n'ont pas tenu compte des dispositifs de signalisation de fonctionnement de l'accélérateur [11].

En cours d'expérimentation, ces physiciens s'aperçurent que la cible n'était pas correctement placée devant le faisceau de l'accélérateur. Par deux fois, ils se rendirent à la salle des cibles par une ouverture non munie d'un dispositif de sécurité d'accès (en raison de travaux en cours) pour parfaire le réglage de la cible, mais la deuxième fois, oubliant de demander l'arrêt de l'accélérateur, ils s'aperçurent de la présence du faisceau en constatant la fluorescence des verres de lunettes portées par l'un d'eux alors qu'ils ajustaient la cible.

1.2.2. *Mise hors service volontaire des dispositifs de sécurité*

Un accident s'est produit en 1958 auprès d'un accélérateur électrostatique produisant un faisceau d'électrons de 500 keV. La puissance du faisceau était de

55 W conduisant à un débit d'équivalent de dose de 10^6 rem/s. L'accélérateur était muni de dispositifs de sécurité et de mesure de rayonnements dont les informations étaient reportées au tableau de commande de l'accélérateur.

Le but de l'expérimentation était l'étude de la diffusion des électrons sur une plaque d'aluminium en fonction de la distance de cette plaque à la fenêtre de sortie du faisceau de l'accélérateur. Vingt points de mesure étaient prévus, ce qui nécessitait d'arrêter chaque fois l'accélérateur pour accéder à la cible.

En vue d'effectuer la totalité des mesures dans le temps disponible pour cette expérimentation, l'opérateur décida de mettre hors service le contact électrique de sécurité de la porte d'accès à la salle du faisceau de l'accélérateur. Dans ces conditions, il n'était plus nécessaire de couper le faisceau pour pénétrer dans la salle d'expérience et, en réduisant seulement la tension d'accélération à 10 kV, le risque d'irradiation était négligeable et le gain de temps était de quelques minutes à chaque opération de déplacement de la cible d'aluminium.

Jusqu'à la dix-neuvième mesure, l'opérateur exécuta son travail comme il l'avait prévu. A la vingtième et dernière opération, il oublia de réduire la tension d'accélération de 500 kV à 10 kV et pénétra dans la salle du faisceau; il approcha la main droite pour déplacer la plaque d'aluminium et ressentit alors une impression de chaleur qui lui montra la présence du faisceau.

La dose reçue sur une partie de la main est supérieure à plusieurs krams sur une profondeur de 2 à 3 mm. La dose superficielle reçue sur le corps, due aux électrons diffusés, est évaluée à 100 rems environ.

1.3. ACCIDENTS DUS A UN FONCTIONNEMENT ANORMAL DE L'ACCÉLÉRATEUR

1.3.1. *Mauvais fonctionnement des dispositifs de commande*

a) Un générateur X était utilisé à des radiographies d'une durée limitée par un compteur horaire qui commandait l'arrêt du générateur et l'extinction de la signalisation de fonctionnement [12]. Après la durée d'exposition prévue et extinction de la lampe de signalisation, l'opérateur pénétra dans la salle du générateur et prépara la radiographie suivante; cependant, la coupure de la haute tension ne s'était pas produite, probablement par défaut de fonctionnement d'un relais. L'opérateur reçut une dose de 1 rem environ.

b) Cet accident s'est produit auprès d'un accélérateur linéaire à électrons par défaut de commande de la clé d'arrêt de l'accélérateur [13].

Pour des opérations successives de réglages de plaques de définition du faisceau, deux physiciens intervenaient auprès de l'accélérateur après avoir, pour chaque opération de réglage, arrêté l'accélérateur et vérifié l'absence de rayonnement.

Les trois premières opérations de réglage s'effectuèrent normalement après vérification de l'absence de rayonnement.

Les quatrième et cinquième opérations de réglage furent effectuées sans mesure de rayonnement.

A la sixième opération de réglage, la mesure du rayonnement montra la présence d'une intensité d'irradiation de 1 000 rem/h.

Les films dosimètres montrèrent que les doses reçues par les deux physiciens étaient de 40 rems et 0,4 rem (rayonnement γ de 0,2 MeV environ).

1.3.2. Production imprévue de rayonnements

a) La source d'ions et le circuit d'excitation de la courroie d'un Van de Graaff de 2 MV n'étant pas alimentés, l'accélérateur était considéré comme ne présentant aucun risque d'irradiation malgré le fonctionnement de la courroie de transport de charges [14]; plusieurs fonctionnements antérieurs, dans les mêmes conditions, n'avaient donné lieu à aucune production de rayonnement.

Cependant, d'une manière imprévue, il se produisit une accélération d'électrons (d'une énergie maximale de 1,7 MeV à la sortie du tube accélérateur).

Un physicien, s'étant trouvé, durant deux minutes environ, devant la fenêtre du tube accélérateur, subit une irradiation très importante d'électrons évaluée à 5 kreds sur les doigts, 1,3 kred sur le visage, 300 rems sur les yeux...

