

PCSI 2018/2019

Corrigé du Devoir Surveillé de chimie n°3

Radiosondes pour la détection du cancer

I) Étude cinétique d'une étape de la synthèse du précurseur PPC-DOTA

1) L'AEQS est une approximation qui consiste à considérer que tous les intermédiaires réactionnels très réactifs, qui restent en concentration négligeable dans le milieu réactionnel, atteignent après une durée d'induction, une concentration quasi-stationnaire. Ils sont donc créés et détruits sensiblement à la même vitesse.

Cette approximation s'applique ici :

- à l'intermédiaire C, car il est « hautement instable » ;
- aux intermédiaires D et E : en effet, l'étape [III] qui les détruit est beaucoup plus facile que l'unique étape qui les crée, qui est l'étape [II].

2) D'après le mécanisme, la vitesse de formation de F est égale à v_3 :

$$v = v_f(\text{F}) = v_3$$

Pour l'intermédiaire C, on exprime :

$$\frac{d[\text{C}]}{dt} = v_1 - v_{-1} - v_2 + v_{-2} \approx v_1 - v_{-1} - v_2 \quad (\text{car } v_{-2} \ll v_2)$$

$$\text{L'AEQS implique donc : } v_1 \approx v_{-1} + v_2 \quad (1)$$

Pour l'intermédiaire D (ou E), on exprime :

$$\frac{d[\text{D}]}{dt} = v_2 - v_{-2} - v_3 \approx v_2 - v_3 \quad (\text{car } v_{-2} \ll v_2)$$

$$\text{L'AEQS implique donc : } v_2 \approx v_3 \quad (2)$$

La relation (2) permet d'écrire la vitesse de formation de F à partir de v_2 soit, d'après la loi de Van't Hoff des actes élémentaires :

$$v = v_3 = v_2 = k_2[\text{C}]$$

La relation (1) permet d'exprimer la concentration de C en fonction de celle de A et B car, en appliquant à nouveau la loi de Van't Hoff :

$$k_1[\text{A}][\text{B}] = k_{-1}[\text{C}] + k_2[\text{C}] = (k_{-1} + k_2)[\text{C}]$$

$$\text{soit : } [\text{C}] = \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} [\text{A}][\text{B}]$$

On obtient donc finalement :

$$v = k_2[\text{C}] = \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} [\text{A}][\text{B}]$$

Avec les notations c_A et c_B recommandées par l'énoncé, on écrit :

$$v = \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \cdot c_A \cdot c_B$$

3) Pour suivre une réaction en solution par conductimétrie on utilise un conductimètre, qui est constitué :

- d'un boîtier contenant un ohmmètre, un affichage, et des touches ou boutons permettant d'entrer la valeur de la constante de cellule ;
- d'une **cellule de conductimétrie**, qui contient à son extrémité deux plaques parallèles en platine platiné, que l'on plonge dans la solution.

La cellule est reliée aux bornes de l'ohmmètre par l'intermédiaire d'un câble coaxial.

4) La loi de Kohlrausch exprime que la conductivité d'une solution est la somme des conductivités dues à chaque soluté ionique présent de la manière suivante :

$$\sigma = \sum_{\text{ions } i} (\lambda_i \cdot c_i)$$

σ : conductivité de la solution en $S \cdot m^{-1}$

λ_i : conductivité molaire de l'ion i en $S \cdot m^{-2} \cdot mol^{-1}$

c_i : concentration de l'ion i en $mol \cdot m^{-3}$

5) Les intermédiaires réactionnels ioniques C et E sont en concentration négligeable comme rappelé à la question 1. Les autres ions présents sont l'ion hydroxyde HO^- , c'est-à-dire le réactif B, et l'anion F en lequel il se transforme. De plus, par électroneutralité, il y a nécessairement présence d'un cation. D'après la figure 2, on voit que le réactif de cette étape est en fait NaOH : on a donc apporté autant d'ions Na^+ que d'ions HO^- pour réaliser cette transformation.

En conclusion :

Les ions présents en quantité non négligeables sont les ions B (HO^-), F et Na^+ .

