	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

Notions de radioprotection pour la manipulation des radioéléments ^{32}P et ^{33}P dans les laboratoires de l'UMR AGAP

Sommaire

1. Objectif /Principe	1
2. Notions de base sur la radioactivité.....	1
A. Les Atomes	1
B. La Radioactivité	3
C. Caractéristiques et Effets des Rayonnements	5
1. Définitions.....	5
2. Résumé des caractéristiques des radioisotopes ^{32}P et ^{33}P	8
3. Classification des Locaux et des Travailleurs	8
4. Consignes pour le Travail en Zone Surveillée.....	10

1. Objectif /Principe

Ce document¹ est un support écrit accompagnant la formation obligatoire sur la manipulation de radionucléides (sources non-scellées) dans les laboratoires de l'UMR AGAP au CIRAD. Le suivi de cette formation conditionne l'autorisation à travailler avec des produits radioactifs, avec une validité de 3 ans.

2. Notions de base sur la radioactivité

A. Les Atomes

Un atome est constitué d'un noyau (lui-même formé de protons et de neutrons), autour duquel gravitent des électrons.

¹ Sources:

INRA BPMP, "NOTIONS DE RADIO-PROTECTION APPLIQUÉES AU CAS DU LABORATOIRE BPMP".

ASN-DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET DE LA RADIOPROTECTION. 31 décembre 2003. Recueil des dispositions législatives et réglementaires concernant la protection de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.


Matt Connolly, Tim Sanders, Rachel. 9/8/11. Radiation Laboratory Working Rules (ka2.114).

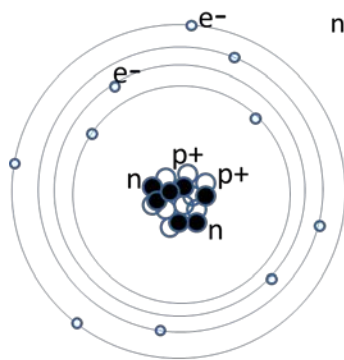
<http://www.deakin.edu.au/research/integrity/radiation/documents/guidelines.pdf>.

Harvard University Radiation Safety Manual,

http://www.ehs.harvard.edu/sites/ehs.harvard.edu/files/radiation_safety_manual.pdf.

Wikipedia.

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	



noyau (chargé +)



- p+ = protons (chargés +) : nombre Z
- n = neutrons (non chargés) : nombre N
- e- = électrons (chargés -) : il y a Z électrons dans un atome à l'état d'équilibre électrique

Le nombre de nucléons – les protons et les neutrons – d'un atome, est appelé « Nombre de masse » et est noté A. Ainsi, $A = Z + N$.



Un élément chimique est noté par un symbole d'une ou deux lettres, par ex.

H, C, N, O, ou Fe, Cu, Ag, Au, représentent, respectivement: hydrogène, carbone, azote ('nitrogenium'), oxygène, fer, cuivre, argent, or ('aurum'). A chaque élément chimique correspond un nombre fixé, Z, de protons dans son noyau. Le nombre de neutrons, lui, est plus ou moins variable (en restant proche ou un peu supérieur à celui des protons).

Pour un élément chimique donné, les atomes différant par leurs nombres de neutrons sont appelés isotopes. Pour caractériser les isotopes, on indiquera le nombre de masse A, toujours en haut à gauche du symbole de l'élément. Le nombre de neutrons N peut être déduit par soustraction du nombre Z qui est le même pour tous les isotopes d'un même élément chimique.

Donc, les « isotopes » d'un même élément chimique X possèdent le même nombre de protons (numéro atomique Z), mais diffèrent par leur nombre total de nucléons (nombre de masse A).


Exemple :

- ^{32}P et ^{33}P sont des isotopes du phosphore $^{31}_{15}\text{P}$
- l'élément chimique phosphore, de symbole P, a pour numéro atomique $Z=15$
- avec 16 neutrons dans son noyau, donnant un nombre de masse $A=31$, l'atome de phosphore est non-radioactif
- avec 17 neutrons dans son noyau, $A=32$, c'est l'isotope ^{32}P radioactif.
- avec 18 neutrons dans son noyau, $A=33$, c'est l'isotope ^{33}P radioactif.