Le conducteur de la machine intervenant ensuite pour faire une mesure de rayonnement auprès de la fenêtre du tube accélérateur subit une irradiation évaluée à 500 rems sur les doigts et 35 rems sur le corps.

L'obtention du rayonnement a été expliquée par l'accroissement du potentiel d'auto-excitation, de 0,3 à 1,7 MV, par un réglage plus serré de la courroie et des peignes de charge. En effet, à partir d'une certaine valeur de la haute tension, comprise entre 0,3 et 1,7 MV, il se produisit une ionisation du gaz du tube accélérateur par effet Corona entre les anneaux équipotentiels de l'accélérateur; les électrons ainsi produits étaient donc ensuite accélérés vers la fenêtre du tube accélérateur.

b) Le filament de la source d'un accélérateur linéaire à électrons de 4 MeV n'étant pas alimenté, l'accélérateur était considéré comme ne présentant aucun risque d'irradiation malgré le maintien de l'alimentation UHF de l'accélérateur [15]; plusieurs fonctionnements antérieurs dans les mêmes conditions n'avaient donné lieu à aucune production de rayonnement. Cependant, d'une manière imprévue, il se produisit une accélération d'électrons (d'une énergie maximale de 8 MeV^(*)) à la sortie du tube accélérateur).

Deux expérimentateurs ont reçu sur les doigts une dose de l'ordre de 10 kreds en quelques minutes d'exposition devant la fenêtre de l'accélérateur. Aucune explication certaine de cette émission intempestive n'a pu être avancée.

1.4. ACCIDENTS DUS A UN MAUVAIS FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ

a) Un générateur X (40 kV) était équipé d'un obturateur de fenêtre qui s'abaissait automatiquement lors du retrait du dispositif expérimental [16]. Par défaut de fonctionnement de ce dispositif de sécurité, l'expérimentateur reçut à la nuque une dose de 100 rems en demeurant environ dix minutes occupé à une autre tâche auprès du générateur en fonctionnement.

b) Le contact de sécurité d'ouverture d'un caisson d'irradiation aux rayons X commandait à la fois l'arrêt du générateur (47 kV - 20 mA) et l'extinction de la signalisation de fonctionnement. Par défaut de fonctionnement du relais de sécurité, le contact de sécurité d'accès déclencha l'extinction de la signalisation de fonctionnement alors que le générateur demeurait sous tension.

(*) Il est normal pour un accélérateur linéaire à électrons d'obtenir, pour un courant très faible, une énergie des électrons double de l'énergie nominale correspondant à la puissance maximale de l'accélérateur.

Par exposition devant la fenêtre du générateur, l'opérateur reçut sur le pouce une dose de plusieurs krams.

c) Un accélérateur linéaire d'électrons était utilisé pour des irradiations médicales [17]; la quantité d'électrons accélérés était déterminée à partir des indications d'un dosimètre moniteur. Un défaut dans un condensateur du dosimètre a entraîné une sous-estimation de la dose qui n'a été décelée que trois jours plus tard lorsque deux des trois patients irradiés ont présenté les mêmes symptômes cliniques d'irradiation.

1.5. ACCIDENT DU A UNE CAUSE NON PRÉCISÉE

Un rapport publié en 1965 [18] relate un accident survenu auprès d'un accélérateur linéaire d'électrons de 10 MeV fournissant un faisceau de 3,6 kW utilisé à des irradiations industrielles.

Pendant le fonctionnement de l'accélérateur, un travailleur a pénétré dans la salle d'irradiation et s'est approché du faisceau.

La dose subie a été évaluée à 100 krams pour la main droite, 20 krams pour le pied droit, 300 rams pour la partie antérieure droite du tronc et 43 rams pour les yeux. L'énergie des électrons diffusés était de l'ordre de 2,5 MeV.

Ce rapport, orienté sur la détermination de l'irradiation subie, ne donne aucune indication sur la cause de l'accident.

II. ENSEIGNEMENTS A TIRER DES ACCIDENTS AUPRÈS DES ACCÉLÉRATEURS

Dans la première partie de ce rapport, les accidents ont été choisis et classés afin d'en faire apparaître les causes essentielles.

Il est maintenant nécessaire d'étudier, pour ces diverses causes, les moyens à mettre en œuvre pour supprimer ou au moins réduire les risques d'accident auprès des accélérateurs.

2.1 INFORMATION DU PERSONNEL

2.1.1. *Effets biologiques des rayonnements*

Le personnel travaillant sur les sources de rayonnement doit toujours être instruit des effets biologiques des rayonnements. Cette instruction doit mettre en évidence le risque grave présenté d'une part par les irradiations répétées et d'autre part par les irradiations, même d'une durée inférieure à une seconde, dans *tous les faisceaux de particules chargées* produits par les accélérateurs.

En vue d'homogénéiser le climat psychologique de travail, il est particulièrement nécessaire de convaincre deux catégories extrêmes de travailleurs : ceux qui ont une crainte exagérée des rayonnements et ceux qui, au contraire, considèrent que toutes les précautions proposées sont bien inutiles et font perdre un temps précieux.

