Exemple d'application du traitement de l'information dans les moyens de mesure des rayonnements auprès des installations nucléaires

H. JOFFRE (*)

(Manuscrit reçu le 22 mai 1979)

RÉSUMÉ

L'utilisation des techniques numériques en radioprotection est en cours de généralisation; une application récente, présentée ici, en est la réalisation du tableau de contrôle des rayonnements (TCR) au Centre d'Études nucléaires de Saclay, pour un bâtiment, exploité par le Département des Rayonnements ionisants, qui assure la production des radioéléments utilisés dans la recherche, la médecine et l'industrie.

Le TCR ainsi réalisé comporte 120 voies de mesure; son centralisateur comprend 2 calculateurs, 3 écrans de visualisation, 2 imprimantes rapides, 1 table pour tracer les courbes et 1 disque enregistreur.

Après quelques mois d'exploitation, cette installation se révèle très efficace dans sa fonction de surveillance en fournissant des indications nouvelles dont la plus importante est la connaissance pratiquement immédiate du niveau de contamination de l'air par les aérosols radioactifs dans les locaux de travail et dans les effluents gazeux. Le traitement de l'information par 2 calculateurs et les organes périphériques surdimensionnés paraissent devoir assurer, en outre, une excellente fiabilité de l'ensemble.

En définitive, relativement aux TCR classiques, cette nouvelle installation présente d'excellentes caractéristiques d'exploitation et de fiabilité malgré un coût très sensiblement moindre.

ABSTRACT

The utilization of digital techniques in health physics is more and more widespread. The radiation control board (TCR) presented here has been realized for a building of the Division of Ionizing Radiation at the Saclay Center of Nuclear Research devoted to the production of radionuclides for research,

(*) Commissariat à l'Énergie atomique, Service de Protection contre les Rayonnements, Centre d'Études nucléaires de Saclay, B.P. n° 2, 91190 Gif-sur-Yvette.

medicine and industry. This TCR includes 120 measurement channels; its central unit has 2 computers, 3 display screens, 2 fast printers, 1 plotting board and 1 disk.

After a few months of operation, this units has proved its efficiency for monitoring purposes by supplying new information especially the instantaneous knowledge of air contamination levels from radioactive aerosols in the premises and in gaseous effluents. Information processing by two computers and overdimensioned peripheral equipment seems to ensure good reliability. As compared to classical TCR, this new equipment presents excellent operational and reliability characteristics though it is less expensive.

I. INTRODUCTION

La radioprotection des personnes travaillant dans les installations nucléaires nécessite l'emploi d'importants moyens fixes de mesure et de signalisation des niveaux de rayonnements. Ces moyens sont centralisés dans des *tableaux de contrôle des rayonnements* ou TCR.

En vue d'utiliser les techniques numériques dans ce domaine, des études de faisabilité ont été entreprises dès 1968 et une première installation, portant sur 18 voies de mesure, a été réalisée en 1974-1975 au Centre d'Études nucléaires de Saclay [1]. Ce TCR-pilote a permis d'étudier l'intérêt d'une nouvelle génération de TCR et en particulier de vérifier la possibilité d'un traitement valable des informations fournies par les appareils de détection de la contamination de l'air par les aérosols radioactifs.

Les résultats obtenus ayant été très encourageants, une nouvelle installation, portant sur 120 voies de mesure, a été réalisée récemment en recherchant un développement maximal des possibilités offertes par les techniques numériques centralisées. Ce TCR, faisant l'objet de la présente publication, assure le contrôle des rayonnements du bâtiment 49 du Centre d'Études nucléaires de Saclay; ce bâtiment, exploité par le Département des Rayonnements ionisants, est la principale installation du Commissariat à l'Énergie atomique pour la production des radioéléments utilisés dans la recherche, la médecine et l'industrie.

II. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE

(Exposition cumulée et niveau d'exposition)

Les recommandations de la Commission internationale de Protection radiologique (C.I.P.R.) et le décret du 15 mars 1967 (annexe III) relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants définissent des équivalents de dose maximaux admissibles annuels constituant, en termes simples, des limites d'*exposition cumulée* sur 1 an.

