

LES NOUVELLES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES RAYONS X PEUVENT-ELLES MENACER LA SANTÉ DES TRAVAILLEURS ?

par Henri FRANÇOIS
Ancien Elève de l'École Polytechnique

L'histoire des techniques humaines offre de nombreux exemples de métiers dont l'exercice ruinait plus ou moins rapidement la santé du travailleur, amenait son vieillissement et parfois sa mort précoces. On peut dire que le progrès les a fait disparaître pour la plupart et que l'hygiène et l'amélioration rationnelle des conditions de travail ont supprimé aujourd'hui pratiquement, sauf là où l'ignorance et la routine perpétuent des errements condamnés, le plus grand nombre des maladies professionnelles. En même temps, il a fait apparaître d'autres dangers, en particulier dans les industries chimiques, dans les mines et plus récemment avec l'utilisation des rayons X et du radium pour les études et le contrôle industriels. La protection du travailleur contre ces rayonnements glorieusement célébrés dans les annales de la médecine présente de sérieuses difficultés, car il est impossible d'arrêter intégralement des radiations aussi pénétrantes que celles mises en œuvre dans ces applications métallurgiques, et aussi parce que les dommages causés dans le cas de précautions insuffisantes se révèlent souvent trop tardivement. Ce problème peut cependant être considéré comme résolu d'une manière satisfaisante par un ensemble de mesures (examens périodiques du sang du personnel, emploi d'écrans blindés, interdiction des zones dangereuses) dont la mise en œuvre ne saurait être négligée, quelque onéreuses que puissent être les installations qu'elles entraînent.

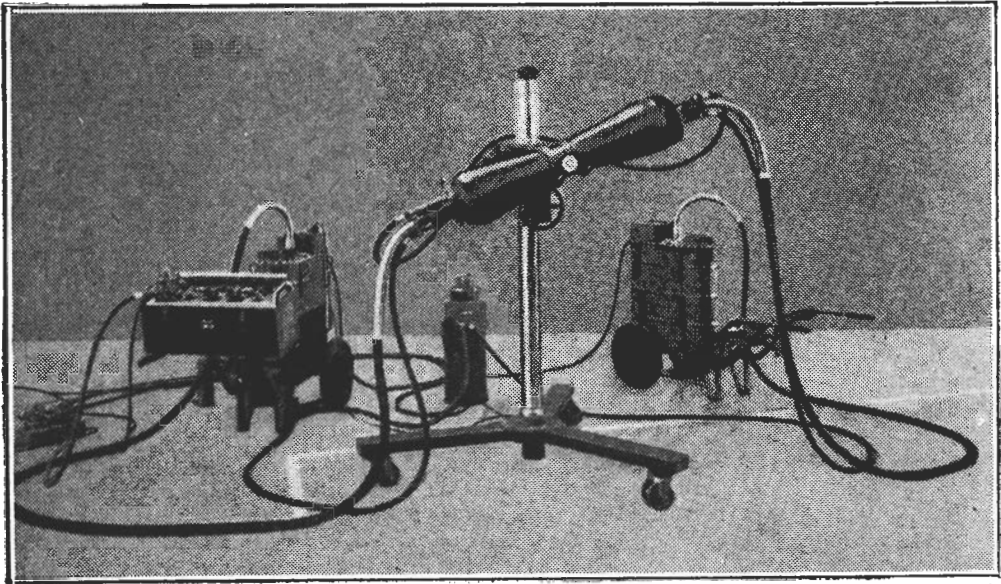
IL y a quelques années, la médecine constituait encore le principal champ d'application des rayons X, tant pour l'exploration du corps humain que pour le traitement du cancer. Aujourd'hui, leur emploi dans l'industrie tend à prendre une importance comparable à celle de leurs applications médicales. A l'échelle macroscopique, ils servent à déceler les défauts des pièces métalliques, les failles provoquées par la corrosion dans les parois des réservoirs, etc... Dans le domaine des observations microscopiques, ils fournissent d'utiles indications sur la structure des alliages (1); enfin, à l'échelle moléculaire, leur diffraction par les cristaux et les molécules géantes permet de connaître les dimensions des mailles du réseau cristallin, la disposition des divers atomes dans ce réseau et la structure moléculaire de nombreux corps complexes de la chimie organique. Dans la métallurgie, l'industrie céramique, l'industrie textile, celle des matières plastiques, du caoutchouc, etc., on peut prédire le plus bel avenir aux applications des rayons X.

Malheureusement, ces radiations ne sont pas sans présenter de graves dangers pour ceux qui sont appelés à les fréquenter quotidienne-

ment (1) et, avant qu'on eût mis au point la protection des radiologues dans les hôpitaux, la longue suite des martyrs de la science a abondamment démontré leur action nocive, à doses répétées, sur les organismes supérieurs. Les médecins et les constructeurs d'appareils de radiologie et de radiothérapie ont maintenant appris à réaliser une protection satisfaisante des opérateurs, et il pourrait sembler qu'il n'est pas plus difficile d'obtenir la même sécurité dans une usine que dans un hôpital. Cela est vrai pour les rayons utilisés en microradiographie et dans l'étude des structures moléculaires et cristallines, lesquels n'ont pas nécessairement une très grande puissance de pénétration et sont mis en œuvre dans des installations fixes dont, par suite, les sources peuvent être aisément isolées. Mais il en va tout autrement des radiations auxquelles on fait appel pour l'exploration microscopique des métaux lourds. Ces rayons doivent être considérablement plus « durs » (c'est-à-dire de plus petite longueur d'onde) que ceux que l'on emploie en radiothérapie pour détruire une tumeur cancéreuse. Enfin, l'exploration des gran-

(1) Lire : « La Radiographie microscopique des alliages », dans *La Science et la Vie*, n° 302 (oct. 1942).

