

EPREUVE COMMUNE DE TIPE - PARTIE D

SOURCES : Le texte est basé sur le livre intitulé "Radiocarbone dating" de Sheridan Bowman et sur un rapport de stage effectué au Centre de Faibles Radioactivités du CNRS.

TITRE : La datation par le radiocarbone.

Temps de préparation :2h15 minutes.

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes.

Entretien avec le jury :10 minutes.

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 15 pages.

Document principal : 13 pages

Glossaire : 1 page

Travail suggéré au candidat :

Décrire succinctement le principe de la méthode de datation et les hypothèses sur lesquelles elle repose. Mettre en évidence les limitations et les points forts de la méthode. Discuter les difficultés expérimentales de la mesure et les solutions proposées.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.
 - * Vous pouvez écrire sur ce dossier, le surligner, le découper...mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
 - * En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc.) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier et les brouillons utilisés pendant la préparation.
 - * En entrant dans la salle, muni d'une pièce d'identité et, si vous l'avez, de votre convocation, vous devez être prêt à débiter votre exposé.
 - * A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury ce dossier, les transparents et les brouillons utilisés, ainsi que tous les documents présentés pendant votre prestation.

Introduction

Dans les années 1950 le professeur Williard Libby et son équipe proposèrent une méthode de datation utilisant un **isotope** radioactif du carbone et l'appliquèrent à des échantillons d'âges connus : les objets de la longue civilisation égyptienne qui étaient datés historiquement. Le concept de datation absolue était né. Cette nouvelle technique du « radiocarbone » eu par la suite un impact considérable en archéologie, et plus particulièrement dans l'étude de la préhistoire, pour laquelle l'absence de documents écrits laisse beaucoup de place à la spéculation.

La méthode radiocarbone

10 Principe de base

Le carbone naturel est composé de trois isotopes. Il y a 99% de ^{12}C , 1% de ^{13}C et $10^{-10}\%$ de ^{14}C . Le ^{14}C est produit dans la haute atmosphère terrestre où des **protons** cosmiques d'origine galactique percutent les molécules de l'air. Les réactions nucléaires qui résultent de ces chocs produisent des **neutrons** qui à leur tour vont réagir avec l'azote de l'air (^{14}N), pour donner un proton et un nouvel isotope du carbone :



où n est un neutron, p un proton. L'indice inférieur indique le nombre de protons que possède l'atome (voir glossaire). Le carbone 14 ainsi formé s'oxyde rapidement pour donner une molécule de dioxyde de carbone ($^{14}\text{CO}_2$) qui se disperse et marque de façon uniforme par sa radioactivité le gaz carbonique atmosphérique. Cette radioactivité naturelle est très faible. Elle a été déterminée comme étant égale à 13.56 désintégrations par minute et par gramme de carbone (dpmg).

Le $^{14}\text{CO}_2$ est assimilé par les plantes au cours de la photosynthèse, et il marque de sa radioactivité le carbone des végétaux, puis celui du monde animal. Il se répartie ainsi à travers toute la **biosphère**. Lorsque le taux de production du ^{14}C est constant, un équilibre dynamique entre la formation et la décroissance radioactive du ^{14}C s'établi et l'abondance relative en ^{14}C se répartie de façon approximativement uniforme à travers l'atmosphère et les êtres vivants.

Lorsqu'une plante ou un animal meurt, il cesse d'échanger du carbone avec la biosphère. L'abondance en ^{14}C au sein de l'organisme commence alors à diminuer suite à la décroissance radioactive du radiocarbone en ^{14}N , selon la réaction :



où β^- correspond à un électron émis par le noyau du ${}^{14}\text{C}$ (rayonnement bêta) et γ à un photon très énergétique (rayonnement gamma).

35 La diminution du nombre d'atomes ${}^{14}\text{C}$ suit la loi de la décroissance radioactive :

$$[C^*](t) = [C_o^*] e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{\tau}} \quad (3)$$

où τ est la demi-vie de l'isotope radioactif, $[C^*]$ la concentration volumique en atomes radioactifs à l'instant t et $[C_o^*]$ la concentration au moment du décès (c'est-à-dire de l'arrêt de l'échange avec la biosphère). Pour le ${}^{14}\text{C}$, τ vaut 5730 années. Pour déterminer "l'âge radiocarbone" de l'organisme, il suffit d'inverser l'équation (3) :

40

$$t = -\frac{\tau}{\ln 2} \cdot \ln \left(\frac{[C^*]}{[C_o^*]} \right) \quad (4)$$

En d'autres termes, si les abondances relatives initiale et résiduelle (au moment de la mesure) en ${}^{14}\text{C}$ dans l'organisme sont connues, le temps qui s'est écoulé entre la mort du tissu organique et la mesure peut être obtenu. Ainsi, pour un os extrait d'un site archéologique cette mesure nous informe de l'âge de la mort de l'animal, sans nécessairement avoir recours à l'âge du contexte (la couche géologique par exemple...) dans lequel l'objet a été trouvé. A noter que selon l'équation (4), une erreur de 1% sur $[C_o^*]$ induit une erreur de l'ordre de 80 ans sur "l'âge radiocarbone".