2. 1. IRRADIATION EXTERNE

Pour l'irradiation externe de l'organisme entier, la limite d'*exposition cumulée* sur 1 an est de 5 rem. Pour ne pas dépasser la limite annuelle ainsi

fixée et dans l'hypothèse d'une exposition permanente des personnes à une intensité constante du rayonnement durant 2 000 h de travail par an, il en résulte un débit d'équivalent de dose maximal admissible moyen, ou encore, en termes simples, une limite du *niveau d'exposition* de 2,5 mrem/h. Par différence avec l'exposition cumulée, le niveau d'exposition est la valeur *instantanée* de l'irradiation.

2. 2. IRRADIATION PAR CONTAMINATION INTERNE

Dans l'hypothèse d'une contamination atmosphérique à un niveau constant par une vapeur ou un aérosol radioactif, il en résulte pour l'organisme une activité de contamination interne A_t qui varie en fonction de la durée t d'exposition suivant la relation

$$A_t = A_{\infty}(1 - e^{-\lambda t}),$$

où λ est une constante liée à la constante radioactive λ_R et à la constante d'élimination biologique λ_B pour le radionucléide en cause ($\lambda = \lambda_R + \lambda_B$).

On définit, pour le radionucléide considéré, une *concentration maximale admissible* dans l'air (CMA) telle que l'activité maximale atteinte dans l'organisme entraîne une irradiation égale à l'équivalent de dose maximal admissible pour l'organe concerné.

La contamination de l'air, exprimée en utilisant la valeur de la CMA comme unité, définit le *niveau d'exposition* à la contamination atmosphérique.

L'*exposition cumulée* à la contamination atmosphérique peut être exprimée en CMA.h.

Le tableau ci-dessous regroupe les unités à utiliser pour exprimer les niveaux d'exposition et les expositions cumulées.

	Irradiation externe	Contamination atmosphérique
Niveau d'exposition (instantanée) . . .	rem/h	CMA
Exposition cumulée	rem	CMA.h

III. FONCTIONS DU TABLEAU DE CONTROLE DES RAYONNEMENTS

3.1. SCHÉMA GÉNÉRAL DE FONCTIONNEMENT

Pour ce qui concerne la mesure, la signalisation et l'enregistrement des niveaux d'exposition et des expositions cumulées, le fonctionnement du tableau de contrôle des rayonnements peut être représenté par le schéma suivant.

3. 2. INFORMATION DU PERSONNEL SUR LES NIVEAUX D'EXPOSITION

Le personnel est tenu informé des niveaux d'exposition par l'implantation de détecteurs de rayonnements dans les locaux de travail présentant des risques

FIG. 1. — Capteur de mesure de l'irradiation externe et coffret de signalisation.

d'exposition à l'irradiation externe ou à la contamination radioactive; le TCR du bâtiment 49 comporte : 54 détecteurs de mesure de l'irradiation externe (chambres d'ionisation de 171), 1 détecteur de mesure de la contamination radioactive par les gaz radioactifs (chambre d'ionisation différentielle), 54 détecteurs de mesure de la contamination atmosphérique par les vapeurs et les aérosols radioactifs (détecteurs à scintillation associés à un prélèvement atmosphérique sur filtre fixe).

A proximité immédiate de chaque détecteur de rayonnements, est associé un coffret de signalisation sonore et lumineuse qui tient le personnel informé en permanence sur les niveaux d'exposition aux rayonnements ainsi que de tout changement important survenant à ces niveaux (fig. 1).

En application des articles 17 et 18 du décret du 28 avril 1975 sur la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et de l'arrêté d'application du 7 juillet 1977, les niveaux d'exposition mesurés sont répartis en quatre plages suivant le tableau ci-dessous qui indique, en outre, la signalisation lumineuse résultant du même arrêté et la signalisation sonore appliquée au TCR du bâtiment 49.