L'atome est neutre électriquement si la somme des charges négatives des électrons équilibre la charge positive globale du noyau (nombre de charge Z).

Un atome est généralement stable si le nombre de neutrons est très proche du nombre de protons ($N \sim Z$) et s'il n'est pas trop gros, les noyaux de plus de 82 protons étant généralement instables.

- ⇒ La transformation d'un neutron en proton est possible parce qu'ils ont des masses presque identiques ; chacun de ces nucléons est composé de trois quarks de configuration « up » ou « down » : pour passer de la configuration « neutron » (1 quark up + 2 quarks down) à la configuration « proton » (2 quarks up + 1 quark down) il suffit qu'un quark « down » se transforme en quark « up ».

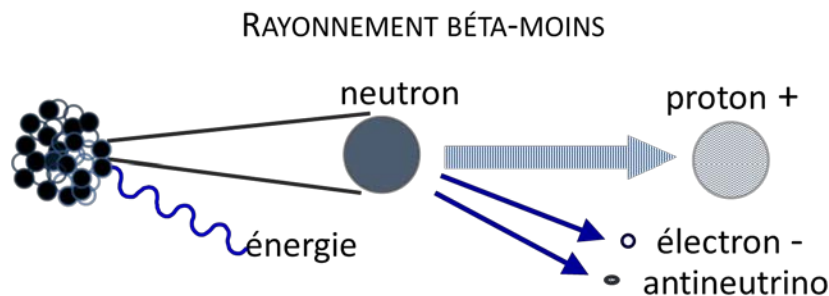
	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

⇒ Le retour d'un noyau instable à l'équilibre, par évacuation ou transformation d'un neutron, ou par fragmentation du noyau, s'accompagne d'émissions de rayonnements qui peuvent être particulaires (alpha, électrons, neutrons, ...) ou électromagnétiques (photons X ou gamma).

B. La Radioactivité

Types de rayonnement

* **Rayonnement Béta-moins** : Quand le nombre de neutrons est trop grand, le noyau tend vers un état plus stable par transformation d'un neutron en proton. L'énergie libérée se matérialise sous forme d'un électron et d'un antineutrino (particule neutre, de masse quasi-nulle). Pour revenir à l'équilibre, le noyau émet un rayonnement électromagnétique (X ou gamma suivant le niveau d'énergie). Les électrons sont arrêtés par des écrans en plexiglas, dont l'épaisseur dépend de l'énergie du rayonnement.



Les radioéléments utilisés à AGAP, ^{32}P et ^{33}P , sont émetteurs de rayonnements béta-moins (" β^- ").

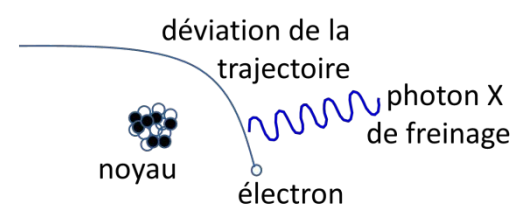
* **Rayonnements X** : L'émission de photons X peut faire principalement suite à trois phénomènes :
 → l'émission d'une particule,
 → la déviation d'un électron par un noyau,
 → la capture électronique.


On s'en protège au moyen d'écrans en résine imprégnée de plomb.

- La désexcitation du noyau après émission d'une particule alpha ou béta, provoque l'émission d'un rayonnement gamma si le niveau énergétique est suffisant, ou X dans le cas contraire.

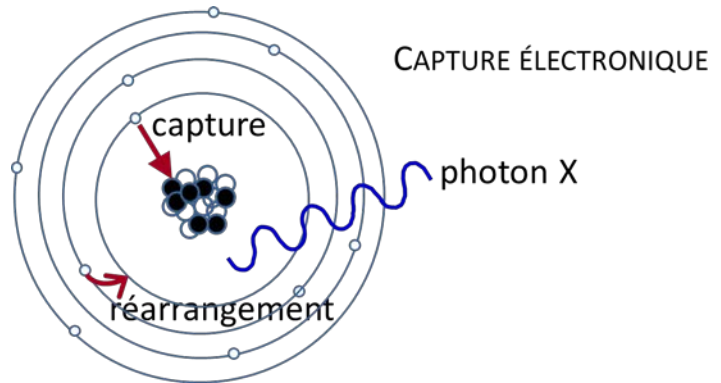
- Rayonnement X de freinage : si un électron béta-moins passe au voisinage d'un noyau, sa trajectoire est déviée, ce qui libère de l'énergie sous forme de rayonnement X. L'intensité de ce rayonnement, dit « de freinage », est proportionnelle au carré du nombre de charge Z du matériau traversé (les métaux lourds ont une charge Z élevée).