D'après la loi de Kohlrausch, la conductivité vérifie :

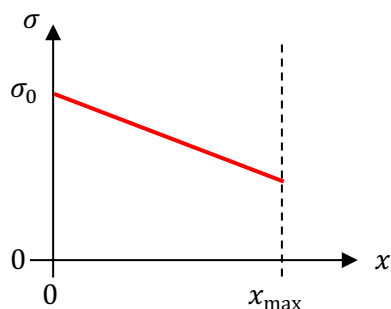
$$\sigma = \lambda_B c_B + \lambda_F c_F + \lambda_{Na^+} c_{Na^+}$$

Soit c_0 la concentration initiale de NaOH apportée. Pour un avancement volumique x , le bilan de la réaction donne : $c_F = x$ et $c_B = c_0 - x$. Les ions Na^+ sont spectateurs et restent à la concentration c_0 . On en déduit :

$$\sigma = \lambda_B (c_0 - x) + \lambda_F x + \lambda_{Na^+} c_0$$

$$\sigma = (\lambda_B + \lambda_{HO^-}) c_0 + (\lambda_F - \lambda_B) \cdot x = \sigma_0 + (\lambda_F - \lambda_B) \cdot x$$

Si on admet les concentrations assez faibles pour que les λ_i soient constants, la conductivité varie donc en **relation affine avec l'avancement**. Comme l'énoncé indique que $\lambda_F < \lambda_B$, le coefficient directeur est négatif (la réaction remplace des ions HO^- plus conducteurs par des ions F moins conducteurs). D'où l'allure du graphe demandé :



Lors du suivi cinétique, on mesure la conductivité à différents instants, on utilise ce graphe pour en déduire l'avancement x à ce moment-là, puis on en déduit la concentration $c_B = c_0 - x$. On peut alors tracer le graphe de la figure 4.

6) On constate tout d'abord que B est toujours introduit en très large défaut par rapport à A. Dans

chacune des trois expériences réalisées, on a toujours : $c_{B_0} \ll c_{A_0}$. Par conséquent, la concentration de A reste quasiment constante au cours de chacun des suivis cinétiques, la loi de vitesse $v = k \cdot c_A^m \cdot c_B^n$ se simplifie donc en :

$$v = k' \cdot c_B^n, \text{ où } k' = k \cdot c_{A_0}^m \text{ est la constante cinétique apparente.}$$

Pour chaque suivi cinétique, la loi de vitesse est $v = k' \cdot c_B^n$, donc d'ordre apparent n . On est dans une situation de **dégénérescence de l'ordre**.

Par ailleurs, le choix des valeurs des concentrations initiales obéit à des considérations d'ordre expérimentales : les concentrations des ions ne doivent notamment pas être trop élevées, pour que les λ_i de la loi de Kohlrausch restent à peu près constants (condition d'utilisation du graphe de la question 5), ni trop faibles, pour que la conductivité mesurée ne soit pas perturbée par la présence des impuretés ioniques.

7) Détermination de l'ordre n

Pour une valeur de c_{A_0} donnée, donc de k' donnée, on constate que les points s'alignent lorsqu'on porte $\log\left(\frac{c_B}{c_{B_0}}\right)$ en fonction du temps. Ceci révèle que l'ordre vaut $n = 1$.

En effet, la loi $-\frac{d[B]}{dt} = k' \cdot c_B$ s'intègre en : $\ln c_B = \ln c_{B_0} - k' \cdot t$, soit $\ln\left(\frac{c_B}{c_{B_0}}\right) = -k' \cdot t$

Il s'agit ici du logarithme décimal, donc : $\log\left(\frac{c_B}{c_{B_0}}\right) = -\left(\frac{k'}{\ln 10}\right) \cdot t$

Pour l'ordre 1, $\log\left(\frac{c_B}{c_{B_0}}\right)$ est en relation linéaire avec le temps : c'est bien ce que l'observe sur chacun des trois suivis cinétiques réalisés. On peut donc conclure :

L'ordre par rapport à B est $n = 1$.