Plage de mesure	0	1	2	3
Niveau d'exposition (Irradiation externe ou contamination de l'air)	1	80	4 000	LMA (*)
Signalisation lumineuse (permanente)	vert	jaune	orange	rouge
Signalisation sonore (après changement de plage et temporisée).....	—	250 Hz	750 Hz	250-750 Hz
Condition de travail.....	Situation normale	Durée limitée		Évacuation immédiate

(*) La LMA correspond à 2,5 mrem/h pour l'irradiation externe et à 1 CMA pour la contamination atmosphérique.

Le délai de déclenchement des signalisations est d'autant plus court que le niveau d'exposition atteint est plus élevé. Dans ces conditions, un accident, même grave, se produisant sur une installation ne peut entraîner qu'une exposition relativement faible du personnel, de quelques millirems à quelques dizaines de millirems pour ce qui concerne l'irradiation externe de l'organisme entier ou l'irradiation interne par inhalation.

La grande sensibilité des détecteurs de rayonnements et la précocité de déclenchement de l'alarme sont deux aspects caractéristiques des moyens de surveillance du risque nucléaire; ils contribuent à rapporter au personnel un climat de sécurité et de confiance qui n'existe pas sur le plan du risque chimique où les moyens de mesure mis en œuvre sont rarement associés à des dispositifs d'alarme et ne fournissent généralement, lorsque ces mesures sont faites, que des résultats, *a posteriori*, d'expositions déjà subies et qui peuvent être graves. Le cas de la pollution de l'air dans les locaux de travail par le béryllium en est un exemple typique bien connu.

3.3. CONTRÔLE DE L'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION

Le contrôle des niveaux de rayonnements pour l'ensemble du bâtiment est assuré par :

- les détecteurs indiqués ci-dessus en paragraphe 3. 2. parmi lesquels 7 chambres d'ionisation contrôlent également l'irradiation externe auprès des gaines d'évacuation des effluents gazeux (après filtre) et des canalisations d'évacuation des effluents liquides vers les cuves de stockage;

- les détecteurs contrôlant la radioactivité des effluents gazeux rejetés, après filtration, dans les gaines d'évacuation vers la cheminée du bâtiment : 3 chambres d'ionisation différentielles pour la mesure des gaz radioactifs, 8 détecteurs à scintillation pour la mesure des aérosols radioactifs prélevés en continu sur filtre fixe.

Tous les résultats des mesures fournies par les détecteurs répartis dans le bâtiment sont regroupés et exploités par un centralisateur qui, après traitement par ordinateur, assure les fonctions suivantes (*fig. 2*) :

- visualisation sur écrans de la valeur précise des niveaux d'exposition à l'irradiation externe et à la contamination;

- signalisation lumineuse et sonore de tout changement de plage des niveaux d'exposition;

- tracé de courbes de variation des niveaux d'exposition présentant un intérêt particulier, sur demande de l'opérateur de tableau ou automatiquement pour les détecteurs donnant les niveaux les plus élevés.

Tous ces résultats, fournis par le TCR avec précision et pratiquement en temps réel, permettent une connaissance permanente et complète de l'état de l'ensemble des installations du bâtiment sur le plan de la radioprotection; ils permettent également, en cas d'accident, une intervention très efficace par la précision et la rapidité des informations fournies.

Il est à noter qu'un *tableau de contrôle technique* ou TCT (partie gauche de la figure 2), associé au TCR, assure le contrôle de l'ensemble des servitudes techniques du bâtiment concernant : la ventilation générale du bâtiment (21 ventilateurs), le verrouillage des accès aux locaux à séjour réglementé ou interdit (24 accès par clés regroupées au centralisateur, 4 accès par badge magnétique et 8 passages pouvant être interdits en cas d'accident), le niveau

d'eau de la piscine de stockage des sources de très haute activité, les niveaux de remplissage des cuves à effluents liquides (14 cuves à effluents actifs et 12 cuves à effluents douteux), l'état des alimentations électriques du bâtiment (réseau E.D.F. et réseaux secours).

FIG. 2. — Centralisateur de contrôle des rayonnements.