(1) On pourra consulter à ce sujet une communication du Dr H. Schaefer du Kaiser-Wilhelm-Institut de Francfort, d'où ont été extraites plusieurs des figures de cet article.



T W 23734

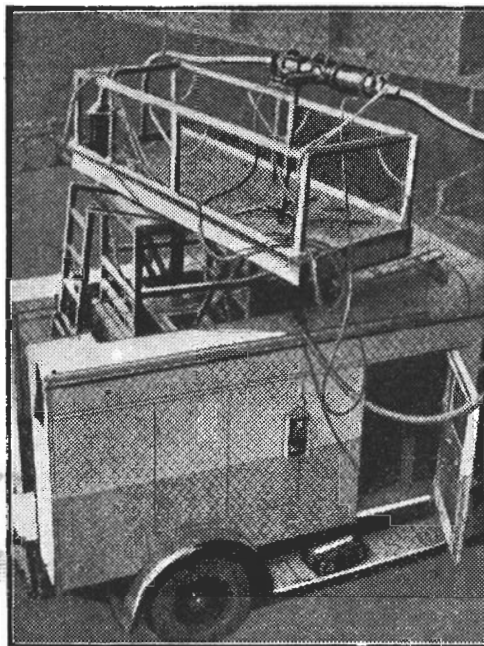
FIG. 1. — UN APPAREIL A RAYONS X POUR L'EXAMEN MACROSCOPIQUE DES MATÉRIAUX (PHILIPS)

Cet appareil, qui travaille sous une tension maximum de 300 kV, est décomposé en organes de dimensions réduites qui en rendent le transport aisé. Le générateur haute tension est constitué par un assemblage symétrique de deux générateurs de 150 kV que l'on aperçoit au second plan sur des chariots à deux roues qui donnent une idée des dimensions de l'appareil. La lampe est montée sur un pied à trois roues.

des pièces mécaniques (poutres, parois de réservoirs) nécessite l'emploi d'installations mobiles (fig. 1, 2, 3, 4, 5), et l'on conçoit que, dans ce cas, la protection des travailleurs du voisinage soit particulièrement délicate.

Deux raisons, l'une physique, l'autre biologique, viennent compliquer le problème de la sécurité au voisinage des sources de rayons X. Tout d'abord, il n'existe pas de corps complètement opaque aux rayons X; tous, même le plomb, sont plus ou moins transparents. De plus, chaque volume de corps irradié devient à son tour une source de rayonnement secondaire. Il ne suffit donc pas de se garder des rayons primaires, il faut encore supprimer ces rayons secondaires.

Le deuxième fait est que les lésions graves et même incurables peuvent être aussi bien provoquées par plusieurs années d'exposition à des radiations d'intensité



T W 23736

FIG. 2. — UNE VOITURE RADIOGRAPHIQUE INSPECTANT LES SOUDURES D'UNE POUTRE D'UN PONT DE CHEMIN DE FER (SIEMENS)

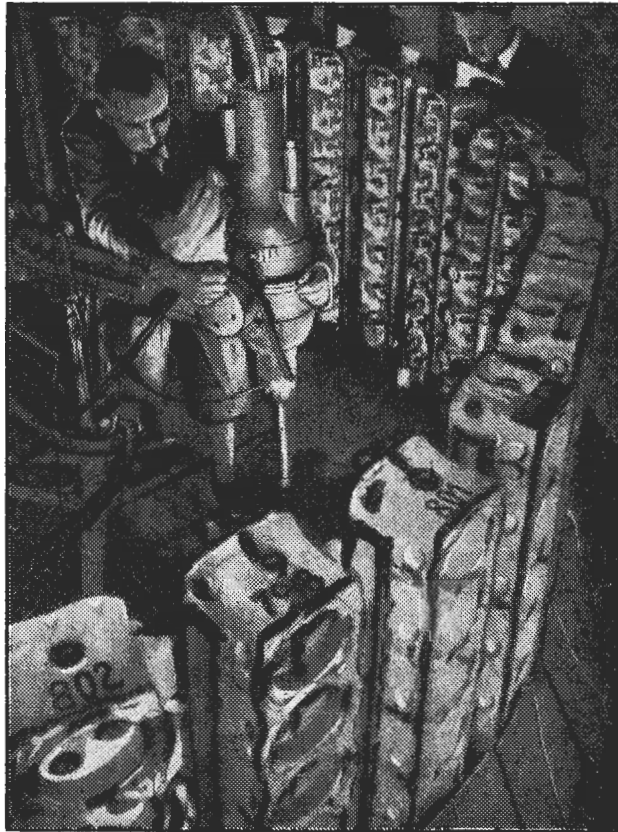
La lampe est portée par un échafaudage et les appareils accessoires de l'installation sont placés dans la voiture.

presque imperceptible que par quelques minutes d'une irradiation intense. Il existe même des lésions tardives qui se manifestent seulement plusieurs années après une irradiation en apparence parfaitement bien tolérée et qui sont déclenchées par une irritation absolument inoffensive pour un tissu sain : par exemple, le contact d'un vêtement rugueux.