Remarque : L'ordre étant $n = 1$, le temps de demi-réaction est bien constant, **pour un suivi cinétique donné** (c'est-à-dire pour une valeur de c_{A_0} donnée). On le vérifie par exemple ainsi, sur la courbe où $c_{A_0} = 0,200 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$:

- lorsque c_B atteint la valeur $\frac{c_{B_0}}{2}$, on a $\log\left(\frac{\frac{c_{B_0}}{2}}{c_{B_0}}\right) = \log\left(\frac{1}{2}\right)$. Le temps de demi-réaction est donc la durée pour atteindre $\log\left(\frac{1}{2}\right)$ sur le graphe soit $t_{\frac{1}{2}} \approx 0,4 \text{ min}$;
- si on prend cette concentration $\frac{c_{B_0}}{2}$ comme nouvelle concentration initiale, alors une nouvelle division par 2 de cette concentration correspondra à $\log\left(\frac{\frac{c_{B_0}}{4}}{\frac{c_{B_0}}{2}}\right) = \log\left(\frac{1}{4}\right)$: on lit sur le graphe que cette valeur est atteinte à l'instant $t = 0,8 \text{ min}$. Il a donc bien fallu à nouveau $t_{\frac{1}{2}} \approx 0,4 \text{ min}$ pour passer de $\log\left(\frac{1}{2}\right)$ à $\log\left(\frac{1}{4}\right)$.
- de même, on atteint la valeur $\log\left(\frac{1}{8}\right)$ à $t \approx 1,2 \text{ min}$. Il faut bien à nouveau $t_{\frac{1}{2}} \approx 0,4 \text{ min}$ pour passer de $\log\left(\frac{1}{4}\right)$ à $\log\left(\frac{1}{8}\right)$...

Le fait que $t_{\frac{1}{2}}$ soit constant est caractéristique de l'ordre 1. Mais on ne pouvait pas utiliser cette propriété ici pour vérifier que $n = 1$ de manière convaincante. En effet, les trois mesures précédentes de $t_{\frac{1}{2}}$ sont très approximatives. De plus, on dispose de trop peu de points. Les autres courbes sont inutilisables, car on n'atteint même pas $\log\left(\frac{1}{8}\right)$, ni même $\log\left(\frac{1}{4}\right)$ pour la première, durant les 2 minutes de l'expérience...

Détermination de l'ordre m

L'influence de la valeur de m se fait sentir lorsqu'on modifie la concentration c_{A_0} : choisir une autre valeur de c_{A_0} modifie en effet la constante cinétique apparente $k' = k \cdot c_{A_0}^m$, ce qui se traduit par des

coefficients directeurs différents pour les trois suivis cinétiques réalisés.

On pourrait mesurer ces trois coefficients directeurs sur la figure 4, mais il est plus judicieux ici d'utiliser les temps de demi-réaction. En effet, comme on l'a expliqué dans la remarque précédente, $t_{\frac{1}{2}}$ se mesure très facilement en lisant sur le graphe à quel instant $\log\left(\frac{c_B}{c_{B0}}\right)$ atteint la valeur $\log\left(\frac{1}{2}\right)$. On trouve :

$$\text{pour } c_{A0} = 0,040 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} : t_{\frac{1}{2}} \approx 2,0 \text{ min}$$

$$\text{pour } c_{A0} = 0,100 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} : t_{\frac{1}{2}} \approx 0,8 \text{ min}$$

$$\text{pour } c_{A0} = 0,200 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} : t_{\frac{1}{2}} \approx 0,4 \text{ min}$$

On constate donc que $c_{A0} \times t_{\frac{1}{2}} = 0,20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min} = Cte$: **le temps de demi-réaction est inversement proportionnel à la concentration c_{A0} .**

Or chaque suivi est d'ordre apparent $n = 1$ et vérifie la loi $\ln\left(\frac{c_B}{c_{B0}}\right) = -k' \cdot t$. On en déduit : $t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k'}$ et, sachant que $k' = k \cdot c_{A0}^m$, on obtient : $t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k \cdot c_{A0}^m}$.

Comme on a constaté que $t_{\frac{1}{2}}$ était inversement proportionnel à c_{A0} , on en déduit que $m = 1$:

L'ordre par rapport à A est $m = 1$.

La constante cinétique k vaut donc :

$$k = \frac{\ln 2}{c_{A0} \times t_{\frac{1}{2}}} = \frac{\ln 2}{0,20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}} = 8,7 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$$

Conclusion :

La réaction est d'ordre global 2 et de constante cinétique $k = 8,7 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$

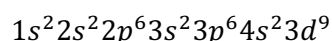
8) Les résultats expérimentaux confirment la loi cinétique déduite du mécanisme : $v = k \cdot c_A \cdot c_B$.

