

CH V Spectroscopie Nucléaire

I. Gammagraphie

C'est une technique utilisée dans l'industrie et en médecine basée sur une source émettrice de rayonnement gamma.

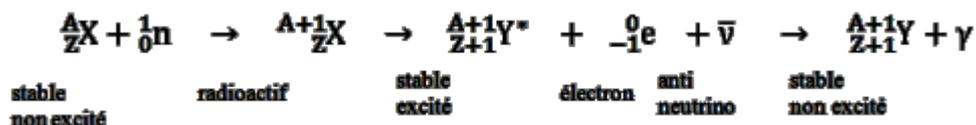
En médecine, la gammagraphie correspond à une méthode d'imagerie médicale qui procède par l'administration, dans l'organisme, d'isotopes radioactifs émetteurs de rayonnement gamma afin de produire une image médicale bidimensionnelle par la détection de l'émission gamma de ces isotopes concentrés temporairement dans les organes à examiner. La gammagraphie industrielle est utilisée en métallurgie et permet de contrôler la qualité des pièces métalliques. La technique consiste à placer la pièce à radiographier entre la source de rayonnements et un film photographique contenu dans une cassette souple ou rigide. Après un temps d'exposition dépendant de la qualité du film, de l'isotope, de l'activité de la source radioactive, la nature et l'épaisseur du matériau radiographié, le film est développé. L'interprétation du film permet de mettre en évidence certains défauts de compacité de la pièce. Les domaines d'utilisation sont nombreux (chaudronnerie, fonderie, industrie du pétrole-chimique, construction navale et aéronautique).

Les appareils de gammagraphie appelés gammagraphes (abrégié : GAM) fonctionnent à l'aide d'isotope radioactif stable (principalement iridium 192, cobalt 60 et sélénium 75). Ce sont des sources autonomes qui ne nécessitent aucune prise de courant.

II. Activation neutronique

L'analyse par activation neutronique est une méthode d'analyse chimique qui permet de mesurer, les concentrations des éléments dans les substances solides et liquides. Il s'agit de bombarder la substance par des neutrons pour la rendre radioactive et ensuite identifier les isotopes radioactifs par leurs rayons gamma émis par les différents éléments.

La méthode consiste à irradier un échantillon et un étalon de composition connue dans un flux de neutrons thermiques (c'est-à-dire très lents). Un noyau atomique de symbole chimique X, de numéro atomique Z et de masse atomique A capture avec une probabilité que l'on appelle section efficace σ un neutron, formant un noyau radioactif de même numéro atomique Z, mais de masse A+1. Ce noyau se transmute en général par radioactivité β^- dans un noyau d'un autre élément de symbole Y, de numéro atomique Z+1 et l'ensemble de la chaîne de réaction est finalement :



On relève le spectre final de rayons gamma du noyau-fils. Leur énergie est caractéristique de ce noyau et donc du noyau-père. En comptant le nombre de rayons gamma émis, on obtient une mesure du nombre d'atomes du type initial, donc un dosage de l'élément X. On mesure

donc à l'aide d'un détecteur semi-conducteur au germanium le spectre de rayons gamma émis lors de la désexcitation du noyau final.

Les mesures de radioactivité permettent d'identifier de façon très sélective chacun des atomes présents et d'en quantifier le nombre.

La radioactivité induite dans l'échantillon est faible, compte tenu de la faible intensité du flux neutronique employé ; et l'essentiel de cette radioactivité est relâchée dans un temps assez bref. Les effets à long terme sont négligeables. En ce sens, l'analyse par activation neutronique peut être qualifiée d'analyse non destructive.

III. Analyse par faisceaux

Les analyses par faisceaux d'ions (IBA pour Ion Beam Analysis) ont été développées depuis les années soixante. Les IBA sont basées sur la détection et l'analyse des produits de l'interaction atomique ou nucléaire entre un faisceau de particules chargées et les atomes constitutifs des matériaux. Les produits de ces interactions sont nombreux et la détection de chacun d'entre eux a donné naissance à une méthode d'analyse différente : l'émission de rayons X induite par particules chargées (PIXE : Particle induced X-ray emission), l'observation directe de réaction nucléaire (NRA : Nuclear Reaction Analysis) et la spectrométrie de rétrodiffusion Rutherford (RBS : Rutherford Backscattering Spectrometry).

1. Le PIXE

Son principe physique est très semblable aux autres méthodes de fluorescence comme la fluorescence X. L'analyse tire partie des interactions entre le faisceau incident et le cortège électronique des atomes constituant l'échantillon.