3. 4. GESTION DES RÉSULTATS DE MESURE ET DE CONTRÔLE

À côté des informations en temps réel qui sont nécessaires à la surveillance des installations, le calculateur permet d'assurer la gestion automatique des résultats de mesure pour les fonctions suivantes :

- Impression des niveaux d'exposition :
 - automatiquement et avec une périodicité d'autant plus courte que les niveaux atteints sont plus élevés,
 - automatiquement également pour tout changement de plage de mesure,
 - à la demande de l'opérateur de tableau.
- Impression des expositions cumulées :
 - automatiquement avec une périodicité journalière et mensuelle,
 - à la demande de l'opérateur.
- Mise en mémoire sur disque permettant, *a posteriori*, le tracé rapide et précis de toute courbe de variation des niveaux d'exposition. Cette possibilité est particulièrement intéressante pour permettre l'interprétation rapide

des résultats de mesure en fonctionnement normal des installations ou en cas d'accident.

Le calculateur permet également l'impression automatique de l'état des servitudes techniques du bâtiment et de tout changement intervenant dans cet état (ventilation du bâtiment, verrouillage des accès, niveau d'eau de la piscine de stockage, niveaux des effluents dans les cuves et alimentations électriques du bâtiment).

IV. AVANTAGES DE CETTE GÉNÉRATION DE TCR

Relativement aux précédentes générations de TCR, l'utilisation d'un calculateur apporte des avantages notables sur plusieurs plans.

4. 1. EXPLOITATION DES MESURES

Connaissance des niveaux d'exposition et des expositions cumulées

Les détecteurs de rayonnement fournissent une réponse qui est proportionnelle :

— Au niveau d'exposition pour les détecteurs de mesure de l'irradiation externe (chambre d'ionisation) et de la contamination de l'air par les gaz radioactifs (chambre d'ionisation différentielle à circulation). Le traitement de l'information fournie par ces capteurs permet, en outre, d'obtenir l'exposition cumulée.

— A l'exposition cumulée pour les détecteurs de mesure de la contamination atmosphérique par les aérosols radioactifs qui mesurent, par une détection à scintillation, l'activité cumulée sur un filtre fixe de prélèvement atmosphérique continu. Le traitement de l'information fournie par ce capteur permet, en outre, d'obtenir le niveau d'exposition.

Homogénéité de la signalisation

En l'absence de traitement de l'information, la signalisation est, d'après ce qui précède, relative aux niveaux d'exposition pour l'irradiation externe et la contamination atmosphérique par les gaz radioactifs, et à l'exposition cumulée pour la contamination atmosphérique par les aérosols.

Ainsi que le montre le schéma ci-contre, cette signalisation n'est donc pas homogène; pour les aérosols radioactifs, elle est de plus d'une interprétation difficile et peut manquer de sensibilité.

Le traitement de l'information restitue l'homogénéité requise et permet, dans tous les cas, une signalisation relative aux niveaux d'exposition.

Expression des résultats de mesure

Les informations fournies directement par les détecteurs de rayonnements sont exprimées en ampères pour les chambres d'ionisation et en impulsions par seconde pour les compteurs proportionnels ou les détecteurs à scintillation.

Le traitement de l'information permet d'éviter cette disparité dans l'expression des résultats par l'utilisation d'une électronique associée au détecteur fournissant des impulsions standard (20 V et 2 μ s) et par l'introduction, au niveau du calculateur, de tous les coefficients relatifs aux conditions de mesure et à la nature des rayonnements ou des radionucléides en cause. Il devient ainsi possible d'exprimer les niveaux d'exposition directement en LMA c'est-à-dire en prenant pour unité le niveau d'exposition maximal admissible d'irradiation externe ou de contamination atmosphérique. De même, l'exposition cumulée est exprimée en LMA.h.

Toutes les informations fournies sont ainsi présentées de façon homogène et directement interprétables.

Sensibilité dans les mesures de contamination atmosphérique par les aérosols

Seul le traitement de l'information permet de connaître le niveau d'exposition à la contamination atmosphérique par les aérosols et, en particulier, d'avoir connaissance, après une montée du niveau de contamination, de la décroissance de ce niveau. Il en résulte un contrôle précis des installations de production et, en cas d'accident, une réduction des durées d'évacuation des locaux.