On peut en déduire qu'il est *possible* que le mécanisme proposé soit correct, mais ce n'est pas une *certitude*, car d'autres mécanismes pourraient conduire à la même loi de vitesse.

II) Radioétiquetage au cuivre-64

A- Généralités sur l'élément cuivre

1) Le cuivre est dans la 4^{ème} période de la classification, le nombre quantique principal le plus élevé rencontré est donc : $n_{max} = 4$. De plus, il est situé dans la colonne n°11, qui est la 9^{ème} colonne du bloc d : sa configuration électronique selon la règle de Klechkowski se termine donc par d^9 . De ces deux informations, on établit la configuration :



On compte 29 électrons. Comme l'atome est neutre, c'est également le nombre de protons dans le noyau, donc le numéro atomique :

$$Z = 29$$

2) On rappelle tout d'abord que la masse molaire d'un nucléide est sensiblement égal à son nombre de masse en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, soit : $M(^{63}\text{Cu}) = (63,0 \pm 0,1) \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et $M(^{65}\text{Cu}) = (65,0 \pm 0,1) \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

En notant x l'abondance naturelle de ^{63}Cu et $y = 1 - x$ celle de ^{65}Cu , on exprime la masse molaire du cuivre naturel par :

$$M(\text{Cu}) = x \cdot M(^{63}\text{Cu}) + y \cdot M(^{65}\text{Cu}) = x \cdot M(^{63}\text{Cu}) + (1 - x) \cdot M(^{65}\text{Cu})$$

$$M(\text{Cu}) = M(^{65}\text{Cu}) + x(M(^{63}\text{Cu}) - M(^{65}\text{Cu}))$$

On en déduit :

$$x = \frac{M(^{65}\text{Cu}) - M(\text{Cu})}{M(^{65}\text{Cu}) - M(^{63}\text{Cu})} \approx 0,75$$

Les abondances naturelles des isotopes du cuivre sont d'environ 75% pour ^{63}Cu et 25% pour ^{65}Cu .

3) Ar est le symbole de l'**argon**, qui est un **gaz noble**. [Ar] désigne sa configuration électronique, qui est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$.

4) Pour établir la configuration électronique d'un atome dans son état fondamental, on utilise la **règle de Klechkowski**, qui énonce que les OA se remplissent dans l'ordre croissant de $n + \ell$ et, en cas d'égalité, dans l'ordre croissant de n .

Ainsi, on prévoit que l'OA $4s$, pour laquelle $n + \ell = 4 + 0 = 4$, doit être remplie avec les OA $3d$, pour lesquelles $n + \ell = 3 + 2 = 5$. C'est pourquoi on a trouvé $[\text{Ar}]4s^2 3d^9$ à la question 1.

Or la configuration fondamentale du cuivre, est $[\text{Ar}]4s^1 3d^{10}$: la règle de Klechkowski n'est pas vérifiée.

5) L'oxygène est un élément situé en haut et à droite du tableau périodique (ligne 2, colonne 16). Il est donc beaucoup plus électronégatif que le cuivre. Sa configuration électronique étant $1s^2 2s^2 2p^4$, un atome O tend à capter deux électrons supplémentaires pour compléter sa couche de valence et devenir l'anion O^{2-} .

Par électroneutralité de Cu_2O , on en déduit que l'ion du cuivre dans ce solide ionique est Cu^+ .

La combustion du cuivre dans le dioxygène a pour équation : $2\text{Cu}_{(s)} + \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} = \text{Cu}_2\text{O}_{(s)}$.
 Cu_2O est un solide ionique contenant les ions Cu^+ et O^{2-} .

Le fluor est un élément situé en haut et à droite du tableau périodique (ligne 2, colonne 17). Il est donc beaucoup plus électronégatif que le cuivre. Sa configuration électronique étant $1s^2 2s^2 2p^5$, un atome F tend à capter un électron supplémentaire pour compléter sa couche de valence et devenir l'anion F^- .

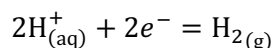
Par électroneutralité de CuF_2 , on en déduit que l'ion du cuivre dans ce solide ionique est Cu^{2+} .