RAYONNEMENT X DE FREINAGE

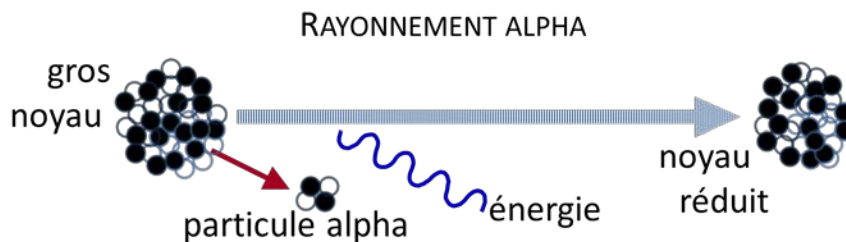


	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

- Un noyau trop riche en protons peut attirer un électron de la couche L : le réarrangement du cortège électronique de l'atome, qui fait suite à cette « capture électronique », produit de l'énergie et peut entraîner l'émission de photons X.



* **Particules alpha** : un gros noyau diminue de taille en expulsant une particule alpha, équivalente à un noyau d'Hélium : 2 protons + 2 neutrons. Cette séparation produit de l'énergie cinétique qui peut être émise sous forme de rayonnement gamma. Les rayonnements alpha sont stoppés par quelques centimètres d'air. Pourtant ils sont très dangereux en raison de leur pouvoir ionisant très élevé.



* **Neutrons** : d'origine surtout artificielle (fission des très gros noyaux), ils sont parfois utilisés en raison de leur forte capacité de pénétration de la matière (sonde à neutron rapides des humidimètres). Le rayonnement neutronique est très dangereux et difficile à gérer en radioprotection. On peut s'en protéger grâce à des matériaux riches en protons (eau, béton, polyéthylène, ...) qui favorisent le ralentissement des neutrons par réaction élastique et qui permettent leur capture par réaction inélastique. Mais cette capture est généralement suivie d'un rayonnement gamma dont il faut aussi se protéger.

* **Protons** : ces particules légères et chargées positivement proviennent des supernovae et des explosions solaires. Les personnels navigant à bord des avions sont particulièrement exposés aux faisceaux de protons qui composent la plus grande part des rayonnements cosmiques avec les particules alpha.

C. Caractéristiques et Effets des Rayonnements

1. Définitions

* **Rayonnement ionisant** : Rayonnement de nature particulaire (alpha, bêta, neutrons) ou électromagnétique (gamma ou photons X), provoqués par la désintégration d'un noyau atomique instable. Il est dit « ionisant » car il est capable d'arracher des électrons à la matière, en particulier la matière vivante. → **Les utilisateurs de radioactivité à AGAP sont exposés à des rayonnements ionisants de types bêta et/ou éventuellement X.**

* **Activité** : Nombre de désintégrations par unité de temps. L'ancienne unité d'activité (Curie ou Ci) a été remplacée par le Becquerel ou Bq (nombre de désintégrations par seconde).
 Conversion : 1 μCi = 37 kBq ou 0.037 MBq.

→ **Les sources commandées à AGAP ont une activité de 250 μCi = 9,25 MBq, ou de 500 μCi = 18,5 MBq**

L'unité du Becquerel est l'inverse de la seconde, 1/seconde ou s^{-1} .

