Biophysique- Lois cinétiques

Table des matières

I. Loi de décroissance d'une population de noyaux radioactifs

Radioactivité : émission d'une particule éventuellement associée à un rayonnement qui fait suite à une désintégration d'un noyau instable.

La radioactivité est un phénomène **statistique**.

Tout noyau instable va se désintégrer de manière :

- **Aléatoire/imprévisible** (on ne sait pas à quel instant t notre noyau va se désintégrer)
- **Stationnaire dans le temps/la probabilité de désintégration est invariable** (ne dépend pas de la durée de notre observation dans le temps)

ILLUSTRATION : On peut comparer ça à une partie de dé, on veut faire une suite de nombre (ex : 1-2-3-4)

- La probabilité de réussir/échouer est la même à chaque partie = STATIONNAIRE
- ET elle est indépendante de la partie précédente ,on ne sait pas à quel lancer on va y arriver = ALÉATOIRE

A) La constante radioactive λ

La probabilité P qu'un nucléide subisse une transformation radioactive pendant un intervalle de temps d'observation dt est :

$$\boxed{P(dt) = \lambda \cdot dt}$$

La constante radioactive **λ** :

- a une dimension qui est l'inverse d'un temps, en secondes-1 (mais on peut l'exprimer également en minutes-1 , heures-1 , années-1)
- λ dépend de la **nature du nucléide** : la constante radioactive est différente s'il s'agit de C14 ou d'O15 (tous 2 instables), mais λ dépend aussi du **niveau d'énergie du noyau**.
- ne dépends **PAS** des **conditions physico-chimiques de l'environnement** (température du milieu, pH, environnement moléculaire…)

Exemple : Le Carbone 14 à λ= $1,2.10^{-4}$ an^{-1}.
Soit chaque noyau a environ 1 chance sur 10 000 de se désintégrer au cours d'une année.

B) Évolution du nombre de noyaux au cours du temps

Maintenant on n'étudie plus la probabilité de désintégrations d'un seul noyau, mais d'une <u>population</u> de noyaux.

On considère une population de noyaux radioactifs d'effectif initial N0 et de constante radioactive λ.

- **N0** est le nombre initial de noyaux
- **N(t)** l'effectif de la population de noyaux à un instant t

Entre les instants t et $t + dt$ (=intervalle de temps de notre observation), la population **diminue** de dN nucléides (nombre de noyaux qui disparaissent par désintégration radioactive) :

$$\boxed{dN = -N(t) \cdot P(dt) \longrightarrow dN = -N(t) \cdot \lambda \cdot dt}$$

Car P(dt)= λ.dt

Cette équation différentielle peut s'intégrer et donne : $\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}}$

Le nombre de noyaux radioactifs de notre population décroit par désintégration donc de manière exponentielle (suivant cette formule).

<u>ILLUSTRATION</u> : On prend l'exemple d'un pommier avec ses pommes mûres prêtes à tomber. Chaque pomme a une probabilité P de tomber à chaque instant t. P est toujours la même, indépendante du temps t ainsi que du nombre de pommes restantes.

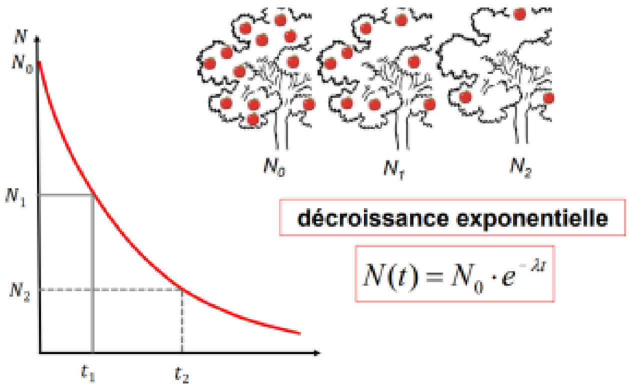
À l'instant t=0 on a N0 pommes

À t=1 on a N1 pommes avec une diminution assez rapide au départ du nombre de pommes

À t=2 on a N2 pommes.