45

50

Ils existent deux méthodes de mesure de la concentration $[C^*]$ qui seront détaillées dans le dernier paragraphe. Quelque soit la méthode de détection, la valeur de $[C^*]_o$ est obtenue en analysant des échantillons de références standards contemporains.

Matériaux analysables

55 En général, les matériaux qui peuvent être datés par le radiocarbone sont ceux qui ont, à un moment donné, fait partie de la biosphère et sont donc de nature organique. Il peut s'agir, entre autres, de morceaux d'os, de coquillages, de tissus en soie ou en laine, de l'ivoire, des cheveux, du cuir, etc., à condition qu'ils aient été correctement préservés. Ainsi, la datation d'inclusions de charbon de bois ou de restes de nourriture dans une poterie est faisable. De même, des morceaux de bois ou d'autres restes de plantes sous forme de cordes, vêtements

60

ou de graines, bien préservés dans un environnement aride et en absence d'humidité, peuvent être datés. Dans certaines circonstances on peut aussi dater des matériaux qui n'ont jamais fait partie de la biosphère. Du mortier par exemple, absorbe et piège, au cours de sa densification, du dioxyde de carbone atmosphérique.

65 **Le cycle global du carbone**

L'atmosphère, les océans et la biosphère sont des *réservoirs de carbone*. Ils font parties du cycle global du carbone, dont la figure 1 donne une représentation schématique. Pour comprendre quelques-uns des facteurs qui peuvent influencer la concentration $[C_o^*]$, on doit prendre en considération la taille et le degré d'interaction entre réservoirs. Les principaux échanges et transferts sont l'absorption du dioxyde du carbone par la biosphère et l'échange entre l'atmosphère, les océans et les lacs. La figure.1 indique que l'océan doit être considéré comme étant constitué de deux parties distinctes : une couche superficielle dite de mélange