Exemples de conversions entre Bq et Ci :

ancienne unité	unité du système international	
1 Ci =	3.7×10^{10} Bq	37 GBq
1 μCi =	37000 Bq	37 kBq

unité du système international	ancienne unité	
1 Bq =	2.7×10^{-11} Ci	2.7×10^{-5} μCi
1 Bq =	27 picocurie	$27 \cdot 10^{-12}$ Ci
1 GBq =	0.027 Ci	27 mCi


* **Energie** : Caractéristique d'un rayonnement, exprimée en multiples de l'électronvolt (eV), qui dépend de la configuration atomique du radioélément émetteur. L'énergie détermine le pouvoir de pénétration du rayonnement dans la matière, en particulier sa trajectoire dans l'air, et par conséquent ses capacités à irradier un organisme.

→ **Les rayonnements β^- du ^{32}P (1,7 MeV) traversent 8 mètres dans l'air ;**

→ **Les rayonnements β^- du ^{33}P (249 keV) ne dépassent pas quelques dizaines de centimètres : 46 cm comme distance maximale d'action dans l'air.**

* **Différents types d'exposition** : Suivant la partie du corps atteinte par un rayonnement, on distingue :

- les expositions externes, dues à la proximité de la source, qui peuvent être localisées et superficielles, générales et superficielles ou profondes

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

- l'exposition interne par contamination, due à la pénétration de la source à l'intérieur de l'organisme (par inhalation, ingestion ou traversée de la barrière cutanée) et son éventuelle fixation dans un organe-cible.

* **Dose** : grandeur utilisée en radioprotection, exprimée en sous-multiple du Sievert (Sv), qui exprime la quantité de rayonnements réellement capables d'atteindre les cellules vivantes.

Note : Le "rem", une unité de mesure de dose stochastique pour les effets biologiques, maintenant inutilisée sauf aux Etats-Unis, est définie depuis 1976 comme égale à 0.01 sievert. Le rem étant une dose importante, il est le plus souvent question de millirem, mrem, cad 1/000 rem. Le nom rem vient de "Roentgen equivalent in man", ou "in mammal".

La dose dépend :

- du type de rayonnement,
- de son énergie,
- de la quantité d'activité manipulée,
- de la distance à la source,
- du temps d'exposition.

Pour réduire les doses d'exposition externe, il faut donc :

- ❖ augmenter la distance par rapport à la source,
- ❖ diminuer la durée d'exposition,
- ❖ travailler derrière un écran si nécessaire,
- ❖ manipuler de faibles activités
- ❖ et choisir des radioéléments d'énergie la plus faible possible.

Pour réduire les risques de contamination, il faut porter une blouse et des gants, travailler sous hotte chimique si nécessaire, diminuer la durée d'exposition et appliquer scrupuleusement les bonnes pratiques de Laboratoire.


→ On distingue :

- la "dose équivalente" qui correspond à l'exposition superficielle (le plus souvent au niveau des mains)
- et la "dose efficace" qui correspond à l'exposition externe et interne (contamination par inhalation) du corps entier.

L'analyse d'un poste de travail repose sur le calcul de ces deux types de doses, reçues par un opérateur pendant la réalisation d'un protocole expérimental complet.

Exemples de doses calculées pour quelques protocoles et une situation accidentelle :

- Protocole Southern (³²P) : dose équivalente-mains = 0,3 mSv ; dose efficace totale = 0,2 µSv (0,26 mSv sans écran)
- Protocole Foot-Print (³²P) : dose équivalente-mains = 1,5 mSv ; dose efficace totale = 1 µSv (1,5 mSv sans écran)

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

- Dépôt accidentel d'une goutte de source de 9,25 MBq sur la main (avec gant) pendant 1 min : dose équivalente-peau environ 22 mSv avec ³²P ; environ 200 mSv avec ³³P

* **Effets déterministes, effets stochastiques** : en arrachant des électrons à la matière vivante, le rayonnement provoque la formation de radicaux libres qui endommagent l'ADN des cellules. Si la réparation de l'ADN est complète et fidèle, l'exposition n'a aucune suite. Si elle est incomplète, erronée ou impossible, des pathologies peuvent apparaître.

