



Ganil/ULP

**Ions lourds.** Chambre d'irradiation sur la ligne située dans la salle d'expérimentation D1 au Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil, CEA-CNRS). Elle se caractérise par une surface utilisable restreinte (2,5 cm<sup>2</sup>) mais très homogène d'ions dont l'énergie peut varier de 0,1 à 95 MeV par nucléon et dont le flux largement modulable permet d'obtenir des doses moyennes de quelques cGy à plusieurs milliers de Gy. Une autre aire (G4) est dédiée à l'irradiation d'échantillons biologiques de grande taille.

## Rayonnements ionisants

Afin d'étudier les effets des rayonnements ionisants sur la matière vivante, les chercheurs disposent de sources d'irradiation très diverses. Ces sources sont choisies en fonction soit de la nature du rayonnement, soit des applications recherchées. De la première vont dépendre son mode d'interaction avec la matière et donc les effets biologiques. Ce choix doit également prendre en compte certaines contraintes expérimentales liées par exemple au parcours du rayonnement dans la matière.

### Reproduire des conditions d'exposition naturelles, accidentelles ou thérapeutiques

Les objectifs de l'expérimentation en radiobiologie sont de natures très diverses. Des expériences cherchent à reproduire les différents types d'exposition à des rayonnements naturels, comme

ceux du radon auxquels sont exposés plus particulièrement la population des régions granitiques et les mineurs qui extraient le minerai d'uranium, ou le rayonnement ultraviolet solaire. Certaines visent à reproduire les effets d'expositions accidentelles : accidents avec des sources de gammagraphie ou accidents de criticité. D'autres, enfin, servent à évaluer les effets d'expositions thérapeutiques telles que la radiothérapie pour le traitement

### Rayonnements électromagnétiques ou particulaires

Les **rayonnements électromagnétiques** peuvent être soit des **rayons X**, utilisés par exemple en médecine pour le diagnostic ou des **rayonnements gamma** émis par les atomes **radioactifs**, naturels ou artificiels. Ces rayonnements sont de même nature que la lumière, les ondes radio ou les micro-ondes ou encore les **rayons ultraviolets (UV)** émis par le soleil.

Les **rayonnements "particulaires"** sont composés de particules chargées positivement (les **positons**, les **protons**, les **ions alpha** ou les **ions lourds**), négativement (les **électrons**) ou non chargées (les **neutrons**). Ils constituent l'essentiel des **rayonnements cosmiques**.

### Dépôt d'énergie à l'échelle microscopique : de moins de 1 à plusieurs centaines de keV/μm

Les rayonnements cèdent, de façon discontinue et aléatoire, tout ou partie de leur énergie à la matière qu'ils traversent.

L'importance des dépôts d'énergie à l'échelle microscopique (voir *Des outils physiques pour étudier les lésions radio-induites*) est souvent exprimée en terme de **transfert linéique d'énergie (TLE)**. La valeur moyenne du TLE varie de moins de 1 kiloélectronvolt par micromètre (keV/μm) (1 μm = 0,001 mm) pour les rayonnements électromagnétiques à plusieurs centaines de keV/μm pour des ions lourds. Lorsqu'il s'agit de neutrons, les transferts d'énergie couvrent l'ensemble de ce spectre.

Compte tenu de la variabilité des dépôts d'énergie, pour une même **dose**, l'**effet biologique** dépend du type de rayonnement. Comparer, par exemple, l'effet des rayonnements alpha et des rayonnements gamma revient un peu à comparer l'effet sur une cible d'un boulet de canon par rapport à de la mitraille : même si la quantité de projectile est identique, les dégâts seront différents.

Ainsi, dans le cas des particules alpha, quand la dose décroît, c'est le nombre de cellules atteintes qui devient moindre mais pas le niveau de l'impact sur les cellules touchées, alors que pour les rayonnements gamma, c'est la quantité d'énergie cédée par cellule qui diminue et non pas le nombre de cellules touchées.

### Les rayons de la radioactivité

**radioactivité** : processus par lequel certains (**radio**)nucléides, qui sont instables du fait de leur nombre de nucléons (protons d'une part, neutrons de l'autre) et/ou de leur état énergétique, subissent une désintégration spontanée, avec dégagement d'énergie, aboutissant généralement à la formation de nouveaux nucléides. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un ou de plusieurs types de rayonnements

**transfert linéique d'énergie (TLE)** : énergie transférée d'une particule au milieu traversé par unité de longueur. Cette grandeur s'exprime en kiloélectronvolt par micromètre (keV/μm)

**rayonnement neutronique** : non chargé, le neutron n'est arrêté que par des noyaux. La pénétration du rayonnement dépend de l'énergie des neutrons, dont le TLE est élevé. Une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine les arrête. Ce sont les éléments légers qui arrêtent les neutrons car la masse du noyau est proche de celle du neutron

**rayonnement alpha** : formé de noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons), il est très peu pénétrant. Une feuille de papier l'arrête et son trajet ne dépasse pas quelques dizaines de micromètres dans les tissus biologiques. Ce rayonnement est donc fortement ionisant (TLE élevé) car ces particules cèdent toute leur énergie sur un faible parcours. Pour les **radionucléides** qui émettent des alpha, le risque est donc celui d'une exposition interne

**rayonnement bêta** : constitué d'électrons (radioactivité bêta moins) ou de positons (radioactivité bêta plus). Ces particules au TLE faible sont arrêtées par quelques mètres d'air, une feuille d'aluminium ou sur quelques millimètres d'épaisseur dans les tissus biologiques

**rayonnement gamma** : composé de photons peu ionisants (TLE faible) mais très pénétrants (plus que ceux des rayons X utilisés en radiodiagnostic) pouvant parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air. D'épais écrans de béton ou de plomb sont nécessaires pour s'en protéger

# nts et matière vivante

de cancers ou l'utilisation de lasers en médecine, par exemple pour la correction de certains troubles visuels. Sont également menées des recherches plus fondamentales destinées à mieux comprendre les mécanismes d'action des rayonnements sur la matière, utilisant en particulier des **ions lourds** ou des **neutrons** monoénergétiques.