Pour cette deuxième catégorie de travailleurs, qui nous intéresse particulièrement dans ce rapport, il est indispensable de présenter, aussi crûment que possible, quelques constatations évidentes faites sur des personnes gravement irradiées.

Dans ce but, il est utile que les publications relatives aux accidents présentent des vues en couleurs des tissus irradiés; on peut citer, à titre d'exemple, un article, relatif à un accident de criticité, publié en 1953 dans la revue « Medical Radiography and Photography » (29-42) et reproduite dans la revue « Médecine illustrated » [19].

2.1.2. *Comportement des rayonnements dans la matière*

Le personnel pense généralement à la nécessité d'employer des écrans de protection contre le rayonnement provenant directement de la source; par contre, il oublie souvent l'importance du rayonnement diffusé. En considérant que l'intensité du rayonnement diffusé est toujours de l'ordre de *un pour cent* de l'intensité du rayonnement direct, bien des surprises désagréables seraient évitées.

Par exemple, s'il est nécessaire de mettre en place un écran de béton de 2 m d'épaisseur pour assurer la protection contre le rayonnement direct d'une source, exigeant 20 cm de béton pour une atténuation du rayonnement d'un facteur 10, l'épaisseur de béton nécessaire contre le rayonnement diffusé est de 1,6 m.

Il y a également lieu d'attirer l'attention du personnel sur les risques d'irradiation et de contamination radioactive pouvant résulter de l'activation des matériaux frappés par les faisceaux d'accélérateur. En particulier, le défaut de refroidissement d'une cible en matière fissile est susceptible d'entraîner une contamination importante par suite de la détérioration du gainage de la cible.

2.1.3. *Signalisations de sécurité*

La signalisation optique, généralement installée auprès des accélérateurs, fournit des informations sur :

- l'état de fonctionnement de la machine,
- les possibilités d'accès dans les différents locaux,
- les niveaux d'irradiation dans les différents locaux.

La signalisation acoustique intervient généralement temporairement au moment des changements de signalisation optique.

Il est indispensable que tout le personnel présent dans les installations soit bien au courant de la signification des signalisations. Dans ce but, il importe d'une part qu'un texte des consignes à appliquer, suivant la signalisation du moment, soit diffusé individuellement et d'autre part que le code de signalisation soit le même dans toutes les installations car une fraction appréciable du personnel intervient auprès de plusieurs accélérateurs.

2.2. LIMITATION DES ACCIDENTS DUS A LA FAUTE DU PERSONNEL

2.2.1. *Dispositions de sécurité contre l'oubli ou la négligence*

Il est humainement impossible de penser à tout; un expérimentateur, généralement absorbé par des préoccupations de tous ordres, oubliera donc, au moins de temps en temps, de prendre des dispositions même simples de sécurité.

Il en résulte que la protection contre les dangers graves doit systématiquement être assurée automatiquement; par exemple, il doit être matériellement impossible de se trouver devant le faisceau direct d'un accélérateur. Cette protection peut être assurée par un contact électrique provoquant l'arrêt de l'accélérateur lorsque la

porte d'accès à la salle de la cible est ouverte ou provoquant le déclenchement de l'obturateur de fenêtre du générateur X lorsque le dispositif expérimental est reculé de la fenêtre, etc. Toute dérogation à cette règle doit faire l'objet d'une surveillance spéciale assurée par un personnel compétent et disposant d'appareils de détection des rayonnements.

Si, au contraire, le risque radioactif est relativement faible, un oubli passager ne présente pas de conséquence grave pour l'expérimentateur. L'existence des signalisations de sécurité citées en 2.1.3. et le contrôle du respect habituel des consignes permettent d'éviter les expositions fréquentes qui conduiraient au dépassement des doses maximales admissibles.

2.2.2. *Dispositions contre la mise hors service des dispositifs de sécurité d'accès*

Il est évident que le court-circuit volontaire des dispositifs de sécurité pour pénétrer dans un local interdit pendant le fonctionnement d'un accélérateur constitue une faute professionnelle grave.

La première conséquence de cette faute est souvent une irradiation grave qui est subie, soit par la personne fautive qui peut oublier dans quelles conditions dangereuses elle travaille, soit par une autre personne non informée de la modification faite dans l'état des dispositifs de sécurité.

Il est possible de réduire ce risque d'irradiation en disposant une signalisation de fonctionnement de l'accélérateur et de niveau d'irradiation *dans les locaux d'accès interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur*. Cette disposition de sécurité est d'autant plus nécessaire qu'elle s'impose également contre les accidents provoqués par un fonctionnement anormal de l'accélérateur ou des dispositifs de sécurité (voir ci-dessous en 2.3 et 2.4).