On a donc une décroissance exponentielle du nombre de pommes : rapide au départ qui va ensuite se tasser dans le temps.

L'exemple du pommier peut se transposer au nombre de noyaux d'une population d'atomes radioactifs :



II. Période physique

A) Définition

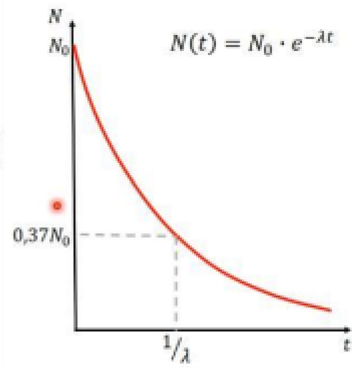
Pour caractériser la décroissance on va utiliser la notion de **période radioactive** :

- On a **λ** : la constante radioactive qui est exprimée comme l'inverse d'un temps
- On peut également utiliser une constante de temps = **1/λ** (l'inverse de la constante radioactive) exprimée en unité de temps (secondes, années…)

(L'unité de λ étant l'inverse d'un temps, 1/ λ est donc un temps exprimé en secondes)

On calcule le nombre de noyaux N restant au temps t=1/λ donc après un intervalle dt=1/ λ

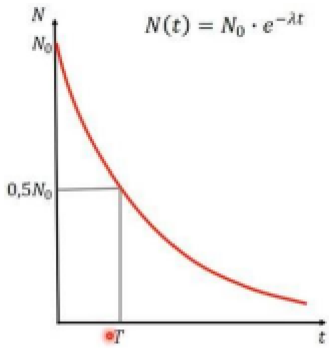
$$N\left(\frac{1}{\lambda}\right) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} \rightarrow N\left(\frac{1}{\lambda}\right) = N_0 \cdot e^{-1} \rightarrow N\left(\frac{1}{\lambda}\right) = N_0 \times 0{,}37$$



Sur le graphique : Le temps est sur l'axe des abscisses, la décroissance du nombre de noyaux en fonction du temps est exponentielle

À t=1/λ il reste **37%** de l'effectif initial des noyaux (donc 63% ont disparu).

En théorie : la constante radioactive (λ) ou la constante de temps (1/λ) suffisent pour caractériser la décroissance de la population des noyaux instables.



En réalité : on préfère utiliser la **période radioactive T** :

- Elle s'exprime en unité de temps (secondes, jours, années…)
- Et définit le temps au bout duquel il ne reste plus que **50% de l'effectif initial** soit un effectif réduit de moitié.

$$\boxed{N(T) = N_0 /2}$$

On peut lier les formules entre elles, on obtient alors :

$$N(T) = \frac{N_0}{2}$$

et $N(T) = N_0 \cdot e^{-\lambda T}$

donc $N_0 \cdot e^{-\lambda T} = \frac{N_0}{2}$

$$\rightarrow e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} \quad \rightarrow \lambda \cdot T = \ln 2$$

$$\boxed{\rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}}$$

L'équation relie les formules de : la **constante radioactive et la période radioactive** en passant par ln(2) qu'on simplifie comme égal à 0,693 (0,7).

→ important pour les calculs

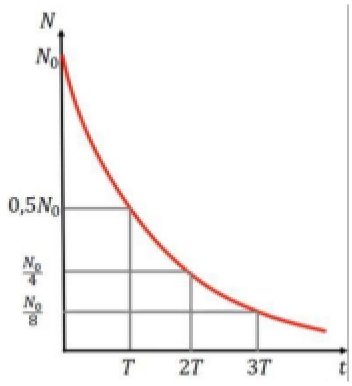
On cherche maintenant à écrire **N(t)= N0.e$^{-\lambda t}$** en remplaçant λ par **ln2/T** *(cf formule juste avant)*

$$\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}} = N_0 \cdot (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T}} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}}$$ donc $$\boxed{\frac{N(t)}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}}}$$

N(t)/N0 correspond au pourcentage de noyaux restants après l'intervalle de temps t

En utilisant la formule on a :

t	T	$2T$	$3T$	$10T$	nT
$N(t)/N_0$	½	2^{-2}	2^{-3}	2^{-10}	2^{-n}
%	50	25	12,5	0,1	...