## Des conditions expérimentales adaptées

Les possibilités d'irradiation dépendent à la fois des caractéristiques des sources et de la nature de l'échantillon biologique.

Le **parcours des rayonnements dans la matière** est l'un des critères importants. Cette distance est fonction de la nature et de l'énergie du rayonnement. Des rayons X, gamma ou des neutrons sont capables de traverser le corps entier, même s'il existe une différence très importante entre la dose déposée à l'entrée et celle délivrée à la sortie ; des particules **bêta** parcourent plusieurs millimètres, mais des particules alpha seulement quelques dizaines de micromètres. Dans ce cas, pour irradier des cellules en culture, il est nécessaire de les faire proliférer sur un support très mince comme du *Mylar*, car les ions seraient arrêtés par l'épaisseur de plastique des flacons de culture classiques. De même, la surface

utilisable pour les irradiations, c'est-à-dire là où le rayonnement est homogène, peut être réduite à quelques centimètres carrés. Aussi limitées que possible, les expériences sur des animaux ne sont donc effectuées qu'avec certaines sources.

Les sources mises en œuvre sont de différents types : elles vont des plus simples, comme les irradiateurs du type "four de cuisine" à des salles d'irradiation voire à des machines complexes. Les premières sont utilisables directement par les biologistes 24 h sur 24 et n'exigent pas une formation approfondie des opérateurs. Dans les secondes, les caractéristiques physiques du rayonnement sont meilleures, mais elles nécessitent la présence de personnes qualifiées, compte tenu du risque d'exposition. Enfin, les expériences dans les installations les plus importantes sont planifiées plusieurs mois à l'avance après avoir été validées par un comité scientifique (voir les exemples photographiés).



A. Gonin/CEA

**Rayonnement gamma. Irradiateur IBL 637 installé au CEA/Fontenay-aux-Roses. Particulièrement simple, il permet d'irradier du matériel biologique, ici des cellules dans leur milieu de culture, par une source de césium 137.**

## Rayonnements ionisants ou non ionisants

La façon dont les rayonnements interagissent avec la matière les définit comme **rayonnements ionisants**, c'est-à-dire suffisamment énergétiques pour ioniser certains atomes du matériau traversé en leur arrachant des électrons, ou comme **rayonnements non ionisants**, tels les rayons

ultraviolets. Les rayonnements ionisants peuvent l'être *directement* (c'est le cas des faisceaux de particules chargées : électrons, protons, particules alpha ou d'ions lourds) ou *indirectement* (cas des photons des rayons X ou gamma et des neutrons).



CEA  
**Rayonnement alpha. Sur la ligne de faisceau de l'accélérateur tandem de 7 MV utilisé pour des irradiations de cellules en culture au Laboratoire de radiotoxicologie du CEA à Bruyères-le-Châtel, la gamme d'énergie, de 2 à 15 MeV, autorise des débits de dose de 0,1 à plus de 300 Gy/mn. Par ailleurs, des sources d'actinides, plutonium 239 ou américium 241, couvrent une gamme d'énergie de 4 à 5 MeV avec des débits de dose de 0,05 et 0,2 Gy/mn respectivement.**

## Il y a dose et dose...

**dose absorbée** : quantité d'énergie absorbée en un point par unité de masse de matière (inerte ou vivante), selon la définition de la Commission internationale des unités et des mesures radiologiques (ICRU). Elle s'exprime en **grays** (Gy) : 1 gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilogramme de matière. La *dose absorbée à l'organe* est obtenue en faisant la moyenne des doses absorbées en différents points, selon la définition de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)

**débit de dose** : intensité d'irradiation (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s), mais le Gy/mn est couramment utilisé

**efficacité d'un rayonnement** : un rayonnement est dit plus efficace qu'un autre lorsque l'effet obtenu pour une même dose est plus important ou quand la dose nécessaire pour observer un effet est plus faible

**dose équivalente** : quantité de dose absorbée, pondérée par des **facteurs de qualité**, différents selon les rayonnements car déterminés en fonction de leur efficacité biologique pour des effets **stochastiques**. Par exemple, les rayonnements alpha sont considérés comme 20 fois plus nocifs que les rayonnements gamma. Elle se calcule en **sieverts** (Sv)

**dose efficace** : c'est une grandeur qui a été introduite pour tenter d'évaluer le détriment en terme d'effets **stochastiques** au niveau du corps entier. Calculée à partir de la dose équivalente pour chaque partie du corps, la dose efficace tient compte des sensibilités différentes des tissus qui se traduisent par des **facteurs de pondération** par organe. Elle s'exprime en sieverts (Sv)

**dose engagée** : à la suite d'une exposition interne, c'est la dose cumulée reçue dans les cinquante années (pour les travailleurs et les adultes) ou jusqu'à l'âge de soixante-dix ans (pour les moins de 20 ans) suivant celle de l'incorporation du **radionucléide**, si celui-ci n'a pas disparu auparavant par décroissance physique ou élimination biologique