70

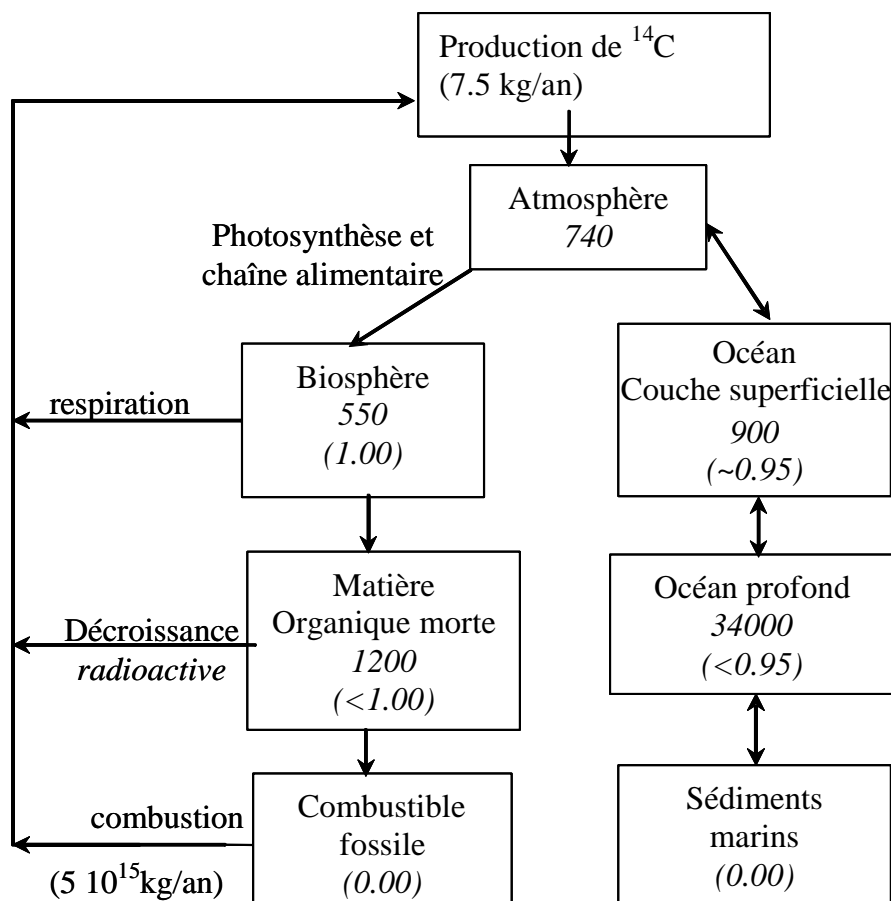


Fig. 1: Schéma simplifié du cycle du carbone, avec les réservoirs de carbone et les mécanismes d'échange. La concentration en carbone, lorsque connue, est indiquée sous chaque réservoir, l'unité étant 10^{12} kg . Le chiffre entre parenthèses est égal au rapport entre l'abondance en ^{14}C du réservoir par rapport à celui de l'atmosphère.

et l'océan profond.

75 **Hypothèses simplificatrices**

Il est utile de préciser ici les hypothèses qui sont à la base de la méthode du radiocarbone:

- L'atmosphère a eu, dans le passé, la même concentration $[C_o^*]$ qu'aujourd'hui. Ceci suppose que le taux de production du ^{14}C soit constant et qu'il y ait un mélange et un transfert rapide et constant entre les réservoirs.
- 80 • La concentration relative en ^{14}C dans la biosphère est identique à sa valeur atmosphérique. En d'autres termes, l'échange entre ces deux réservoirs doit être rapide.
- La concentration en ^{14}C est uniforme à travers toute la biosphère.
- La mort de la plante ou de l'animal correspond à l'instant où cesse l'échange avec l'environnement.
- 85 • Après l'arrêt de l'échange, $[C^*]$ n'est modifiée que par la décroissance radioactive du ^{14}C .

Dans l'absolu, toutes ces hypothèses ne sont vraies qu'en première approximation. De nombreux phénomènes peuvent invalider l'une ou l'autre des hypothèses et doivent être pris en compte. On peut les classer ainsi :

- 90 • les phénomènes physiques pouvant changer la concentration atmosphérique en ^{14}C
- les effets de sources ou de réservoirs
- l'altération de l'échantillon
- la contamination de l'échantillon.

Plusieurs phénomènes physiques peuvent induire des variations du taux de production du ^{14}C atmosphérique ou, dans certaines conditions, modifier la taille du réservoir de carbone atmosphérique (voir paragraphe suivant).

Les effets de sources ou de réservoirs sont liés à l'origine du carbone qui a été absorbé par l'organisme daté : la concentration relative en ^{14}C peut varier d'un réservoir à l'autre.

Le terme altération est utilisé ici pour décrire les procédés autres que la décroissance radioactive qui peuvent changer $[C^*]$ dans l'organisme par rapport à la valeur atmosphérique.

La contamination de l'organisme par du carbone de la biosphère après le décès de l'organisme modifie également la concentration apparente en ^{14}C (et par conséquent l'âge radiocarbone) de l'échantillon.

L'hypothèse de la simultanéité entre la mort de l'organisme et l'arrêt de l'échange avec la biosphère peut aussi parfois être erronée. Prenons l'exemple du bois. Il est bien connu que

les arbres grandissent en augmentant le diamètre du tronc d'un anneau par an. Peu après sa formation, l'anneau de croissance cesse d'échanger du dioxyde de carbone avec la biosphère. Ainsi, pour un arbre vieux de 300 ans, l'anneau central donnera un âge radiocarbone supérieur de 300 années à celui de l'écorce. En d'autres termes, lorsque seul un morceau de l'anneau central est trouvé sur un site archéologique sa datation engendrera non pas l'âge de son utilisation mais plutôt une date antérieure de 300 ans.

Facteurs influençant la concentration en ^{14}C

Variations du ^{14}C atmosphérique

Dès 1949, la technique de datation radiocarbone a été appliquée à des échantillons d'âge connu pour mettre à l'épreuve l'hypothèse de la concentration atmosphérique constante. Compte tenu des conditions expérimentales de l'époque, l'activité radioactive du ^{14}C mesurée sur des échantillons âgés entre 900 et 4900 ans semblait en bon accord avec la valeur théorique. Néanmoins, avec l'amélioration des techniques de détection, un écart non-négligeable entre les résultats théoriques et expérimentaux a été mis en évidence. Des échantillons datant de l'empire égyptien présentait un âge radiocarbone trop jeune de quelques siècles !