L'absorption des rayons X par la matière

Que se passe-t-il quand des rayons X traversent un corps? Rappelons que l'on considère aujourd'hui le rayonnement X (ainsi d'ailleurs que la lumière visible) comme constitué par des particules : les photons, qui se déplacent à la vitesse de la lumière et qui sont associés à une onde électromagnétique. L'énergie du rayonnement est tout entière transportée par le photon. L'énergie

de chaque photon varie en raison inverse de la longueur d'onde de l'onde associée, c'est-à-dire qu'elle est d'autant plus grande que cette longueur d'onde est petite. Les radiations utilisées dans l'industrie pour les observations microscopiques ont une longueur d'onde comprise entre 3 et 40 milliardièmes de millimètre, contre 4 à 8 millièmes de millimètre pour la lumière visible. Le « quantum » d'énergie que véhicule chaque photon X considéré est donc environ 10 000 à 100 000 fois plus important que le « quantum » d'un photon de la lumière visible. Il est également de 10 000 à 100 000 fois plus grand que l'énergie d'activation ou de combinaison des molécules complexes des substances biologiques, qui se trouve à peu



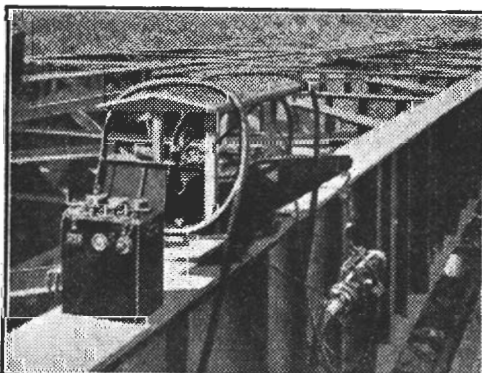
T W 23735

FIG. 3. — L'EXAMEN RADIOSCOPIQUE DES CARTERS DE MOTEURS D'AVIATION AUX USINES JUNKERS

Les carters sont disposés sur un cercle au centre duquel la lampe à rayons X tourne autour d'un pivot. On dispose derrière chaque pièce à examiner un film sensible irradié pendant la même durée. La radiographie permet d'éliminer les pièces défectueuses.

près dans le domaine des énergies quantiques des radiations visibles de plus courte longueur d'onde.

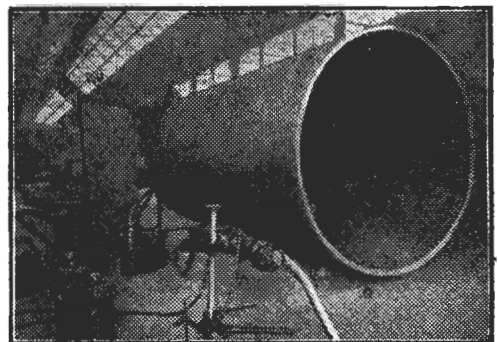
Quand un photon X traverse un corps, il peut, soit passer sans rencontrer aucun atome, soit le heurter et être dévié de sa route, ce qui donne naissance au rayonnement diffusé, soit enfin disparaître en communiquant toute son énergie à un électron planétaire de l'atome. Cet électron, animé d'une très grande vitesse, est arraché à son atome, et poursuit sa route, tel un projectile, jusqu'à ce qu'il ait dépensé toute son énergie dans des chocs avec les atomes voisins. Il leur arrache ce faisant des électrons auxquels il communique une part plus ou moins considérable de son énergie. Si l'énergie cédée est



T W 23737

FIG. 4. — L'EXAMEN AUX RAYONS X D'UNE POUTRE SOUDÉE D'UN PONT D'AUTOSTRASSE (SIEMENS)

L'appareil est monté sur un petit chariot protégé par un toit et qui contient les générateurs de 200 kV. L'ampoule (en bas et à droite) est suspendue à un bras porté par le chariot.



T W 23738

FIG. 5. — L'EXAMEN DES SOUDURES LONGITUDINALES D'UNE CHAUDIÈRE AU MOYEN D'UN APPAREIL A RAYONS X DE 200 KV (SIEMENS)

La lampe se déplace à l'extérieur de la chaudière et le film photographique devant lequel on interpose des écrans renforcateurs et que l'on enferme dans une cassette de caoutchouc recouverte de plomb est à l'intérieur de la chaudière. Il faut onze opérations pour explorer toute la longueur de la chaudière.