La combustion du cuivre dans le difluor a pour équation : $\text{Cu}_{(s)} + \text{F}_{2(g)} = \text{CuF}_{2(s)}$.
 CuF_2 est un solide ionique contenant les ions Cu^{2+} et F^- .

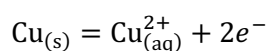
6) Le gaz qui se dégage lorsque de l'eau acide oxyde un métal est le **dihydrogène**, gaz que l'on peut mettre en évidence en le récupérant dans un tube et en présentant une allumette à la sortie du tube.

On entend alors un « jappement » caractéristique.

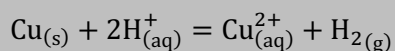
Ce gaz provient de la réduction des protons selon la demi-équation :



Ces électrons sont fournis par le cuivre métallique, qui est oxydé en ions $\text{Cu}_{(\text{aq})}^{2+}$ (ions de couleur bleue), selon la demi-équation :



L'équation de la réaction s'obtient en additionnant ces deux demi-équations pour éliminer les électrons :



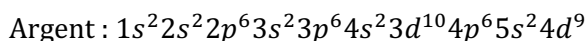
7) Dans ces trois réactions, le cuivre cède ses électrons, pour passer d'atomes Cu à des ions Cu^+ ou

Cu^{2+} . C'est donc le caractère **réducteur** du cuivre qui est mis en évidence.

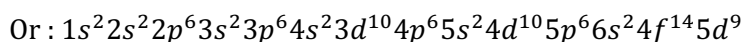
Notons que le cuivre est faiblement réducteur, puisqu'il faut des conditions très dures pour le faire réagir : cuivre porté au rouge placé dans du dioxygène pur, ou utilisation d'un oxydant très puissant comme le gaz difluor, ou encore mise en présence d'une solution d'acide sulfurique concentrée.

8) L'argent et l'or étant situés sous le cuivre, colonne 11, du tableau périodique, on sait que leurs configurations électroniques selon la règle de Klechkowski se terminent comme Cu par d^9 .

Pour l'argent, $n_{max} = 5$ et pour l'or, $n_{max} = 6$. On trouve donc :



$$Z_{\text{Ag}} = 47$$



$$Z_{\text{Au}} = 79$$

9) Les électrons « de type f » de l'or sont ceux des OA $4f$. On a donc :

Nombre quantique principal : $n = 4$

Nombre quantique azimutal : $\ell = 3$ (signification du « f »)

Le nombre quantique magnétique peut prendre toutes les valeurs entières entre $-\ell$ et $+\ell$, soit :

$$m_\ell = -3; -2; -1; 0; +1; +2; +3$$

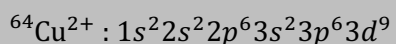
Le nombre quantique de spin d'un électron peut valoir a priori $m_s = +\frac{1}{2}$ ou $m_s = -\frac{1}{2}$.

B- Radioactivité du cuivre 64 et radioétiquetage

10) Le cuivre a pour numéro atomique $Z = 29$. Tout noyau d'un atome ou ion du cuivre contient donc $Z = 29$ protons. Pour l'isotope ^{64}Cu , le nombre de masse est $A = 64$, c'est-à-dire que le noyau d'un atome ou d'un ion de cet isotope est formé de 64 nucléons, et contient donc $N = A - Z = 35$ neutrons.

Un noyau de $^{64}\text{Cu}^{2+}$ contient 29 protons et 35 neutrons.

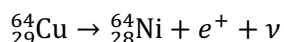
Un cation $^{64}\text{Cu}^{2+}$ est un atome ^{64}Cu qui a perdu 2 électrons. On retire donc 2 électrons de la configuration électronique du cuivre $[\text{Ar}]4s^1 3d^{10}$ en commençant par l'OA la plus haute en énergie, qui est l'OA $4s$. On trouve alors la configuration :



11) Dans cette désintégration, un noyau $^{64}_{29}\text{Cu}$ (29 protons, 35 neutrons) se désintègre pour donner un noyau $^{64}_{28}\text{Ni}$ (28 protons, 36 neutrons). Autrement dit, il y a toujours 64 nucléons mais **un proton s'est transformé en neutron**. Comme il y a toujours **conservation de la charge électrique** dans une transformation, il y a nécessairement émission simultanée d'une particule chargée positivement, qui n'est pas un nucléon : c'est le positron, l'antiparticule de l'électron, notée e^+ ou β^+ .