Après 1 période radioactive, il reste **50%** des noyaux.

Après 2T il reste **25%** des noyaux.

Après 10 périodes radioactives il reste **0,1%** de noyaux soit un millième de l'effectif initial N0 (à chaque fois la population est divisée par 2n).

On considère qu'au bout de **10T le radionucléide a quasiment disparu**.

B) Exemples de calculs

On demande de calculer T du sodium-24, du technétium-99m et de l'iode-13.

$^{24}_{11}Na$
- $\lambda = 4{,}62.10^{-2}\ h^{-1}$
- $T = \frac{Ln2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$
- $T = \frac{0{,}693}{4{,}62.10^{-2}} = 15h$

$^{99m}_{43}Tc$
- $\lambda = 3{,}2.10^{-5}s^{-1}$
  $= 3{,}2.10^{-5} \times 3600 = 0{,}1152\ h^{-1}$
- $T = \frac{0{,}693}{0{,}1152} = 6\ h$

$^{131}_{53}I$
- $\lambda = 1{,}0.10^{-6}s^{-1} = 8{,}64.10^{-2}j^{-1}$
- $T = \frac{0{,}693}{8{,}64.10^{-2}} = 8\ j$

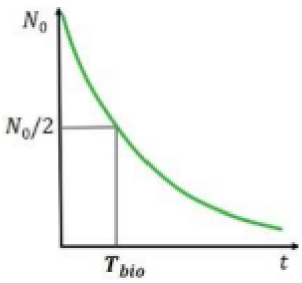
Pour le Na, λ est en heure donc on donne T en heure.

Pour le Tc on convertit d'abord pour donner T en heure.

*Pour I on demande T en jour donc on convertit les secondes en jours, **faites attention aux unités**.*

C) Période effective en physiologie

L'élimination d'une population d'atomes radioactifs va pouvoir être :



- **Élimination physique par désintégration radioactive** : suit une loi exponentielle et est caractérisée par la période radioactive Tradioactive = Tphysique
- **Élimination biologique** : le radionucléide quitte l'organe (éliminé par les urines ou les selles), suit également une loi exponentielle et est caractérisée par la période biologique **Tbio** = temps au bout duquel la moitié des noyaux initiaux ont été éliminés biologiquement.

L'élimination réelle des radionucléides tient compte de ces deux phénomènes :

physique ET biologique.

Un élément qui se désintègre selon une période radioactive T est également métabolisé avec une période biologique Tbio. Il sera finalement éliminé selon la période effective **Teff** avec :

$$\boxed{\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{physiq.}} + \frac{1}{T_{bio}}}$$

III. Radioactivité d'un élément

A) Définition

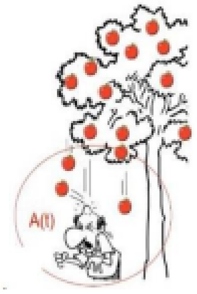
L'activité est :

- Le **nombre moyen de désintégrations radioactives par unité de temps.**
- **Proportionnelle** au nombre de radionucléides restants (pas encore désintégrés) à chaque instant t

$$\boxed{A(t) = \lambda \cdot N(t)}$$

A(t) : l'activité au temps t
N(t) le nombre de nucléides au temps t
λ :La constante radioactive

- Le **nombre de photons ou de particules émises par unité de temps** (puisque lors d'une désintégration il y a libération de photon ou de particule détectable).
- **Proportionnelle** à ce que l'on détecte.
- C'est une **grandeur** utile pour exprimer une quantité de radionucléides.
  Le taux de désintégration des particules radioactives est un élément **plus important** que leurs nombres N ou leurs masses m (ce qui compte c'est la radioactivité émise/exprimée par l'activité).