grande, l'électron heurté devient à son tour un projectile qui dissipe son énergie dans un nombre plus ou moins grand de chocs. Les atomes heurtés, qui ont perdu un électron, et qui ont par conséquent acquis une charge électrique positive, constituent des ions. Ils peuvent d'ailleurs se reconstituer par une série de passages des électrons des trajectoires périphériques aux trajectoires plus proches du noyau, et par capture d'un électron libre. Ils émettent alors des radiations dites « secondaires ». On a pu photographier la série de ces effets dans un milieu gazeux; l'atmosphère sursaturée d'humidité d'une chambre de Wilson; les ions qui apparaissent sur le trajet des électrons se comportent, en effet, comme autant de centres de condensation de la vapeur d'eau, et les traînées qui en résultent sont aisément photographiables (figure 6). Le calcul des probabilités montre que la répartition dans l'espace et dans le temps des chocs entre atomes et électrons a la même allure dans un milieu semi-fluide, tel que celui qui constitue les tissus vivants, que dans la vapeur d'eau de la chambre de Wilson. Les chocs sont seulement plus rapprochés. Dans ces conditions, il suffit de reporter à une échelle convenable le trajet des électrons dans une chambre de Wilson, sur la photographie d'une coupe de tissu, pour imaginer ce qui se



T W 23741

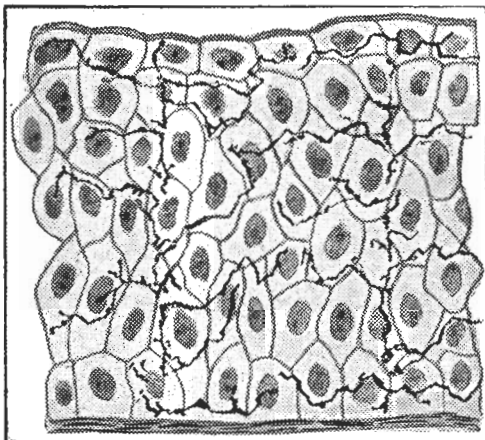
FIG. 6. — L'IONISATION PAR LES RAYONS X DE L'ATMOSPHÈRE D'UNE CHAMBRE DE WILSON

Les électrons arrachés aux atomes par les rayons X et animés d'une grande vitesse se comportent comme des projectiles qui sont à leur tour capables d'enlever à d'autres atomes des électrons, auxquels ils communiquent parfois une grande énergie, donnant naissance à de nouveaux projectiles. Sur le passage de ces électrons, les atomes endommagés, chargés positivement par la perte d'un électron, se comportent comme des centres de condensation de la vapeur d'eau saturée, et une photographie des gouttelettes de condensation met en évidence le trajet des électrons.

passé pendant un petit instant dans un tissu irradié (fig. 7).

La répartition statistique des « blessures » dans le tissu vivant

On voit alors sur une telle représentation que certaines cellules ne sont pas touchées, tandis que d'autres portent une, deux et jusqu'à six blessures. La figure 8 représente le même tissu sur lequel on a dénombré les blessures de chaque cellule. Si on connaît d'une part les dimensions des cellules et de leurs constituants et d'autre part la fréquence moyenne des projectiles dans le temps et dans l'espace, le calcul

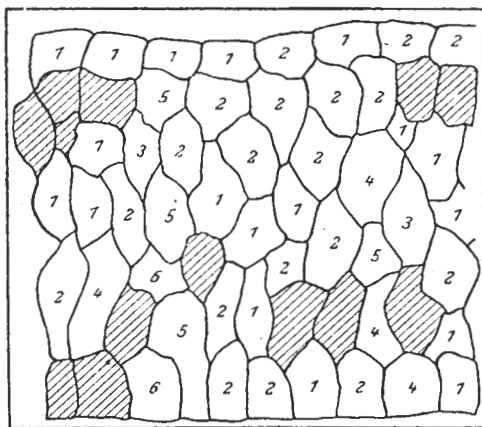


T W 23739

FIG. 7. — LE BOMBARDEMENT D'UN TISSU VIVANT PAR LES ÉLECTRONS APPARUS DANS UN FAISCEAU DE RAYONS X

On a reporté à une échelle convenable sur une coupe de tissu le trajet des électrons photographiés dans la chambre de Wilson (fig. 6). Cette figure donne une image satisfaisante du bombardement des cellules par les électrons libérés par les rayons X. Chacune des ramifications du trajet des électrons correspond à l'entrée en jeu d'un nouveau projectile et par conséquent à une nouvelle blessure infligée à la cellule. Le dénombrement de ces blessures est effectué à la figure 8.

des probabilités permet d'évaluer, pour différentes durées d'irradiation, le nombre des cellules qui auront reçu au moins une, deux..., six blessures. Les courbes ont des allures différentes suivant le nombre des atteintes. Si nous prenons les deux extrêmes, une ou six blessures, nous voyons que le nombre des cellules atteintes au moins une fois augmente d'abord très vite : les « projectiles » sont répartis assez



T W 23740

FIG. 8. — LA RÉPARTITION STATISTIQUE DES BLESSURES PROVOQUÉES DANS LE TISSU VIVANT PAR LES RAYONS X

On a porté sur une représentation schématique des cellules du tissu (fig. 7) le nombre des blessures reçues par chacune d'elles. Ce nombre va ici de 0 (cellules indemnes, hachurées) à 6.

uniformément dans l'espace et, au début, tous les coups comptent. Puis, quand presque toutes les cellules ont au moins une blessure, la croissance de la courbe devient très lente. Au contraire, si nous dénombrons les cellules qui ont totalisé six blessures, il y a très peu de chances au début pour qu'une même cellule soit atteinte six fois. La courbe s'élève lentement, et ce n'est qu'au bout d'un temps appréciable que l'on obtient une croissance sensible (fig. 9).