2.3. LIMITATION DES ACCIDENTS DUS A UN FONCTIONNEMENT ANORMAL DE L'ACCÉLÉRATEUR

2.3.1. *Mauvais fonctionnement des dispositifs de commande*

Pour éviter, lors d'un mauvais fonctionnement des dispositifs de commande, que l'accélérateur demeure en fonctionnement alors que la signalisation indique l'arrêt, il est nécessaire, au moment du projet de construction de l'accélérateur, d'envisager les conséquences possibles des défauts de fonctionnement des organes électriques des dispositifs de commande et des dispositifs de sécurité. Les schémas doivent toujours être étudiés dans le sens de la sécurité : le fonctionnement effectif de l'accélérateur doit, par exemple, être subordonné à l'indication correcte de la signalisation de fonctionnement de l'accélérateur.

Une signalisation des niveaux d'irradiation dans les locaux, dont l'accès est interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur, est une *disposition complémentaire* efficace contre une irradiation par défaut de fonctionnement des dispositifs d'arrêt.

2.3.2. *Production imprévue de rayonnement*

Un accélérateur ne doit être considéré comme totalement arrêté que si les trois conditions suivantes sont satisfaites :

— non alimentation de la source de particules à accélérer (électrons, protons, deutons...),

- non alimentation de la tension ou de l'onde accélératrices,
- pas de possibilité d'auto-excitation (par exemple, pas de fonctionnement de la courroie transporteuse de charges dans le cas d'un accélérateur Van de Graaff).

Si l'une des conditions ci-dessus n'est pas remplie, il faut savoir qu'une production intempestive de rayonnement est toujours possible et susceptible d'entraîner des accidents graves. Il est donc nécessaire de subordonner l'inobservation de l'une de ces trois conditions à l'indication d'une signalisation de fonctionnement partiel de l'accélérateur. Cette signalisation est particulièrement indispensable dans les locaux dont l'accès est interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur.

Pratiquement, la troisième condition ne peut pas toujours être liée avec certitude à la signalisation de fonctionnement partiel. Il apparaît donc encore nécessaire de disposer d'une signalisation du niveau d'irradiation dans les locaux dont l'accès est interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur.

2.4. LIMITATION DES ACCIDENTS DUS AU MAUVAIS FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ

Il est possible de réduire le nombre des accidents dus à un mauvais fonctionnement des dispositifs de sécurité en étudiant les circuits de sécurité de sorte que toute panne entraîne le déclenchement du dispositif de sécurité correspondant. Un contrôle périodique du bon fonctionnement des dispositifs de sécurité est également utile.

Cependant, pour réduire plus complètement la possibilité d'une irradiation grave, par défaut de fonctionnement des dispositifs de sécurité, il est ici encore indispensable de disposer d'une signalisation du niveau d'irradiation dans les locaux dont l'accès est interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur.

III. DISPOSITIONS PARTICULIÈRES DE SÉCURITÉ ET DE RADIOPROTECTION AUPRÈS DES ACCÉLÉRATEURS POUR ÉVITER LES ACCIDENTS D'IRRADIATION

Il ne faut pas attendre que la construction d'un accélérateur soit terminée pour s'inquiéter des problèmes de radioprotection et de sécurité; il est alors généralement trop tard pour qu'il soit possible d'obtenir l'installation de dispositifs efficaces.

Les caractéristiques essentielles d'exploitation d'un accélérateur sont déterminées au stade du projet de construction; il est indispensable que les risques radioactifs et les dispositions de radioprotection soient également déterminés à ce stade.

Les dispositifs de sécurité et de radioprotection auprès des accélérateurs comprennent principalement :

- les verrouillages d'accès aux locaux présentant des risques d'irradiation,
- les appareils de détection des rayonnements,
- la signalisation :

- de l'état de fonctionnement de l'accélérateur,
- des possibilités d'accès,
- des niveaux d'irradiation dans les locaux.

3.1. TABLEAU DE CONTROLE DES RAYONNEMENTS ET VERROUILLAGES DE SÉCURITÉ

L'expérience de la radioprotection des accélérateurs du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay a montré qu'il était commode et efficace de réaliser une centralisation :

- de la commande des verrouillages d'accès,
- des électroniques et des enregistrements liés aux détecteurs de rayonnements,
- des diverses signalisations.

Cette centralisation s'obtient par la réalisation d'un « tableau de contrôle des rayonnements » dont la surveillance est assurée d'une manière continue pour les installations importantes.