L'exemple du pommier (*encore*) : N, le nombre de pommes sur l'arbre soit le nombre d'atomes radioactifs.

On change le référentiel et on se met à la place du monsieur sous le pommier.

Pour lui ce qui est important c'est le nombre de pommes qu'il se prend sur la tête (et non le nombre de pommes dans le pommier).

On va donc regarder le nombre de pommes émises à chaque instant t par le pommier A(t).

➔ **C'est l'activité**

On ne regarde pas le nombre d'éléments présents, mais le nombre de particules émises à chaque instant.

Soit pour le Technétium-99m et le carbone 14 :

Exemple ^{99m}Tc:

$N(t) = nbre\ de\ noyaux\ ^{99m}Tc;$

$A(t) = nbre\ de\ gamma\ émis.$

Exemple ^{14}C:

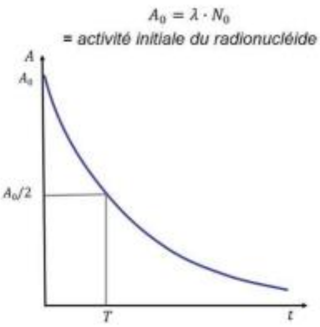
$N(t) = nbre\ de\ noyaux\ ^{14}C;$

$A(t) = nbre\ de\ \beta^-\ émis.$

B) Unité d'activité

- L'unité du SI de l'activité est le **Becquerel** (Bq) : 1Bq= 1 désintégration par seconde
- Lorsqu'on a une population d'atomes radioactifs on a généralement plusieurs milliers voire millions de désintégrations toutes les secondes
  → Le Bq est donc une unité très petite et on utilise souvent le MBq (1 million de Bq) voir le GBq (1 milliard)
- L'ancienne unité, l'unité historique est le **Curie** (Ci) : 1 Ci = 3,7.1010Bq = 37 GBq
- Le Curie est une unité très grande, les sources en médecine sont moins radioactives, donc on utilise des sous multiples du Ci le mCi (un millième 10^{-3}) avec 1mCi = 37 MBq, ou le µCi (un millionième, 10^{-6}).

C) Évolution dans le temps



$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

or $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

et $A_0 = \lambda \cdot N_0$

Donc:

$$\boxed{A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}}$$

Ou encore:

$$\boxed{A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}}}$$

On remarque qu'on retrouve les mêmes formules que pour le nombre de noyaux, c'est normal, car l'activité est proportionnelle au nombre de noyaux.

L'activité décroit exponentiellement également.

D) Mesure de l'activité

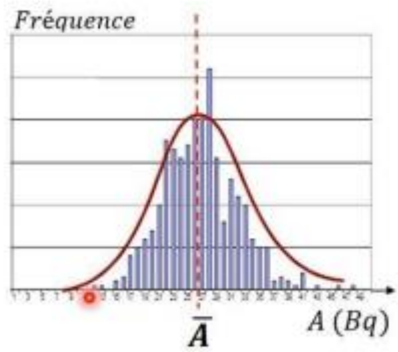
Les détecteurs de radioactivité : mesurent l'émission de particules ou de rayonnements électromagnétiques = les **activimètres**.

Cependant l'activité mesurée n'est pas fixe dans le temps (la radioactivité est un phénomène probabiliste aléatoire).

Le nombre de désintégrations qui se produit pendant un temps t n'est pas prévisible, on a seulement une probabilité. Les mesures reflètent cette incertitude.

La source radioactive a une activité précise à un temps donné, mais pour une même source, en répétant les mesures, l'activimètre nous donne une variabilité de valeurs d'activité.

On observe une répartition spécifique des fréquences d'activité :



Les valeurs suivent la Loi de poisson (courbe **Gaussienne**). Il y a une fréquence maximale Ā qui correspond à l'activité moyenne de notre source.

E) Calcul de la masse de radioéléments à partir de son activité

- Il est possible de calculer la **masse** d'un radioélément à partir de l'activité qu'on a mesuré
- Pour calculer la masse d'un atome unique, on passe par la **masse molaire** M de l'élément

RAPPEL masse d'une mole : mole = quantité de matière contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes de carbone 12 dans 12g de carbone 12 = environ 6.1023 atomes, ce dernier étant le nombre d'Avogadro.