La mesure des « doses » de rayons X

Pour étudier les effets des rayons X, il faut, tout d'abord pouvoir mesurer la « dose » de cette radiation administrée dans l'unité de volume du tissu irradié. On pourrait penser à mesurer l'énergie transportée par les radiations, mais il est bien évident qu'une radiation ne devient efficace que lorsqu'elle est absorbée par le tissu. Or, le tissu vivant absorbe beaucoup plus énergiquement les rayons « mous » (de grande longueur d'onde) que les rayons « durs » (de petite longueur d'onde). Aussi a-t-on choisi pour le dosage biologique des rayons X un de

leurs effets physiques qui varie de la même façon que les effets biologiques en fonction de la longueur d'onde : l'ionisation de l'air. Les effets biologiques des rayons X sont dus, en effet, aux dommages infligés aux édifices atomiques du tissu vivant par les électrons rapides (1). Dans l'air, le même bombardement se traduit par l'ionisation, que l'on peut mesurer. De plus, l'expérience montre que l'absorption des rayons X par la matière est un phénomène atomique, c'est-à-dire qu'elle est indépendante de l'état des atomes, libres ou à l'état de combinaison. Cette absorption ne dépend que du poids atomique des constituants de la matière absorbante. Or, pour l'air, mélange d'azote et d'oxygène, l'absorption des rayons X varie sensiblement de la même façon en fonction de la longueur d'onde que pour le tissu vivant, composé surtout de carbures d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, qui se rangent dans la catégorie des poids atomiques moyens. C'est pourquoi on a adopté comme unité internationale de mesure biologique des doses de rayons X, la dose qui fait apparaître une unité électrostatique dans l'unité de volume. L'unité biologique d'intensité est le « röntgen par seconde » désigné par la lettre *r*. Pour fixer les

idées, il faut environ 700 *r* pour provoquer l'érythème de la peau et plusieurs milliers de röntgen pour le traitement d'un cancer.

La gravité des blessures infligées aux cellules

De même qu'un coup de revolver est plus ou moins grave suivant qu'il atteint sa victime au cœur, au cerveau ou dans une partie non vitale du corps, la gravité des blessures reçues par la cellule vivante dépend essentiellement de leur siège. C'est ainsi que les blessures du noyau de la cellule auront beaucoup plus de chances de la tuer que celles de son protoplasma périphérique.

Certaines lésions de la cellule sont guérissables, d'autres sont incurables. Ces lésions peuvent abolir une partie seulement des fonctions de la cellule; par exemple, celle-ci peut perdre le pouvoir de se multiplier. Elles peuvent aussi abolir la totalité de ses fonctions, et la cellule meurt immédiatement. Enfin, sans l'empêcher, ni de vivre, ni de se reproduire, elles peuvent cependant la modifier d'une façon définitive que nous préciserons tout à l'heure. Si, de la cellule isolée nous passons à la considération de l'ensemble du

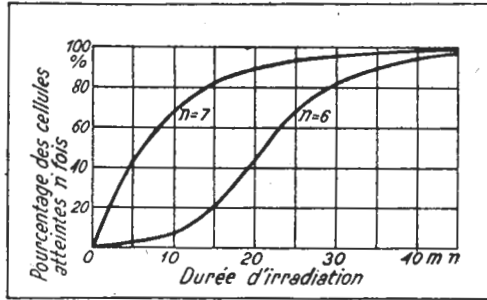


FIG. 9. — L'ACCROISSEMENT EN FONCTION DU TEMPS DU POURCENTAGE DES CELLULES BLESSÉES

L'intensité de l'irradiation restant constante, la courbe n = 1 représente, en fonction de la durée d'irradiation, le pourcentage des cellules atteintes au moins une fois; et la courbe n = 6 le pourcentage des cellules atteintes au moins six fois.

tissu, nous devons examiner dans quelle mesure il est capable, après l'irradiation, de résorber les cellules mortes et de les remplacer par le jeu normal de la multiplication des cellules restées intactes, et dans quelle mesure les modifications permanentes de certaines cellules peuvent retentir sur les fonctions de cet organisme ou sur sa descendance.

Les effets biologiques des rayons X sur l'individu

Entre le bombardement de la matière vivante par les photons X et les premiers symptômes qui révèlent une altération de la santé, il existe une longue série de réactions qui sont encore loin d'être élucidées. On distingue deux grands groupes de lésions dues à l'irradiation par les rayons X : les lésions générales et les lésions locales.