Remarque : il y a également émission d'un neutrino (noté ν).

La transformation nucléaire s'écrit :



Les positrons sont détectés par la tomographie à émission de positrons, ce qui permet de localiser les sondes radioétiquetées.

12) Une désintégration radioactive α , β^+ ou β^- est toujours d'ordre 1. Le fait que le temps de demi-vie ait une valeur indépendante de la quantité initiale de noyaux nous le rappelle.

Autrement dit, le nombre de noyaux qui se désintègrent par seconde est proportionnel au nombre de

noyaux, ce qui donne l'équation différentielle :

$$-\frac{dN_{\text{Cu}}}{dt} = \lambda \cdot N_{\text{Cu}}$$

... où λ est la constante cinétique de la désintégration.

Cette relation s'intègre ainsi :

$$\begin{aligned}\frac{dN_{\text{Cu}}}{N_{\text{Cu}}} &= -\lambda \cdot dt \\ \int_{N_0}^{N_{\text{Cu}}} \frac{dN_{\text{Cu}'}}{N_{\text{Cu}'}} &= -\lambda \cdot \int_0^t dt' \\ [\ln N_{\text{Cu}'}]_{N_0}^{N_{\text{Cu}}} &= -\lambda \cdot t \\ \ln N_{\text{Cu}} - \ln N_0 &= -\lambda \cdot t\end{aligned}$$

On obtient finalement la **loi de décroissance radioactive** :

$$N_{\text{Cu}} = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Pour $t = t_{\frac{1}{2}}$, on a $N_{\text{Cu}} = \frac{N_0}{2}$ ce qui, injecté dans la relation précédente, donne :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot \exp\left(-\lambda \cdot t_{\frac{1}{2}}\right)$$

En passant au logarithme :

$$-\ln 2 = -\lambda \cdot t_{\frac{1}{2}}$$

Soit finalement :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

13) Comme on l'a établi plus haut :

$$A = -\frac{dN_{\text{Cu}}}{dt} = \lambda \cdot N_{\text{Cu}}$$

On en déduit donc le nombre de noyau à partir de l'activité radioactive :

$$N_{\text{Cu}} = \frac{A}{\lambda} = \frac{A \cdot t_{\frac{1}{2}}}{\ln 2}$$

Pour obtenir une quantité de matière en moles, il reste à diviser par la constante d'Avogadro, et on trouve :

$$n_{\text{Cu}} = \frac{A \cdot t_{\frac{1}{2}}}{\mathcal{N}_a \cdot \ln 2} = 3,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol}$$

14) La réaction étudiée ici est la réaction de radioétiquetage schématisée à la figure 1a.

La concentration apportée de PPC-DOTA est $c_1 = \frac{1 \mu\text{mol}}{300 \mu\text{L}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et celle de $^{64}\text{Cu}^{2+}$ est $c_2 = \frac{3,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol}}{300 \mu\text{L}} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Si on fait l'hypothèse que la réaction est quasi-totale à l'équilibre, alors on obtient le tableau d'avancement volumique suivant :

	PPC-DOTA	+	$^{64}\text{Cu}^{2+}$	=	$[\text{}^{64}\text{Cu}]\text{-PPC-DOTA}$	$K^\circ = 10^{22,5}$
concentrations apportées	$3,3 \cdot 10^{-3}$		$1,3 \cdot 10^{-5}$		0	
concentrations à l'équilibre	$\approx 3,3 \cdot 10^{-3}$ (grand excès)		traces ϵ		$\approx 1,3 \cdot 10^{-5}$	

en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

On calcule la concentration résiduelle ϵ de $^{64}\text{Cu}^{2+}$ en appliquant la loi de Guldberg et Waage.
À l'équilibre :

$$K^\circ = Q_{eq} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5} \cdot c^\circ}{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \epsilon}$$

... dont on tire :

$$\epsilon = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot K^\circ} = 1,2 \cdot 10^{-25} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Cette concentration est bien négligeable devant la concentration apportée $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, ce qui valide l'hypothèse d'une réaction quasi-totale.

La réaction de radioétiquetage est bien quasi-totale.