- Masse d'un atome (en g) = $\frac{M}{N_A}$

M : masse molaire ($g.mol^{-1}$) **Proche du nb de masse A**

N_A : Nb d'Avogadro ($6{,}022.10^{23}$ mol^{-1})

- Masse responsable d'une activité A au temps t:

$$m(t) = N(t) \times \frac{M}{N_A}$$

$$m(t) = \frac{A(t)}{\lambda} \times \frac{M}{N_A} = \frac{A(t) \times T}{\ln 2} \times \frac{M}{N_A}$$

(g) (Bq) (s^{-1}) ($g.mol^{-1}$) (mol^{-1}) (s)

IV. Cinétiques des filiations radioactives

Maintenant on étudie l'évolution de l'activité d'un nucléide fils par rapport à l'activité du noyau radioactif père dont il est issu :

Un noyau radioactif **père** qui se désintègre et va donner un noyau **fils** :

- Soit stable
- Soit **radioactif**, il se désintégrera alors rapidement en un autre élément.

C'est important, car en médecine nucléaire (où on utilise des sources radioactives en imagerie ou pour les traitements) on a souvent recours à un radioélément à décroissance rapide, lui-même fils d'un radioélément à demi-vie plus longue.

<u>Exemple</u> : technétium-99m : utilisé pour des images scintigraphiques, impliqué dans toute une cascade détransformations :

Père molybdène-99 ½vie = 66h désintégration β- donne plusieurs éléments fils dont :

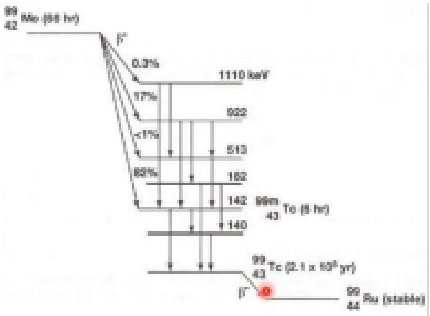


Schéma de désintégration du Molybdène 99

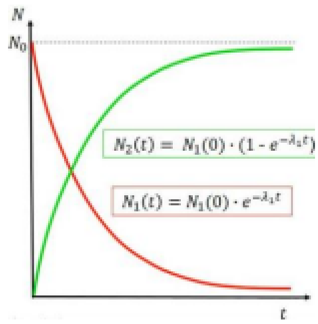
- Tc-99m : instable ½ vie=6h transformation isomérique
- Tc-99 désintégration β–
- Ru-99 stable

A) Formation d'un nucléide stable

- Situation la plus simple : $\overset{*}{X}_1 \rightarrow X_2$ (Père radioactif → Fils stable)

- On sait que : $N_1(t) = N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$ (N1 nombre de noyaux pères et λ1 constante radioactive du père)

- Quand t=0, N2(0)=0 le nombre de noyaux pères est à son maximum et il n'y a pas encore de noyaux fils



- À chaque instant, un atome père donne un fils, donc le **nombre de pères + de fils correspond au nombre de pères initialement présents** (constante N1(0))

A tout instant $N_1(t) + N_2(t) = N_1(0)$

Donc: $N_2(t) = N_1(0) - N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$

$$N_2(t) = N_1(0) \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t})$$

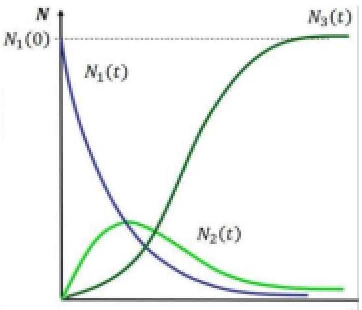
- On voit que la croissance du nombre d'atomes fils en fonction du temps est la <u>symétrique</u> de la décroissance du nombre d'atomes pères (on le rappel toutes deux exponentielles)