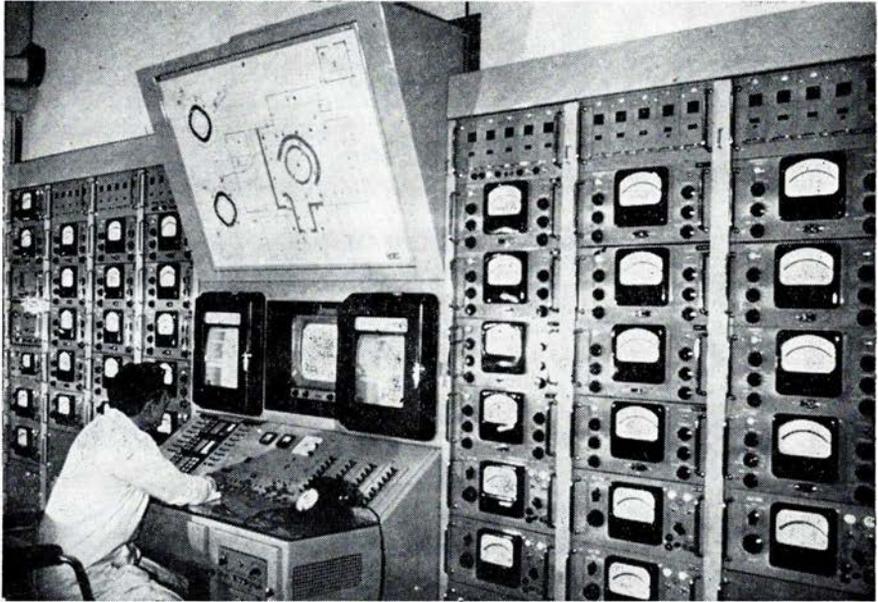


FIG. 1. — Tableau de contrôle des rayonnements de l'accélérateur SATURNE

La figure 1 montre le tableau de contrôle des rayonnements de l'accélérateur Saturne.

La figure 2 montre la partie centrale du tableau de contrôle des rayonnements de l'Accélérateur Linéaire d'électrons à 45 MeV.

La responsabilité de l'exploitation du tableau de contrôle des rayonnements est matérialisée par une « clé de sécurité » confiée au responsable de la surveillance du tableau.

Cette clé permet d'assurer le fonctionnement de l'accélérateur dans des conditions de sécurité qui doivent obligatoirement être satisfaites grâce aux circuits spécialement étudiés du tableau de contrôle. En particulier, le démarrage de l'accélérateur exige les conditions ou opérations suivantes :

- présence au tableau de contrôle de la clé de sécurité,
- présence au tableau de contrôle de toutes les clés permettant d'accéder aux locaux interdits en raison du risque d'irradiation grave pendant le fonctionnement de l'accélérateur (serrures à enclenchement dont la clé ne peut être retirée que si la porte est fermée et verrouillée),
- fermeture, par serrures à enclenchement, des portes d'accès aux locaux présentant des risques limités d'irradiation ou dérogation affichée au tableau de contrôle (la clé peut alors être retirée du tableau et l'accès devient possible),
- fermeture, par serrures à enclenchement, des canaux de passage dans la protection de l'accélérateur permettant la sortie éventuelle du faisceau principal ou des faisceaux secondaires ou dérogation affichée au tableau de contrôle. Suivant l'importance du risque d'irradiation par un faisceau secondaire sorti,

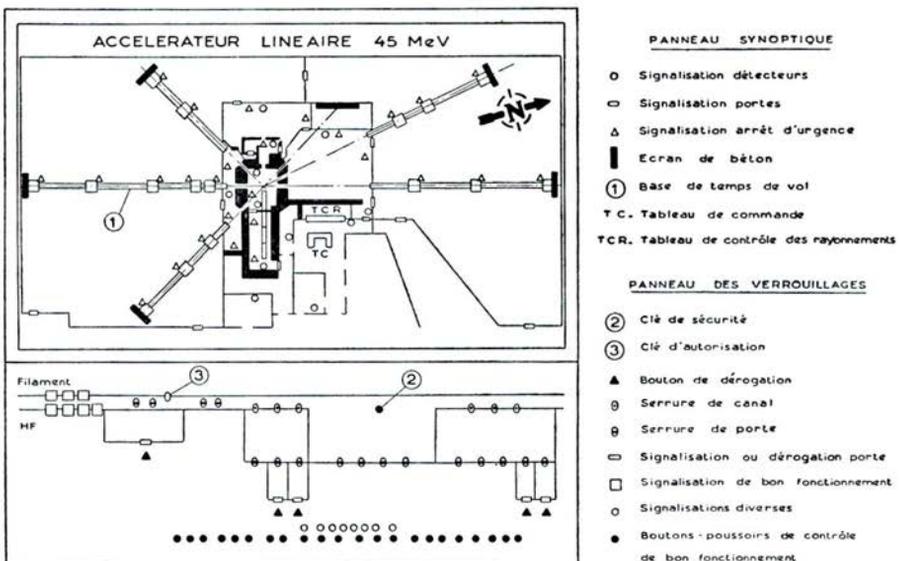


FIG. 2. — Tableau de contrôle des rayonnements de l'accélérateur linéaire d'électrons 45 MeV. Panneaux synoptiques et des verrouillages

il peut être impossible de donner une dérogation pour l'ouverture d'un local correspondant à un canal ouvert,

- déclenchement de la signalisation du démarrage (voir ci-dessous en 3.2. et 3.3.),
- action du commutateur d'autorisation de démarrage.