La lésion générale survient après une irradiation de tout ou presque tout le corps, comme c'est le plus souvent le cas dans les locaux de travail mal protégés et les pièces traversées par des rayons diffusés de faible intensité agissant pendant une très longue durée. Les premiers symptômes sont complexes : disparition de la sensation de bien-être qui caractérise la santé, fatigue, pâleur, neurasthénie et en premier lieu anémie. Les tissus producteurs des globules sont, en effet, particulièrement sensibles à l'action des rayons X. Les globules blancs sont les plus sensibles et les premiers atteints. Un examen régulier du sang des personnes qui travaillent au voisinage des sources de rayons X

(1) L'absorption est un phénomène atomique; de cette absorption résulte l'émission d'un électron de fluorescence ou d'un électron de recul (Compton). A partir de ce moment, l'effet sur le tissu vivant résulte de modifications ioniques ou moléculaires : modification de charges électriques dans le milieu colloïdal protoplasmique ou démolition de molécules complexes.

est une des mesures de sécurité les plus importantes, car il est possible d'obtenir une guérison complète des dommages causés par les rayons X, quand on enlève le malade de la place dangereuse à la première alerte donnée par l'examen hématologique.

Une lésion locale apparaît quand une partie du corps reçoit une dose supérieure à celle qu'elle peut tolérer sans dommage. Les doigts et les mains sont naturellement exposés en première ligne, puis le nez, les yeux et la bouche, l'irradiation se produisant quand l'opérateur examine l'objet à explorer; ensuite viennent la partie antérieure du tronc et les pieds qui sont irradiés par les fentes de la plaque inférieure mobile de protection. La peau est naturellement atteinte la première. Suivant l'intensité du rayonnement la lésion peut prendre tous les degrés. Dans les cas les plus bénins, c'est une légère rougeur (érythème) suivie d'un brunissement par apparition de pigments comme après un coup de soleil. Pour des doses plus élevées, on observe des brûlures banales guérissant en trois ou quatre semaines; ensuite viennent les nécroses profondes avec atteinte des aponeuroses et des muscles, très longues à guérir et cicatrisant mal. Dans certains cas, enfin, on peut observer, après une période de modification chronique de la peau s'étendant sur des années, une malignisation des lésions et l'apparition d'un véritable cancer des rayons X.

Les effets des rayons X sur la descendance de l'individu

En dehors de ces lésions provoquées par une irradiation excessive du corps humain, il existe d'autres effets biologiques des rayons X, qui sont complètement différents dans leur conséquence de ceux que nous venons d'énumérer, puisqu'ils ne se manifestent pas sur l'individu lui-même, mais éventuellement sur sa descendance. Ces effets sont la conséquence des blessures qui, sans empêcher la cellule de vivre et de se reproduire, la modifient pourtant irrémédiablement. Ils se produisent quand un électron atteint un point, appelé « gène », d'une certaine partie, appelée chromosome, du noyau de la cellule. Les chromosomes sont des filaments dont le nombre et la structure, uniformes pour toutes les cellules d'un même individu, sont caractéristiques de l'espèce à laquelle il appartient et conditionnent dans leurs moindres détails tous les caractères qui constituent sa personnalité.

Les chromosomes sont des chaînes de molécules géantes ou d'associations de molécules : les gènes, remarquablement stables et très actifs. On admet que les gènes sont les porteurs

des qualités héréditaires de l'individu. Ces caractères se retrouvent dans les gènes des cellules sexuelles (œuf et spermatozoïde), puisque celles-ci renferment la moitié du lot de chromosomes de chacun de leurs parents. Ils se transmettent donc à la cellule initiale du nouvel individu formée de la fusion des deux cellules reproductrices.

Si, dans les conditions normales, les gènes sont stables, ils peuvent pourtant présenter des variations soudaines, sous l'influence d'une cause connue ou inconnue, après quoi ils retrouvent un nouvel état d'équilibre. Une telle altération d'un gène s'appelle une mutation.

Les mutations peuvent se produire spontanément; on peut aussi les provoquer artificiellement. Si elles affectent une cellule sexuelle, il naîtra de cette cellule un nouvel individu, qui porte dans le gène atteint une qualité nouvelle qui reste dans sa descendance, alors que les ascendants ne la présentaient pas.

Une mutation peut améliorer le patrimoine héréditaire de la cellule où elle se produit; elle peut aussi avoir des effets déplorablement. On a parfois considéré que c'est par une série de mutations que sont apparues les espèces vivantes actuelles, les mutations favorables donnant des individus mieux adaptés qui ont éliminé les autres,

moins bien partagés. Si cela était, il faudrait donc admettre que, par suite d'une longue sélection, les espèces actuelles ont acquis dans leurs chromosomes une combinaison de gènes de haute valeur et que la sélection n'a, le plus souvent, qu'à conserver cette combinaison en éliminant les variantes fâcheuses. Dans cette combinaison, très peu probable statistiquement parlant, une mutation est le plus souvent aussi fâcheuse que le changement d'un seul chiffre au billet gagnant d'une loterie. Les mutations sont donc indésirables.

Or, le moyen le plus puissant que l'on connaisse pour les provoquer artificiellement est l'irradiation de la cellule par les rayons X ou les rayons gamma du radium. En plus des dommages causés à l'individu, les rayons X, agissant sur ses cellules reproductrices, risquent de l'atteindre également dans sa descendance.

Les mesures de protection

Pour protéger soit les opérateurs, soit les ouvriers travaillant ou passant dans le voisinage des sources de rayons X, on emploiera soit des écrans, soit des vêtements protecteurs, dans lesquels entrent du plomb, du verre au plomb, du caoutchouc au plomb ou du sulfate de baryum.