La technique a pu être calibrée en datant des morceaux de bois dont l'âge a été déterminé par **dendrochronologie**. La figure 2 compare l'âge radiocarbone des échantillons à leur âge réel (obtenu par dendrochronologie). Les résultats montrent l'existence d'une déviation systématique entre les deux mesures pour des périodes reculées de plusieurs milliers d'années. On peut identifier une évolution à peu près sinusoïdale de la déviation avec une périodicité de l'ordre de 9000 ans. La déviation maximale par rapport à l'âge réel, observée vers 4000 av. J.-C., induit une erreur d'à peu près -900 ans. Au milieu du premier millénaire de notre époque, la

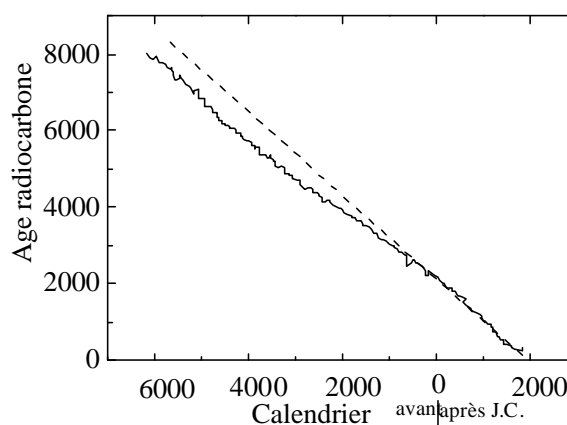


Fig. 2: Calibration de l'âge radiocarbone : la courbe en trait plein représente l'âge obtenu par le radiocarbone et la courbe en pointillée indique la valeur obtenue par dendrochronologie.

méthode radiocarbone donne lieu à des âges trop élevés d'à peu près un siècle. Des fluctuations sur des périodes courtes, de l'ordre de quelques décades, se superpose à la variation sinusoïdale et atteint une amplitude de l'ordre du siècle.

Une comparaison entre les déviations lentes et les fluctuations du champ magnétique terrestre indique que ces dernières sont, au moins partiellement, responsables de l'évolution de la concentration atmosphérique en ^{14}C . Le dipôle magnétique terrestre pourrait en effet influencer le taux de production du ^{14}C en modifiant la trajectoire des rayons cosmiques. Lorsque l'intensité du champ magnétique est plus élevée, les particules cosmiques sont déviées et atteignent moins souvent l'atmosphère terrestre, d'où une baisse de production du ^{14}C .

Les déviations sur des temps caractéristiques courts peuvent être attribuées aux fluctuations de l'activité solaire, c'est-à-dire au nombre de tâches solaires. Le nombre de tâches varie périodiquement avec une première période de l'ordre de 11 ans superposée à une deuxième variation périodique de période égale à 200 ans. Une activité solaire élevée renforce le faible champ magnétique interplanétaire et protège ainsi l'atmosphère terrestre des rayons cosmiques.

Influence des périodes glaciaires

La solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau dépend de la température : elle augmente lorsque la température de l'eau diminue. Ainsi, au cours des périodes glaciaires la quantité

de dioxyde de carbone accumulée dans les océans et dans les glaciers augmente. Au cours des périodes tempérées, interglaciaires, la fonte des glaces engendre alors un dégagement de carbone appauvri en ^{14}C et fait chuter la concentration atmosphérique en radiocarbone.

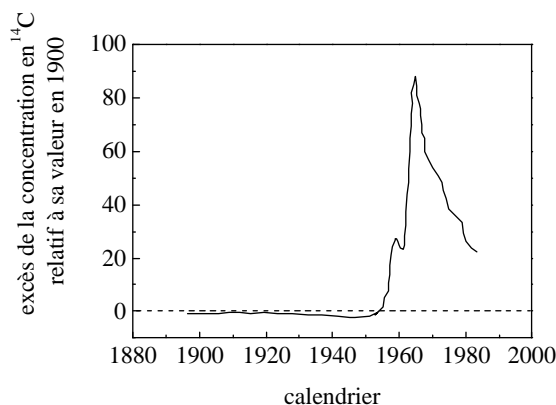


Fig. 3: Evolution récente de la concentration de ^{14}C dans les anneaux de croissance

Le renforcement de la croissance des plantes pendant la période de réchauffement et l'augmentation de la population animale qui en résulte peuvent aussi influencer le cycle du carbone. L'effet global de l'ensemble

de ces facteurs sur l'âge radiocarbone n'est pas encore totalement compris.