La figure 3 donne un exemple de tracé du niveau d'exposition obtenu lors d'un incident de contamination atmosphérique par l'iode 131 (courbe 1); le niveau maximal de contamination a été de 60 CMA. La courbe 2, sur la même figure, indique, en l'absence de traitement de l'information et pour le même incident, la variation du taux de comptage résultant de l'activité cumulée sur le filtre de prélèvement. La comparaison de ces deux courbes montre l'intérêt évident du traitement de l'information pour la surveillance de la contamination atmosphérique.

FIG. 3. — Exemple de contamination atmosphérique par l'iode 131.

Tracé des courbes de variation des niveaux d'exposition

La prise en mémoire sur disque associé au ordinateur permet la restitution précise de toutes les courbes de variation des niveaux d'exposition en fonction du temps pour tous les capteurs. L'ensemble de ces courbes constitue une information très complète en cas d'accident dont l'analyse est ainsi considérablement facilitée.

Visualisation des niveaux d'exposition

La visualisation sur écrans cathodiques associés au ordinateur permet de regrouper sur chaque écran utilisé jusqu'à 44 mesures de niveaux d'exposition en donnant en même temps les valeurs précises de ces niveaux et, pour toute évolution, une représentation immédiate et visible à distance.

Gestion des résultats

En exploitation normale ou en cas d'accident, le calculateur fournit rapidement une exploitation complète des renseignements déjà explicités en paragraphe 3. 4. En l'absence de traitement de l'information, l'exploitation des indications fournies par des enregistreurs multivoies, par exemple pour obtenir les expositions cumulées, est pratiquement irréalisable dans le cas d'un TCR à 120 voies de mesure.

4. 2. FIABILITÉ DE FONCTIONNEMENT

Centralisateur

L'inconvénient majeur d'un centralisateur à calculateur est la paralysie totale du système en cas de panne survenant au centralisateur. Pour éviter cet inconvénient, le centralisateur a été doublé dans tous ses organes essentiels. Le traitement de l'information est réalisé par deux calculateurs qui se contrôlent réciproquement et qui sont, tous les deux, en mesure d'assurer la totalité du traitement. En cas de panne d'un organe périphérique (écran de visualisation ou imprimante), toutes les indications et tous les enregistrements sont conservés grâce à une configuration condensée.

Capteurs et coffrets de signalisation

Le fonctionnement correct de chaque capteur est contrôlé en permanence par l'adjonction éventuelle d'une très faible source de rayonnement permettant de s'assurer qu'il émet constamment un signal toujours supérieur à un seuil dit de bon fonctionnement. La totalité de la chaîne de mesure liée à chaque capteur est ainsi contrôlée en permanence. En outre, tout défaut de fonctionnement est immédiatement signalé : non branchement d'un capteur, défaut de haute-tension, arrêt d'un moteur de prélèvement d'air, perte de charge par excès ou par défaut sur un filtre de prélèvement, non branchement d'un coffret de signalisation, non fonctionnement d'une ampoule de signalisation.

Alimentation électrique

Un ensemble batterie d'accumulateurs-onduleur assure une alimentation électrique parfaitement stabilisée du TCR. En cas de coupure de l'alimentation par le secteur, ce système assure une autonomie de marche du centralisateur de 1 h. Enfin, un groupe électrogène de 85 kVA est en mesure de pallier un arrêt du secteur en assurant la totalité des fonctions du TCR et du TCT.

4. 3. COÛT DES ÉQUIPEMENTS

Liaisons capteurs-centralisateur et électronique du centralisateur

En l'absence de traitement de l'information, les signaux transmis des capteurs au centralisateur, sur des distances pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres, sont des courants ou des impulsions faibles exigeant la mise en œuvre de câbles très onéreux. Cet inconvénient est supprimé dans

cette génération de TCR pour laquelle l'électronique associée aux capteurs fournit des impulsions standard d'environ 20 V, la fréquence de ces impulsions augmentant avec le niveau d'exposition. Chaque impulsion correspond à un quantum d'exposition, par exemple 5 μrem pour l'irradiation externe.