Les écrans peuvent être fixes; c'est le cas où les pièces à examiner sont déplacées devant

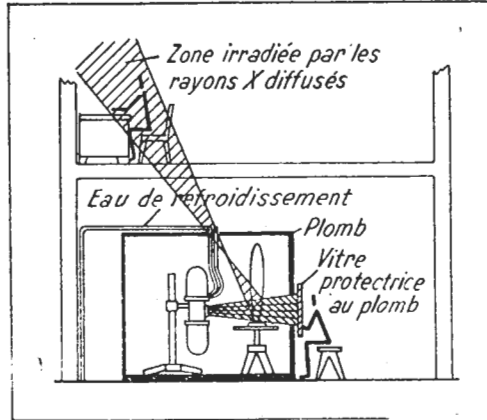


FIG. 10. — UN EXEMPLE DE FUITE DANS UNE ENCEINTE HERMÉTIQUE DE PROTECTION CONTRE LES RAYONS X

L'entrée des conduites d'eau pour le refroidissement du tube à rayons X laisse une ouverture très petite, mais cependant suffisante pour laisser passer un large faisceau de rayons diffusés de faible intensité.

T W 23744

une source fixe; les observations pourront se faire au travers d'une vitre de verre au plomb. Même quand l'espace où se trouve la source est parfaitement étanche aux radiations, on doit pourtant ouvrir périodiquement l'enceinte pour placer et retirer les objets à examiner, et pendant ce temps il importe que les radiations ne filtrent pas à l'extérieur, même pendant un temps très court. On adjoint donc à l'enceinte hermétique un certain nombre de dispositifs de sécurité: par exemple, un interrupteur peut éteindre la lampe un instant avant l'ouverture d'une porte, ou une plaque épaisse de plomb peut venir se placer devant la fenêtre de la lampe.

Quand on réalise une enceinte hermétique, il importe de vérifier qu'elle ne présente pas de fuites. La figure 10 montre avec quelle minutie cette vérification doit être effectuée.

Les écrans mobiles: plaques de plomb ou vitre de verre au plomb, sont très utiles pour assurer la protection du tableau de commande des générateurs mobiles et leur emploi devrait être généralisé.

La protection par des vêtements spéciaux est tout à fait exceptionnelle: le poids très élevé du caoutchouc au plomb rend très malcommode le port des tabliers et des gants protecteurs, sauf pour les médecins qui les utilisent couramment lorsque l'examen à l'écran comporte la palpation des organes pour l'étude de leur mobilité (estomac). Mais, dans certains cas, on peut envisager le port d'un tablier court qui, protégeant les organes sexuels, multiplie par dix, comme nous le montrerons, l'intensité que peut supporter sans dommage la personne à protéger.

La difficulté de cette protection par les écrans réside, comme nous l'avons dit au début, en ce qu'il est impossible d'arrêter totalement les rayons X, aucune substance n'étant parfaitement opaque pour eux comme le plus grand nombre des corps le sont pour la lumière visible. Les corps de poids atomique élevé sont les plus opaques, et l'isolant par excellence est le plomb; mais sa transparence augmente avec la « dureté » des radiations. Tandis que pour les rayons engendrés par des ampoules fonctionnant sous 100 kV, il suffit d'une traversée de 2 mm de plomb pour absorber les neuf dixièmes des rayons, pour les radiations beaucoup plus dures: rayons gamma du radium, qui seront employés dans certains cas, 10 mm de plomb n'arrêtent que la moitié des radiations. On voit donc que les dépenses à faire pour la protection sont très variables suivant les radiations employées. Dans certains cas, elles sont prohibitives, surtout si l'on a affaire à une source mobile (exploration des pièces de très grandes dimensions: poutres, etc...).

On n'aura alors d'autres ressources que de déterminer les zones dangereuses et de les interdire par une signalisation appropriée. Qu'il s'agisse de la détermination de ces zones dan-

gereuses ou de la vérification de l'efficacité d'un dispositif protecteur, on est donc ramené à la détermination des intensités limites que l'organisme peut supporter sans dommage.

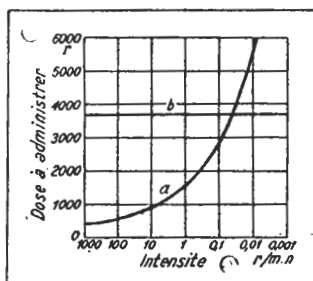
La limite supérieure des doses tolérées par l'organisme

Pour éclairer cette notion de dose tolérée, nous commencerons par étudier deux exemples d'effets des rayons X. Supposons d'abord que nous cherchions à obtenir un certain degré de noircissement d'une plaque photographique et que nous ayons pu obtenir ce noircissement par une exposition de 6 secondes avec une intensité de 0,1 r/s. L'expérience montre que le même résultat sera obtenu avec 0,01 r/s administré pendant 60 secondes, ou 0,0001 r/s administré pendant 6 000 secondes. Dans tous les cas, la dose à administrer est constante et égale à 0,6 r.