L'influence de l'activité humaine récente

En dehors des effets naturels, responsables d'une variation de la concentration atmosphérique en ^{14}C , l'homme a également influencé le niveau global en ^{14}C . Il y a d'abord
180 eu l'effet des combustibles fossiles. La combustion de grande quantité de matériaux fossiles, tels que le charbon, a débuté au 19^{ième} siècle. Le charbon est issu de plantes fossilisées, dont le ^{14}C a disparu depuis longtemps par décroissance radioactive. Ainsi, la combustion de charbon en grande quantité peut diluer la concentration atmosphérique en ^{14}C par rapport à la concentration des isotopes stables, ^{13}C et ^{12}C .

185 Un effet encore plus dramatique sur la concentration atmosphérique provient des essais d'armes nucléaires. Les neutrons émis lors des explosions ont produit du ^{14}C par interaction avec le ^{14}N . Les essais qui ont eu lieu dans les années 1950 et 1960 ont doublé la concentration atmosphérique en ^{14}C (voir figure 3) ! L'arrêt des essais nucléaires et la redistribution du ^{14}C entre les différents réservoirs, ont finalement réduit l'excès du ^{14}C dans
190 l'atmosphère jusqu'à une valeur qui dépasse actuellement de 20% la valeur moyenne observée au début du siècle. Cet effet a eu une conséquence majeure sur l'emploi de la méthode radiocarbone : aucun matériau organique récent ne peut être utilisé comme référence. Néanmoins, la présence de cette augmentation transitoire du taux de production de ^{14}C donne une occasion inespérée aux scientifiques pour étudier les vitesses de transferts
195 du ^{14}C entre les différents réservoirs de carbone.

Méthodes de détection du ^{14}C

Il existe deux technologies de mesures. La méthode dite conventionnelle détecte la radioactivité de l'échantillon, c'est-à-dire le nombre d'électrons émis par unité de temps et
200 par unité de poids de l'échantillon suite à la transformation du ^{14}C en ^{14}N (équation (2)), en utilisant un compteur proportionnel à gaz et un compteur à scintillateur liquide. La seconde méthode utilise la spectrométrie de masse associée à un accélérateur de particule (SMA). Elle est plus récente et mesure directement le nombre d'atomes ^{14}C .

Les compteurs nécessitent quelques grammes d'échantillon avec un temps de mesure de
205 quelques jours, alors que pour la spectrométrie de masse avec accélérateur quelques milligrammes d'échantillon et quelques heures de mesures suffisent.

Dans le cas des compteurs la masse de carbone de l'échantillon doit être identique à celle d'un échantillon standard dont l'activité est de 13,56 dpmg.

Toutes les techniques de mesures utilisées jusqu'à maintenant nécessitent la conversion de l'échantillon en CO₂, donc sa destruction. On élabore ensuite un composé carboné gazeux (compteur proportionnel à gaz), liquide (compteur à scintillateur liquide) ou solide (spectrométrie de masse avec accélérateur).

Le compteur proportionnel à gaz du C.F.R.

Le système de mesure installé au Centre des Faibles Radioactivités du CNRS est représenté sur la figure 4. Le compteur est constitué d'un condensateur cylindrique dont l'armature interne est un fil métallique (anode) et l'armature externe (cathode) un cylindre métallique contenant le gaz carboné (figure 5). Lorsque le champ électrique appliqué est suffisamment intense, les ions primaires produits par le rayonnement β^- acquièrent une énergie suffisante pour générer des ions secondaires. Le phénomène d'avalanche qui en résulte se propage et donne naissance à un signal de sortie dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie de la particule incidente.

Le volume du compteur est de 1.2 litres. Le carbone de l'échantillon est transformé au préalable en un composé gazeux (méthane, acétylène ou gaz carbonique) puis utilisé comme gaz de remplissage du compteur. Les désintégrations du ¹⁴C peuvent ainsi être enregistrées facilement.

Le compteur est installé au sein d'un scintillateur en forme de puits. Celui-ci est utilisé pour détecter le passage des rayons cosmiques (voir ci-dessous).