- ❖ Les effets sont dits « déterministes » pour des doses supérieures à 1 Sv, qui provoquent la mort cellulaire (réparation de l'ADN impossible). Les symptômes (nécroses, nausées, hémorragie, coma) apparaissent en quelques heures ou quelques jours, leur gravité est proportionnelle à la dose reçue.
- ❖ Les effets sont dits « stochastiques » pour les faibles doses (réparations de l'ADN incomplètes ou erronées) qui peuvent affecter la régulation du cycle cellulaire. Les symptômes apparaissent de manière tardive et imprévisible, et sont indépendants de la dose d'exposition : il n'y a pas de dose minimale garantissant l'absence d'effet stochastique.

➔ **Les activités manipulées dans l'UMR AGAP induisent principalement des effets stochastiques.**

* **Période de demi-vie radioactive (= période physique)** : Temps à la fin duquel l'activité d'une source a diminué de moitié : après n périodes, l'activité initiale est donc divisée par 2^n , d'où possibilité de gérer en décroissance les déchets de certains radioéléments (après 20 périodes, elle est réduite à moins d'un millionième de sa valeur initiale).

- ³²P (T_{1/2} = 14.3 jours) : 20 x T_{1/2} ≅ 10 mois
- ³³P (T_{1/2} = 25.4 jours) : 20 x T_{1/2} ≅ 17 mois.

Précisément, le calcul de la décroissance se fait par la formule : $A = A_0 \times e^{(-t/T \times \text{Log } 2)}$, où A est l'activité au bout du temps t, A₀ l'activité de départ, T la période de demi-vie de l'élément.

* **Période de demi-vie biologique** : temps à la fin duquel l'activité incorporée par contamination interne a diminué de moitié. Cette durée dépend des capacités d'élimination de l'organisme.

➔ **Environ 9 mois pour ³²P et ³³P.**

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

2. Résumé des caractéristiques des radioisotopes ^{32}P et ^{33}P

	^{32}P	^{33}P
Elément chimique	Phosphore, Z=15	Phosphore, Z=15
Type de rayonnement	β^- (béta-moins) pur	β^- (béta-moins) pur
Energie	1,7 MeV	249 keV
Activité spécifique 100% (Ci/mmol)	9131	5118
Trajet maximum dans l'air (m)	8 mètres	0.46 m
Trajet maximum dans le verre (mm)	3.6 mm	0.24mm
Trajet maximum dans le plexiglas (mm)	6.6 mm	0.6mm
Trajet maximum dans l'eau (μm)	8000 μm	600 μm
Coefficient de volatilité	0.01	0.01
Période de demi-vie radioactive $T^{1/2}$	14.3 jours	25.4 jours
Période de demi-vie biologique	Environ 9 mois	Environ 9 mois


- ⇒ Ces isotopes émettent donc seulement des particules β^- , c'est à dire des électrons ; leur énergie suffisante pour en faire des rayonnements ionisants. ^{32}P et ^{33}P sont des émetteurs β^- purs : il n'y a pas d'émission de rayons gamma, X ou α .
- ⇒ Les écrans en matériaux de faible densité sont à privilégier en raison du rayonnement β^- émis par ^{32}P et ^{33}P , car ils vont absorber le rayonnement ; les écrans métalliques sont à éviter car ils produiront des rayons X, très nocifs, par le mécanisme du rayonnement de freinage.
- ⇒ Le trajet du rayonnement β^- dans l'air est assez limité avec ^{33}P , mais important avec ^{32}P .
- ⇒ Les radiations β^- sont aisément arrêtées par le plexiglas ou le verre : le trajet maximum dans ces matériaux est court, de l'ordre de quelques millimètres ; les radiations β^- sont très vite arrêtées par l'eau également.
- ⇒ La volatilité est très basse en conditions normal : pas de production de vapeurs ou gaz, donc une contamination de l'atmosphère du laboratoire n'est pas attendue.

3. Classification des Locaux et des Travailleurs

- Les zones de radioprotection sont classées en fonction des doses efficaces reçues en un an par les personnes qui y travaillent. Les valeurs limites sont :

- 1 mSv en zone "tout public"
- 6 mSv en zone surveillée
- 20 mSv en zone contrôlée.

- Les travailleurs utilisant des radioéléments sont classés en fonction des doses efficaces et équivalentes qu'ils reçoivent au cours de leurs manipulations sur douze mois consécutifs. Les limites supérieures pour la catégorie Travailleur B sont de 6 mSv en dose efficace et 150 mSv en dose équivalente. Au-delà de ces doses, les travailleurs sont classés en catégorie A.