Pour que cette action donne effectivement l'autorisation de démarrage, il est nécessaire que les conditions, citées ci-dessus, soient remplies et que la clé de sécurité soit enfichée au tableau de contrôle.

Cet enfichage est également indispensable à l'octroi des dérogations et, d'une manière générale, pour toute modification à apporter à l'état des verrouillages ou tout effacement de signalisation acoustique (voir ci-dessous en 3.3.).

Lorsque la clé de sécurité est retirée du tableau, l'accélérateur peut continuer à fonctionner aussi longtemps que l'ensemble des conditions de sécurité demeure inchangé.

3.2. SIGNALISATION OPTIQUE

La signalisation importante du point de vue des accidents possibles concerne le fonctionnement de l'accélérateur et les niveaux d'irradiation dans les divers locaux. La signalisation des accès est surtout utilisée pour indiquer les accès libres ou les accès pour lesquels une dérogation a été donnée. Une signalisation d'accès défectueuse ne peut être la cause d'une irradiation notable dans la mesure où la signalisation des niveaux d'irradiation est correcte. En effet, tout accès à un local dangereux doit être muni d'une serrure à enclenchement dont la clé est prisonnière au « tableau de contrôle des rayonnements » pendant le fonctionnement de l'accélérateur (voir ci-dessus en 3.1.). Le retrait d'une telle clé du tableau de contrôle sans la présence simultanée de la clé de sécurité du tableau arrête automatiquement l'accélérateur.

3.2.1. Signalisation de fonctionnement de l'accélérateur

Tous les accélérateurs importants disposent d'une signalisation de fonctionnement total ou partiel reproduite dans les divers locaux de l'installation car cette signalisation facilite les tâches de contrôle du bon fonctionnement ou d'entretien des différents organes de l'accélérateur.

Par contre, cette signalisation fait souvent défaut auprès des accélérateurs de moindre importance et des personnes peuvent être surprises par le démarrage de l'installation.

La signalisation suivante est quelquefois adoptée [20] :

- vert : arrêt;
- orange : fonctionnement partiel (source d'ions ou champ accélérateur alimenté);
- rouge fixe : démarrage imminent (dans un délai de 30 secondes, par exemple);
- rouge clignotant : accélérateur en fonctionnement.

Cette signalisation est commandée depuis le tableau de commande de l'accélérateur.

3.2.2. Signalisation des niveaux d'irradiation dans les locaux

Le choix de l'emplacement des détecteurs à poste fixe est particulièrement important pour éviter les accidents d'irradiation.

On admet généralement l'utilité de détecteurs de rayonnements avec signalisation associée installés à poste fixe dans les locaux normalement occupés, pendant le fonctionnement de l'accélérateur, par le personnel de conduite ou par le personnel en expérimentation.

Par contre, la présence de tels détecteurs dans les locaux normalement interdits en raison du risque d'irradiation grave pendant le fonctionnement de l'accélérateur (sauf si le faisceau est susceptible de produire une activation entraînant une possibilité d'irradiation après arrêt de l'accélérateur) est beaucoup moins admise. En effet, on considère que ces détecteurs sont tout à fait inutiles dans de tels locaux puisque l'accès en est interdit pendant le fonctionnement de l'accélérateur. Cependant, ces détecteurs *avec leur signalisation associée localement* sont, au contraire, indispensables car ils constituent *le seul moyen* d'éviter une irradiation souvent très grave du personnel, soit à l'occasion d'un défaut de fonctionnement des dispositifs de sécurité d'accès, soit à l'occasion d'une production intempestive de rayonnements lors d'un fonctionnement anormal de l'accélérateur.

A titre d'exemple, les signalisations et les seuils correspondants suivants peuvent être utilisés :

— vert fixe : irradiation inférieure à 2,5 mrem/h,

1^{er} seuil :

— orange clignotant lent (80 pulsations par minute) : irradiation supérieure à 2,5 mrem/h,

2^e seuil :

— orange clignotant rapide (240 pulsations par minute) : irradiation supérieure à 10 mrem/h,

3^e seuil :

— rouge clignotant lent : irradiation supérieure à 200 mrem/h.

Les consignes à appliquer en fonction du seuil atteint peuvent être, par exemple :

1^{er} seuil : ne pas séjourner inutilement.

2^e seuil : présence exceptionnelle pouvant être autorisée par le Chef de Service.

3^e seuil : présence exceptionnelle ne pouvant être autorisée que par le Service de Radioprotection et sous son contrôle.

Remarque : Pour éviter les confusions entre les diverses signalisations lumineuses, il est toujours souhaitable, dans la mesure du possible, d'en rappeler la signification par des inscriptions explicites sur les voyants.

3.3. SIGNALISATION ACOUSTIQUE

La signalisation acoustique permet d'attirer l'attention du personnel à tout changement de la signalisation optique.