Un détecteur à scintillation est composé d'un scintillateur et d'un photomultiplicateur

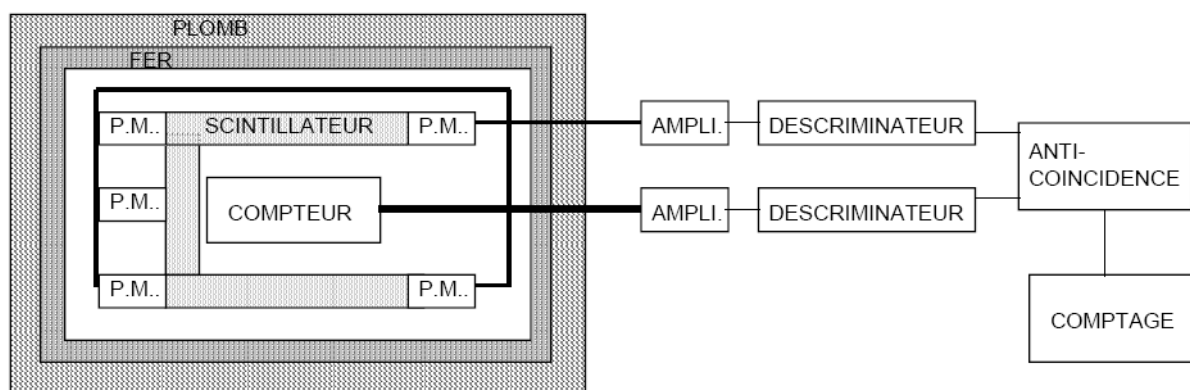


Figure 4 : Système de mesure du radiocarbone installé au Centre des Faibles Radioactivités du CNRS.

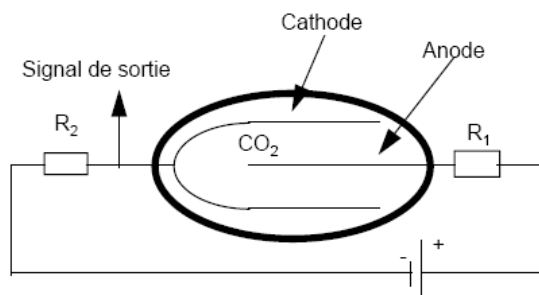


Figure 5 : Schéma de principe d'un compteur à gaz

(figure 6). Le scintillateur est constitué d'un matériau qui permet la conversion de l'énergie de la particule incidente (particules cosmiques, rayonnement β -, γ ,...) en photons. Le rayonnement incident excite des atomes ou des molécules du scintillateur dont le retour à l'état fondamental est accompagné de l'émission de photons.

240 Lorsque ces photons atteignent la photocathode du photomultiplicateur des électrons sont émis. Un champ électrique accélère ces électrons vers la première dynode où leur impacte libère d'autres électrons, lesquels sont à leur tour accélérés vers la deuxième dynode, et ainsi de suite. L'ensemble des électrons est collecté par l'anode et délivre le signal de sortie.

245 Lorsque le système est traversé par un rayonnement cosmique, la lumière émise par le scintillateur est vue par le photomultiplicateur (P.M.). L'impulsion produite est transmise à un circuit anti-coïncidence qui bloque momentanément l'entrée de comptage du compteur. Ainsi, la contribution cosmique au bruit de fond du compteur est éliminée.

250 Les circuits discriminateurs permettent d'éliminer les signaux parasites propres au compteur et aux photomultiplicateurs (P.M.) L'ensemble est installé à l'intérieur d'une protection constituée par du plomb et du fer. Le rayonnement gamma ambiant est arrêté par ce blindage. Le bruit de fond du compteur est ainsi réduit à 0.8 dpm. Il est déterminé en utilisant comme gaz de remplissage du CO₂ provenant de la combustion d'antracite.

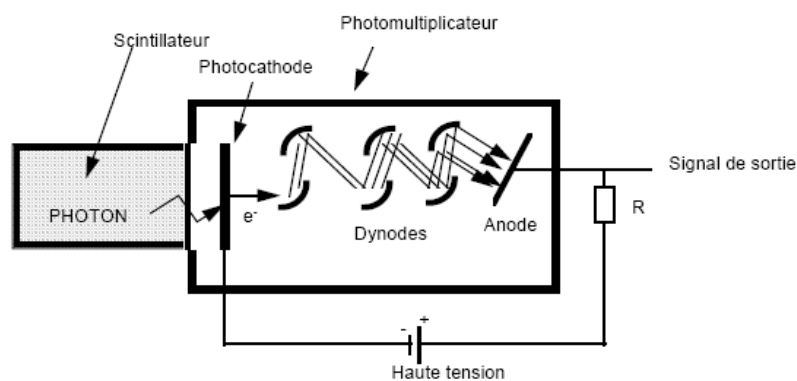


Figure 6 : Schéma de principe d'un détecteur à scintillation

Spectrométrie de masse par accélérateur tandem (SMA)

Le principe d'une SMA est illustré sur la figure 7.