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

Noter que la dose reçue par suite du dépôt accidentel d'une goutte de ^{32}P sur la main, même protégée par un gant, entraîne la classification du manipulateur en catégorie A (dose équivalente maximale 500 mSv).

*** Obligations pour une Zone Surveillée :**


- ⇒ Autorisation de l'Autorité de Sûreté Nucléaire, renouvelée tous les 10 ans
- ⇒ dose efficace inférieure à 6 mSv par an pour tout utilisateur
- ⇒ accès de la zone réservé aux utilisateurs enregistrés, suivis et formés
- ⇒ affichage et signalisation ("trèfle") des plans de travail réservés aux manipulations avec radioactivité,
- ⇒ affichage des consignes en cas d'accident radiologique
- ⇒ blouse, gants et dosimètre obligatoires dès l'entrée de cette pièce
- ⇒ gestion de tous les effluents comme déchets radioactifs : pas d'évier raccordé au réseau
- ⇒ traçabilité totale des radionucléides manipulés, depuis leur commande jusqu'à leur élimination
- ⇒ contrôle périodique des surfaces et appareillages ; traçabilité des résultats
- ⇒ contrôle annuel des installations par un organisme accrédité.

*** Obligation pour les Travailleurs en catégorie B (utilisateurs de ^{32}P et ^{33}P à Agap) :**

- ⇒ dose efficace inférieure à 6 mSv par année de travail, dose équivalente-peau inférieure à 150 mSv par an
- ⇒ désinscription en cas de dépassement accidentel des doses autorisées
- ⇒ calcul de l'exposition pour le protocole de manipulation utilisé
- ⇒ enregistrement individuel à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
- ⇒ autorisation médicale obligatoire et visite médicale annuelle
- ⇒ suivi dosimétrique passif (dosifilm) trimestriel,
- ⇒ formation, contrôle de formation et mise à jour de formation tous les 3 ans

Les principes de base pour limiter l'exposition aux rayonnements ionisants générés par les radionucléides ^{32}P et ^{33}P sont :

- équipements de protection individuelle (EPI) : blouse (fermée), gants, lunettes
- écrans plexi (épaisseur 7mm mini) entre manipulateur et matières radioactives
- éloignement entre manipulateur et matières radioactives
- durée réduite d'exposition du manipulateur aux matières radioactives

	Instruction P32 P33	
	Formation radioprotection	

4. Consignes pour le Travail en Zone Surveillée

- ⇒ **Le travail à l'intérieur des zones surveillées est strictement réservé aux utilisateurs formellement agréés par une *Personne Compétente en Radio-protection* ("PCR") de l'UMR AGAP.**
- ⇒ **Les consignes de radioprotection sont impératives : leur non-respect entraîne la perte d'autorisation à manipuler des sources radioactives.**

Dosimétrie et protection individuelle

- La blouse, le dosimètre individuel et les gants sont obligatoires pendant toute la durée du séjour en zone surveillée.
- Hors utilisation, les badges doivent être rangés sur le portoir devant l'entrée du laboratoire P32.
- Les sondes disponibles pour contrôler la radioactivité sont aptes à détecter des rayonnements bêta- de plus ou moins forte énergie

Sondes disponibles dans les 2 labos	Contaminamètre MIP21	Contaminamètre MIP10	Polyradiamètre ICTO	Contaminamètre de poche MCB1
Laboratoire ³² p	1	1	1	3
Laboratoire ³³ p	1			2

- Les dosimètres individuels sont de type thermoluminescent ; ils permettent de mesurer la quantité de radiations reçues sur des périodes d'un trimestre. Ils doivent être portés accrochés à la poche-poitrine.
- Des études réalisées dans les laboratoires d'AGAP ont montré qu'il n'y a pas de contamination de l'air, et que l'irradiation effective au niveau des doigts est très faible ; les mesures trimestrielles réalisées sur les dosimètres individuelles ne montrent jamais d'irradiation détectable.

Christopher Viot, Donaldo Meynard, André Bouët, PCRs UMR AGAP