Les faits observés sont différents lorsque l'on s'adresse à un matériel vivant. Supposons que nous voulions provoquer un érythème de la peau. Si on administre à une surface donnée de la peau la dose de 650 r en 6,5 mn (l'intensité étant de 100 r/mn), on observe dans les heures et les jours qui suivent une réaction caractéristique: rougissement, puis pigmentation de la peau. Mais si on administre la même dose de 650 r en 12 heures (intensité: 0,76 r/mn), la réaction d'érythème est très affaiblie, et il faut, pour obtenir le même effet avec cette intensité plus faible, allonger la durée d'irradiation, et on sera amené à administrer 1 650 r. La raison de cette augmentation de la dose nécessaire pour faire apparaître l'érythème est que, si on espace dans le temps les impacts des projectiles sur la cellule vivante, celle-ci est capable de guérir un certain nombre de blessures avant d'être de nouveau atteinte. Il est donc plus difficile de la tuer

et il faut pour cela augmenter la dose (fig. 11). On comprend que si on abaisse suffisamment l'intensité de l'irradiation, on pourra arriver à une limite au-dessous de laquelle la cellule pourra réparer toutes les blessures et supporter sans dommage cette irradiation. Toutes les lésions que les rayons infligent à l'individu et qui se traduisent par la destruction totale de certains de ses tissus appartiennent à ce type d'action et suivent, quoi qu'avec des coefficients numériques différents, une loi analogue. Il est donc possible de trouver dans ce cas une limite de tolérance.

Au contraire, dans le premier exemple, le résultat (décomposition d'un certain nombre de grains de sel d'argent) ne varie pas avec la rapidité plus ou moins grande d'application de la dose, parce que l'émulsion, substance non vivante, ne répare pas les « blessures » qui lui sont infligées. Existe-t-il des effets biologiques du même type, tels que la « blessure » soit irréversible et atteinte du premier coup? C'est



T W 23742
FIG. 11. — VARIATION, EN FONCTION DE L'INTENSITÉ, DE LA DOSE DE RAYONS NÉCESSAIRE POUR OBTENIR UN CERTAIN EFFET BIOLOGIQUE

La courbe a représente, en fonction de l'intensité, la dose nécessaire pour obtenir l'érythème de la peau. Cette dose s'accroît quand l'intensité diminue, car les « projectiles » s'éparpillent dans le temps, la cellule peut réparer un certain nombre de ses blessures avant d'en recevoir d'autres. Au contraire (courbe b), la dose nécessaire pour provoquer 10 % de mutations chez la mouche *Drosophila* ne dépend pas de l'intensité, car l'effet d'un projectile n'est pas guérissable et la dose n'augmente pas si on espace les impacts dans le temps.

précisément le cas des mutations de gènes, et nous allons ici retrouver la dualité des effets des radiations sur l'individu et sur sa descendance.

La courbe b (fig. 11) montre que la dose nécessaire pour obtenir une certaine proportion (10 %) de mutation dans les cellules reproductrices de la mouche drosophile est indépendante de la rapidité avec laquelle cette dose est administrée. Si faible que soit l'intensité, au bout d'un temps très long on arrivera toujours à obtenir 10 % de mutations de gènes dans les cellules reproductrices d'un individu irradié. Toutes les doses, si faibles soient-elles, sont nuisibles au point de vue de la descendance de qui les reçoit. Jusqu'à quelle valeur devons-nous abaisser l'intensité d'irradiation pour que les dommages soient négligeables? Il convient ici de se rappeler que les mutations de gènes se produisent aussi spontanément. On pourra donc considérer que l'intensité à ne pas dépasser est celle qui donne une probabilité de mutations provoquées de même ordre que la probabilité des mutations spontanées.

L'étude expérimentale des effets génétiques des rayons sur les animaux et la transposition à l'homme des résultats obtenus donne une estimation de la dose quotidienne que l'individu peut « absorber » sans dommage pour sa descendance éventuelle. Cette dose est de 0,025 r/jour. Pour les personnes pour lesquelles cette limite n'a pas d'intérêt, la dose quoti-

dienne peut être dix fois plus forte, car il suffit ici d'éviter les lésions somatiques.

L'individu peut absorber, sans dommage pour lui-même, 0,25 r/jour ou 1,25 r/semaine (on retrouve le fait qu'une dose « diluée » est moins efficace). La moyenne sur de plus grandes périodes de temps n'a pas d'intérêt pratique. Si une personne n'est exposée qu'une fois par mois aux rayons, elle ne pourra pas absorber 5 r, mais 1,25 r.

La mesure d'intensités de l'ordre de 0,025 r/jour dans de grands espaces qu'il faut explorer avec un soin extrême et où il faut par conséquent multiplier les sondages, nécessite des appareils à la fois très sensibles et d'une lecture très rapide (dérivés du compteur de Geiger et Muller, utilisé en particulier pour l'étude des rayons cosmiques).

Ainsi, la protection des travailleurs contre l'action des rayons X est un problème assez complexe : il nécessite la mise en œuvre d'un faisceau de précautions : protection par écrans, interdiction des zones dangereuses, contrôle de l'efficacité des enceintes protectrices par des mesures très précises, et détection précoce des lésions des rayons X par l'examen du sang. L'ensemble de ces mesures assure une sécurité très satisfaisante et les applications des rayons X pourront se multiplier dans l'industrie sans entraîner l'apparition de nouvelles maladies professionnelles.

Henri FRANÇOIS.