3.3.1. Signalisation de fonctionnement de l'accélérateur

Auprès des accélérateurs importants, il est utile d'annoncer en clair, quelques dizaines de secondes ou quelques minutes à l'avance, les changements dans l'état

du fonctionnement de l'accélérateur. Une telle annonce est d'autant plus nécessaire que les rondes de contrôle d'évacuation du personnel dans les grandes installations sont pratiquement inefficaces. Tout le personnel doit alors être parfaitement informé des signalisations et appliquer scrupuleusement les consignes.

Si une personne ne peut quitter les lieux dans les délais prescrits, elle doit empêcher le démarrage de l'accélérateur en utilisant l'un des boutons d'« arrêt d'urgence » disposés à maints endroits dans les locaux présentant des risques d'irradiation notable pendant le fonctionnement de l'accélérateur.

3.3.2. Signalisation des niveaux d'irradiation dans les locaux

Le franchissement des seuils fixés (voir ci-dessus en 3.2.2.) pour les détecteurs de rayonnements déclenche une signalisation acoustique associée d'une part localement au détecteur en cause et d'autre part au tableau de contrôle des rayonnements. L'effacement de cette signalisation s'effectue seulement au tableau de contrôle et exige la clé de sécurité.

La signalisation acoustique des niveaux d'irradiation doit également être installée dans les locaux dangereux où l'on peut admettre l'effacement automatique de cette signalisation lorsque les accès à ces locaux sont fermés.

3.4. CAS PARTICULIER DES DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ DES GÉNÉRATEURS X

Les dispositions décrites ci-dessus sont également applicables aux locaux contenant des générateurs X. Cependant, dans le cas d'un générateur spécialement conçu pour respecter les impératifs de sécurité, il est possible de demeurer auprès de l'appareil pendant son fonctionnement.

Il suffit pour cela :

a) que le local possède une signalisation de niveau d'irradiation contrôlant que l'ensemble générateur-dispositif expérimental ne présente aucune fuite de rayonnement,

b) que la gaine du générateur soit équipée de dispositifs de sécurité et de signalisation rendant pratiquement impossible toute exposition au faisceau direct ou au rayonnement diffusé.

La figure 3 montre la gaine d'un générateur permettant l'utilisation de quatre faisceaux. Un dispositif expérimental est placé devant l'une des fenêtres. Cet ensemble ne présente pas de fuite de rayonnement et la gaine comporte, pour chacune des quatre fenêtres, les dispositifs de sécurité suivants :

- un disque extérieur A obture la fenêtre automatiquement et mécaniquement par rotation (avec ressort de rappel) lorsque le dispositif expérimental est désolidarisé de la gaine. Inversement, pour réengager le dispositif expérimental devant la fenêtre, il est nécessaire d'utiliser le levier B;
- un obturateur intérieur C, non visible sur la figure, fonctionne dans une direction verticale. La fenêtre est ouverte par mise de cet obturateur en position haute. Cet obturateur est placé en position haute par commande électrique depuis le pupitre de commande du générateur; il est maintenu dans cette position par un électro-aimant. La coupure du courant dans cet électro-aimant entraîne l'obturation;

EXAMEN D'IRRADIATIONS

ACCIDENTELLES DES MAINS



Irradiation par des électrons de 8 MeV dose subie : environ 12 kreds, 47 jours après l'accident.



Irradiation par des électrons de 8 MeV dose subie : environ 8 kreds, 55 jours après l'accident.

- un contact électrique D doit être pressé par un poussoir E porté par le dispositif expérimental pour permettre la commande électrique de la mise en position haute de l'obturateur intérieur. Inversement, la coupure de ce contact, par retrait du dispositif expérimental, entraîne la chute de l'obturateur intérieur;
- un contact électrique F, non visible sur la figure, permet de contrôler que l'obturateur intérieur parvient bien en fin de course lors de la commande d'obturation à partir du pupitre ou lors du retrait du dispositif expérimental;
- lorsque le contact F s'ouvre par arrivée en fin de course de l'obturateur intérieur, la signalisation lumineuse G s'éteint.