Le processus peut se décomposer en trois étapes :

- impact du faisceau d'ions et ionisation des couches profondes de l'atome cible ;
- comblement de la lacune ainsi formée par un électron des couches externes ;
- évacuation de l'excédent d'énergie par l'émission d'un photon X d'énergie caractéristique.

En effet l'énergie du photon émis est reliée au numéro atomique Z de l'élément considéré par la loi de Moseley :

$$E = C (Z - s)^2$$

Où C est une constante différente pour chaque série spectrale et s une constante proche de 1.

2. La Spectrométrie de Rétrodiffusion Rutherford (RBS)

La spectrométrie de rétro-diffusion élastique Rutherford – RBS – est une méthode d'analyse par faisceau d'ions qui repose sur l'interaction électrostatique entre les particules incidentes, en général un faisceau d'ions légers H^+ , $^4He^{2+}$, $^3He^{2+}$ d'énergie de l'ordre de quelques MeV, et les noyaux des atomes qui composent les couches superficielles de la cible à analyser. La détection et l'analyse en énergie des particules qui sont diffusées par la cible dans une direction donnée permettent d'identifier les masses des atomes composant la cible, leurs concentrations et leur répartition en profondeur.

En supposant qu'il y a conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, l'énergie de l'élément diffusé peut être déterminée par :

$$E_1 = E_0 \left(\frac{m_1 \cos \theta_1 \pm \sqrt{m_2^2 - m_1^2 \sin^2(\theta_1)}}{m_1 + m_2} \right)^2$$

Où la particule 1 est le projectile avec une énergie initiale E_0 , la particule 2 est le noyau cible, θ_1 est l'angle de diffusion de la particule 1 par rapport à la direction incidente avant d'avoir percuté le noyau nucléaire de l'échantillon. Le signe positif est pris lorsque la masse du projectile est plus faible que celle de la cible, sinon le signe moins est choisi.

Afin d'obtenir la distribution angulaire des particules rétrodiffusées, il est nécessaire de déterminer la section efficace différentielle :

$$\frac{d\omega}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta_1/2)}$$

Où Z_1 et Z_2 sont respectivement les numéros atomiques des particules incidente et cible.

Ces deux équations permettent de déterminer l'énergie et la probabilité qu'une particule soit détectée à un angle solide θ_1 pour une seule collision.

3. L'analyse par réactions nucléaires NRA

L'observation directe de réactions nucléaires – NRA – est une technique d'analyse par faisceau d'ions basée sur la détection des photons γ ou des particules chargées produits lors de réactions nucléaires entre les particules du faisceau incident et certains noyaux composant la cible.

Ces réactions ont en général lieu avec des éléments légers. En effet pour que se produise une réaction nucléaire il faut que la particule incidente ait suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière coulombienne du noyau cible, barrière dépendant du numéro atomique de l'élément. Elles sont, en général, induites par des particules légères. L'analyse en énergie des photons gamma permet d'identifier les masses atomiques des éléments légers présents dans la cible, et d'en mesurer la concentration, tandis que l'analyse

En énergie des particules chargées permet de mesurer la répartition en profondeur en tirant partie de la perte d'énergie de la particule produite, lors de son trajet de sortie de la cible.

IV. RMN-Imagerie

La résonance magnétique nucléaire (RMN) est une technique spectroscopique qui repose sur le magnétisme du noyau. Elle est fondée sur la mesure de l'absorption d'une radiation dans le domaine des fréquences radio par un noyau atomique dans un champ magnétique fort. Elle constitue l'une des plus puissantes méthodes de détermination de la structure des espèces aussi bien organiques qu'inorganiques.

En l'absence de champ magnétique externe, les moments magnétiques de spin sont orientés au hasard. Par contre, sous l'action d'un champ magnétique statique H_0 , ces moments vont s'aligner selon la direction du champ imposé.

Selon les lois de la mécanique quantique, seules certaines orientations discrètes de ces vecteurs sont autorisées. Dans le cas du proton, deux orientations sont permises : parallèle et antiparallèle.

La fréquence du mouvement du proton en rotation est appelée fréquence de Larmor. Il sera possible d'effectuer une transition entre les deux niveaux d'énergie en fournissant au noyau l'énergie électromagnétique $h\nu_0 = \gamma \frac{h}{2\pi} H_0$ (γ : rapport gyromagnétique dépendant du noyau) correspondant à la fréquence de Larmor. Lorsque la transition a lieu, on dit qu'il y a résonance du noyau.

Le principe de la RMN du proton (RMN 1 H) consiste à :

1. utiliser un champ magnétique H_0 pour orienter les "spins" nucléaires des atomes,
2. exciter ces spins par une onde radio à la fréquence de résonance, ce qui fait basculer certains spins,
3. après l'excitation, les spins reviennent à leur état initial (relaxation).