255 Pour dater un échantillon on commence par transformer le CO₂ purifié en graphite qui est placé dans une source (a). Il est bombardé par un faisceau de césium; celui-ci éjecte des ions négatifs de l'échantillon. Les ions azote (¹⁴N⁻) sont éliminés sitôt créés car ils sont très instables. Le faisceau d'ions est accéléré par une plaque portée à une tension positive U₁ (b).

260 Notons e la charge de l'électron et q le nombre de charge. Les ions de masse m et de charge qe acquièrent une vitesse v et une énergie cinétique E donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = qeU_1 \quad (4)$$

Le faisceau d'ions traverse un champ magnétique B (c) perpendiculaire à sa direction. Par conséquent les ions suivent un mouvement circulaire uniforme de rayon R qui, selon la loi fondamentale de la dynamique, s'écrit :

$$265 \quad R = \sqrt{\frac{2mU_1}{qeB^2}} \quad (5)$$

Comme la source produit des ions de charges unitaires, l'aimant permet une première séparation en fonction de la masse. Les molécules de même masse ne sont pas séparées : ¹²CH⁻, ¹³C⁻ et ¹⁴C⁻, ¹²CH₂⁻, et ¹³CH⁻.

270 L'aimant est réglé de manière à laisser passer les ions de masse 14. Ces ions entrent dans un accélérateur tandem (d). Dans la première partie les ions sont accélérés par une tension U₂. Dans la partie centrale, ils entrent en collision avec un nuage d'argon qui a pour effet :

- de dissocier les radicaux ¹²CH₂ et ¹³CH en leurs constituants, ¹²C, ¹³C et H,
- d'arracher des électrons aux ions négatifs. Ceux-ci deviennent positivement chargés et

275 possèdent une charge qe . L'état de charge le plus probable des ions est $q = 3$, mais on trouve aussi des ions dans un état de charge $q = 2$ et $q = 4$.

Les ions positifs sont accélérés dans la seconde partie où la tension électrique décroît. A la sortie de l'accélérateur tandem l'énergie totale des ions vaut:

$$\begin{aligned} E_s(14) &= e(U_1 + U_2 + qU_2) \\ E_s(13) &= e\frac{13}{14}(U_1 + U_2) + qeU_2 \\ E_s(12) &= e\frac{12}{14}(U_1 + U_2) + qeU_2 \end{aligned} \quad (6)$$

280 où $E_s(M)$ représente l'énergie des ions de masse atomique M . L'énergie dépend de la masse et de l'état de charge q des ions.

Le faisceau d'ions positifs pénètre dans un déflecteur électrostatique (f) où règne un champ électrique E perpendiculaire au faisceau. Ils suivent un mouvement circulaire uniforme (les plaques ont une géométrie circulaire) de rayon R qui s'écrit :

$$R = \frac{2E_s}{qeE} \quad (7)$$

285 Le déflecteur ne laisse passer que les particules ayant le même rapport E_s/q . S'il est réglé pour laisser passer les ions $^{14}\text{C}^{+3}$, les ions ^{12}C et ^{13}C quel que soit leur état de charge ainsi que les ions $^{14}\text{C}^{+2}$ et $^{14}\text{C}^{+4}$ ne sont pas transmis.

290 En pratique, des échanges de charges peuvent également se produire après le nuage d'argon, de sorte que l'énergie E_s des différents ions varie de façon continue dans une gamme assez large. Les deux aimants d'analyse trient une ultime fois les ions en fonction de leur rapport $(mE_s)/q^2$ et les ions $^{14}\text{C}^{+3}$ qui arrivent sont comptés (g).

La spectrométrie de masse par accélérateur permet de mesurer directement les rapports isotopiques $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon et du standard.

On effectue trois séries de mesures :

- 295
- le nombre d'ions ^{14}C arrivant dans le détecteur,
 - le nombre d'ions ^{12}C en les faisant passer au travers de l'accélérateur,
 - le nombre de coups de parasites (bruit) sur un échantillon ne comportant pas de ^{14}C .

300

Conclusion

La datation au radiocarbone est un sujet de recherche d'actualité. Dans les années à venir, les progrès dans les matières aussi diversifiées que la géophysique, la météorologie, l'astrophysique, la physique nucléaire ou encore la biologie contribueront, sans aucun doute, à améliorer la précision de l'âge radiocarbone et à étendre son domaine d'application.