Tous les capteurs fournissant les mêmes impulsions, il en résulte une standardisation des câbles de liaison capteurs-centralisateur et de l'électronique du centralisateur, disposée en interface entre les capteurs et le calculateur.

Signalisation des niveaux d'exposition

Le traitement de l'information et les progrès technologiques en électronique permettent de réaliser à peu de frais le seuil de bon fonctionnement et les trois seuils d'alarmes sonore et lumineuse pour les niveaux d'exposition définis par l'arrêté d'application du 7 juillet 1977 (*) relatif à l'article 18 du décret du 28 avril 1975.

Enregistrement des résultats

Les périphériques associés au calculateur (3 écrans de visualisation, 1 traceur de courbe, 2 imprimantes et 1 disque mémoire) permettent avantageusement, sur les plans du coût et de l'efficacité de la surveillance, d'éviter l'utilisation d'un tableau synoptique, de 21 enregistreurs multivoies (type minipont) et de 3 enregistreurs suiveurs (type speedomax).

Coût global du TCR

Le coût de ce TCR à 120 voies de mesure, actualisé à décembre 1978, se situe à environ 30 p. cent au-dessous de celui d'une installation classique (sans traitement de l'information) comportant les mêmes voies de mesure. Si le nombre de voies de mesure est moins important, cet avantage se réduit; il devient nul pour un nombre de voies situé entre 40 et 50. Cependant, compte tenu de ses caractéristiques d'exploitation très supérieures, cette génération de TCR, avec traitement de l'information par centralisateur doublé, mérite de conserver encore la préférence même pour un nombre de voies plus faible (environ 30 voies). Ce point de vue sera encore très probablement maintenu lorsque la comparaison avec un TCR à microprocesseurs et centralisateur offrant des performances équivalentes aura pu être faite.

Enfin, l'extension du traitement de l'information au TCT a permis de réaliser pour cette dernière installation une économie voisine de 20 p. cent.

V. DISCUSSION

Le contrôle de la validité des informations très complètes fournies par cette nouvelle génération de TCR a nécessité la réalisation de matériels spécifiques de tests :

(*) Cet arrêté fixe les seuils et les modalités de signalisation des zones spécialement réglementées ou interdites à l'intérieur de chaque zone contrôlée.

- dispositif Wang-Camac aussi utilisé pour la mise au point des programmes de traitements [2];
- générateur de tests séquentiels microprogrammés [3]; connecté au niveau de la sortie d'un capteur de mesure de l'irradiation ou de mesure de la contamination, ce générateur permet de comparer les indications fournies par le calculateur aux niveaux de rayonnement simulés;
- dispositif de simulation de commande de signalisation pour le contrôle des états des balises [4].

Cette nouvelle génération de TCR a nécessité également, pour le personnel de radioprotection chargé de son exploitation, une adaptation aux nouvelles techniques utilisées. Dans ce but, du début du projet jusqu'au dernier contrôle de recette, cette installation a été réalisée dans un esprit de coopération de tous les participants. Cette bonne cohésion dans le travail a permis de livrer, pratiquement dans les délais prévus, une installation qui remplit pleinement les espoirs formulés au départ par les utilisateurs. En particulier, la participation du Service de Protection contre les Rayonnements à la programmation a permis d'apporter à ce service une bonne connaissance des nouveaux équipements et leur prise en main dans les meilleures conditions possibles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JOFFRE H. *Contrôle centralisé des rayonnements par utilisation des techniques numériques. Exemple de réalisation au Centre d'Études nucléaires de Saclay*, Nuclex, Bâle, 1975.
- [2] CASTRI J. *Appareillage expérimental pour les problèmes du contrôle de la contamination radioactive, utilisant un calculateur Wang série 700 couplé à un châssis Camac*. Rapport CENS/SPR/SRI-73/167, 1973.
- [3] FRUCHART D. *Générateur séquentiel d'impulsions balise*. Rapport CENS/SPR/AER-77/34, 1977.
- [4] TRAVAILLON R., FRUCHART D. *Générateur séquentiel de codes logiques*. Rapport CENS/SPR-76/119, 1976.