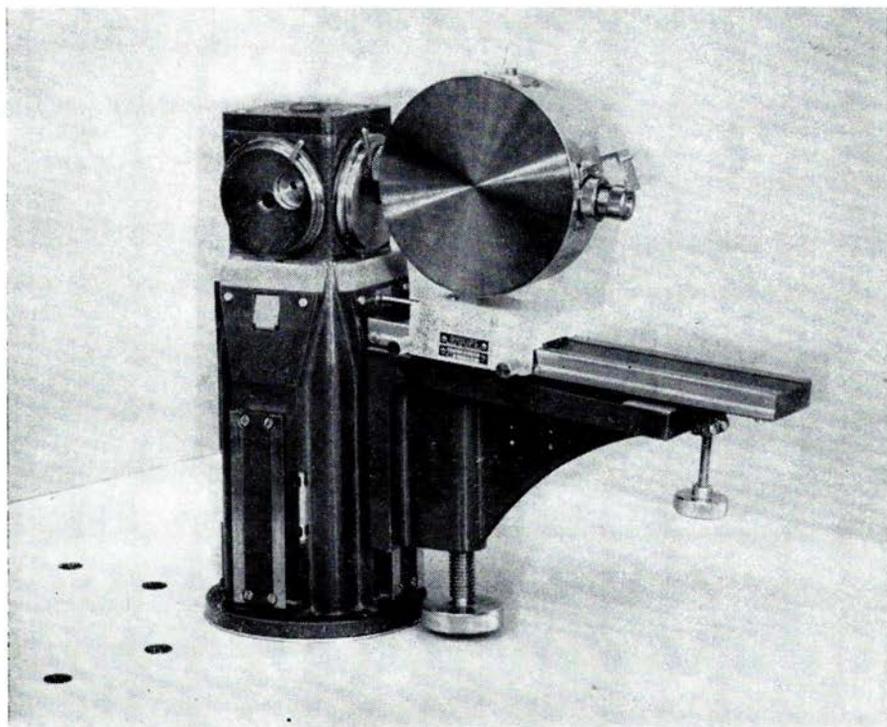


FIG. 3. — Ensemble protégé d'expérimentation sur générateur X

Le contact F et l'ampoule G sont doublés en vue de constituer un double circuit de signalisation entièrement indépendant l'un de l'autre pour l'ouverture de la fenêtre.

En définitive, les dispositifs de sécurité comprennent deux obturateurs, deux contacts de sécurité et une double signalisation optique d'ouverture de la fenêtre du générateur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHALUPECKY H. Über die Wirkung der Röntgenstrahlen auf das Auge und die Haut. *Zentralbl. für prakt. Augenheilk.*, 21, 234-267 (1897).
- [2] BIRCH-HIRSCHFELD A. Die Wirkung der Röntgen und der Radiumstrahlen auf das Auge. *Arch für Ophthalmol.*, 59, 229 (1904).
- [3] TRIBONDEAU L. et RECAMIER. Altération des yeux et du squelette facial d'un chat nouveau-né par röntgenisation. *Compte rendu de la Société de Biologie*, 58, 1031 (1905).
- [4] TRIBONDEAU L. et BELLEY G. Cataracte expérimentale obtenue par röntgenisation de l'œil d'animaux nouveaux-nés. *Compte rendu de la Société de Biologie*, LIX, 126 (1907).
- [5] TRIBONDEAU L. et LAFARGUE P. Action différente des rayons X sur le cristallin des animaux jeunes et des animaux adultes. *Compte rendu de la Société de Biologie*, LIX, 716 (1907).
- [6] TRIBONDEAU L. et LAFARGUE P. Action des rayons X sur la rétine et le nerf optique. *Compte rendu de la Société de Biologie*, 65, 149 (1908).
- [7] BOSSUET A. Experimentelle Untersuchungen über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Linse. *Arch. für Augenheilk.*, 64, 277 (1909).
- [8] *American Journal of Ophthalmology*, 19, 739 (1936).
- [9] ROBINS L.L. and all. Superficial « burns » of skin and eyes from scattered cathode rays. *Radiology*, 46, 1 (1946).
- [10] HAYES D.F. A summary of industrial accidents in U.S.A.E.C. facilities. *TID* 5360, 67 (1957).
- [11] HAYES D.F. A summary of industrial accidents in U.S.A.E.C. facilities. *TID* 5360, 66 (1957).
- [12] HAYES D.F. A summary of industrial accidents in U.S.A.E.C. facilities. *TID* 5360, supplément 2, 27 (1959).
- [13] HAYES D.F. A summary of industrial accidents in U.S.A.E.C. facilities. *TID* 5360, supplément 3, 6 (1961).
- [14] BLISS S.P. Medical aspects of an accidental exposure to Van de Graaff Generator. Premier colloque international sur la protection auprès des grands accélérateurs (1962), 35. *Presses Universitaires de France*, Paris.
- [15] JOFFRE H., VIALETES H., ROCCHESANI J. et VIAL R. Etude dosimétrique et clinique d'une exposition accidentelle subie auprès d'un accélérateur linéaire d'électrons par suite d'un fonctionnement anormal. Personnel dosimetry for Radiation Accidents (1965), 583. *I.A.E.A.* Vienna.
- [16] HAYES D.F. A summary of industrial accidents in U.S.A.E.C. facilities. *TID* 5360, supplément 4, 10 (1963).
- [17] Overdoses from linear accelerator. *The Lancet*, n° 7456, vol. II, 23 juillet 1966.
- [18] LANG L.H., ROSENFELD M.L. et TARLOV A.R. High dose human exposure from a 10 MeV Linear Accelerator. First Symposium on accelerator radiation dosimetry and experience. *Brookhaven*, November 1965.
- [19] LEVITT W.M. A fatal injury from nuclear radiation. *Medicine illustrated*, 8, 774 (1954).
- [20] JOFFRE H., LAMBERIEUX J. et STIRLING A. Contrôle des radiations auprès du Synchrotron à protons Saturne. Rapport C.E.A., n° 1500 - C.E.N. Saclay 1962.