305

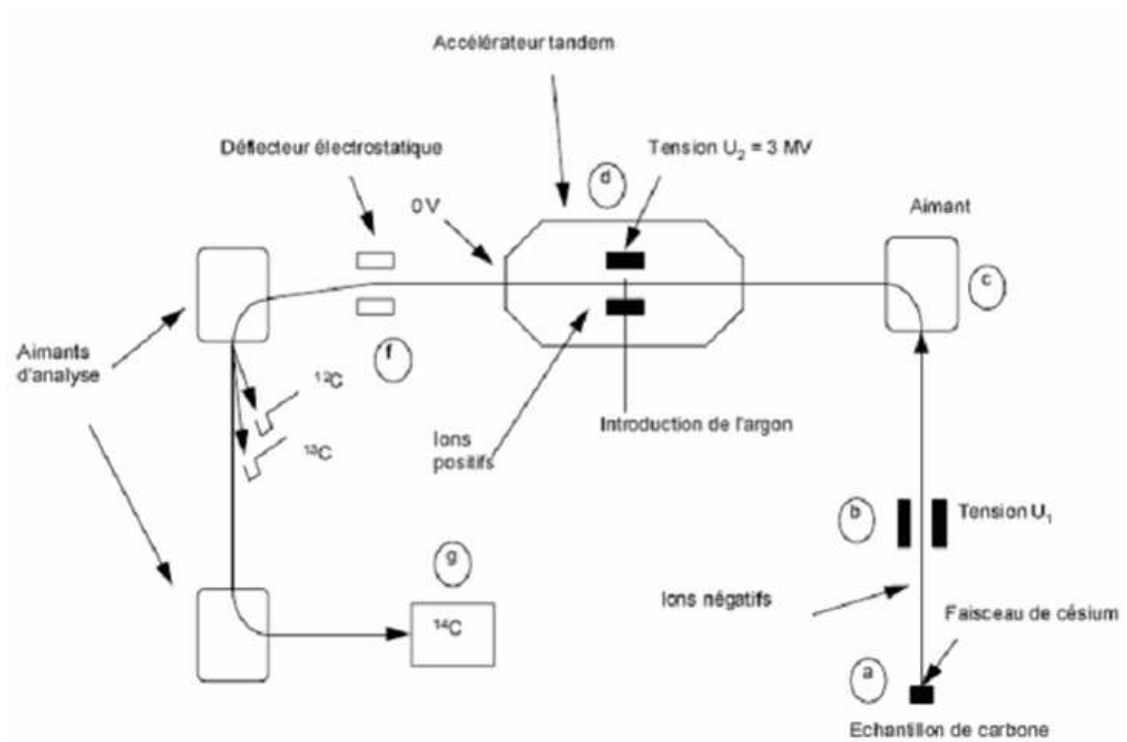


Figure 7 : Représentation simplifiée d'un spectromètre de masse utilisant un accélérateur tandem.

GLOSSAIRE

310 **Isotope** : Le noyau d'un atome est constitué de protons et de neutrons. Deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons. Le nombre de protons dans le noyau d'un atome étant désigné par le numéro atomique, deux isotopes ont aussi le même numéro atomique.

Un isotope est couramment désigné par son symbole chimique, complété par son nombre de masse A (égal au nombre total de protons et de neutrons qui constituent le noyau de l'atome) placé en haut et à gauche du symbole. Exemple: le carbone 14 de nombre de masse 14 est noté ^{14}C .

Il est d'usage de compléter cette écriture par le numéro atomique Z, placé en bas et à gauche du symbole, pour décrire une réaction nucléaire dans laquelle intervient un isotope.

320 Le carbone 14 est ainsi noté $^{14}_6\text{C}$

Ainsi, le carbone 14, $^{14}_6\text{C}$, et le carbone 12, $^{12}_6\text{C}$, sont des isotopes.

Les propriétés chimiques des isotopes d'un même élément sont identiques car ils ont le même nombre d'électrons. En revanche, comme le noyau ne comporte pas le même nombre de neutrons, la masse des atomes varie. Cette différence de masse atomique permet de séparer les isotopes d'un même élément par spectrométrie de masse ou par centrifugation et ainsi de les distinguer. De plus, la proportion de neutrons dans le noyau peut rendre l'atome instable : c'est pourquoi ils peuvent être radioactifs.

Protons : Le proton est une particule subatomique portant une charge électrique de $1,602 \times 10^{-19}$ coulombs.

330 **Neutrons** : Le neutron est une particule subatomique électriquement neutre de même masse que le proton. Neutrons et protons sont les constituants élémentaires du noyau des atomes.

Biosphère : La biosphère est la partie du système terrestre dans laquelle la vie s'est développée.

335

Dendrochronologie: Datation par l'étude des variations d'épaisseur des anneaux de croissance des arbres.