- On regarde maintenant les activités :

➔ Celle du **père** s'obtient avec la formule : $A_1(t) = \lambda N_1(t) = A_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$
➔ Celle du **fils** : est **nulle**, le fils est stable donc il n'a <u>pas de radioactivité.</u>

B) Formation d'un nucléide instable : cas général

- Un peu plus complexe : $\underset{\text{RA}}{{}^{*}X_1} \rightarrow \underset{\text{RA}}{{}^{*}X_2} \rightarrow \underset{\text{Stable}}{X_3}$
  Le père et le fils sont **instables et radioactifs** (X2 va aussi se désintégrer en X3 stable)



<u>Évolution du nombre de noyaux</u> :

-Noyaux **pères**, <u>décroissance exponentielle</u> à partir de N1(0)
-Cinétique d'évolution du nombre de noyaux fils X2 en fonction du temps dépend d'un équilibre entre :
➔ La formation des atomes de X2 qui proviennent directement de la transformation radioactive de X1, (un père se désintègre et forme un fils)
➔ La disparition des X2 radioactifs qui se désintègrent en X3

Courbe : à t=0 pas de noyaux fils, puis augmentation du nombre de noyaux fils N2(t) dû à la désintégration rapide des pères, puis un seuil maximal (équilibre formation disparition) et enfin décroissance lente du fait de la transformation du X2 en X3

<u>Équation qui calcule N2 à chaque instant t</u> :

La différence entre <u>la formation et la désintégration</u> du nombre de noyaux N2 pendant un intervalle de temps **dt = nb d'atomes pères** qui se désintègrent pendant dt moins le nb d'atomes fils qui se désintègrent pendant dt.

$$dN_2 = \lambda_1 N_1\, dt - \lambda_2 N_2\, dt$$

$$N_1(t) = N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

Equation différentielle qui conduit à l'expression:

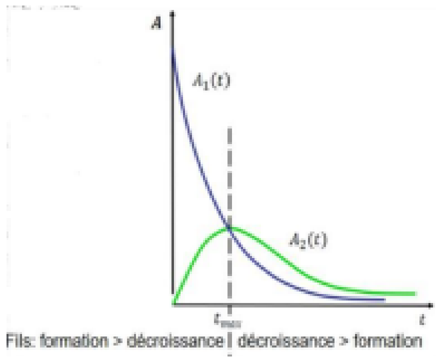
$$N_2(t) = N_1(0) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

Évolution du nombre de noyaux petit-fils X3 stables : ne fait qu'augmenter, à la fin N3 sera égal à N1(0).

<u>Évolution des activités</u> :

On vient de voir que l'activité est directement **proportionnelle** aux nombres de nucléides présents à un instant t les équations du calcul d'activité seront donc similaires :

- Activité du **père** : $A_1(t) = A_1(0)e^{-\lambda_1 t}$
- Activité du **fils** : $A_2(t) = A_1(0)\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$



On retrouve les mêmes courbes, ainsi le **père** a une activité **exponentielle décroissante** alors que l'activité du **fils** **croît rapidement, atteint un maximum puis décroit**.

Particularités :

- On a un temps tmax = temps auquel l'activité du fils X2 va être maximale
- Ce tmax correspond au moment où l'activité de X2= l'activité des noyaux père X1 (croisement des 2 courbes d'activité, père et fils)

$$\boxed{t_{max} = \frac{Ln\lambda_2 - Ln\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}}$$

La courbe d'activité du fils instable X2 a :

- Une phase de **croissance avant tmax** : formation du fils X2 > désintégration en X3 ;
- Un **maximum en tmax** ;
- Une phase de **décroissance après tmax** : noyaux qui se désintègrent en X3 > noyaux X2 qui proviennent de X1 (il n'y a plus beaucoup de noyaux pères).

C) Formation d'un nucléide instable cas particulier de régime : λ1<λ2 (T1>T2)

$^{*}X_1 \rightarrow {}^{*}X_2 \rightarrow X_3$
RA RA Stable

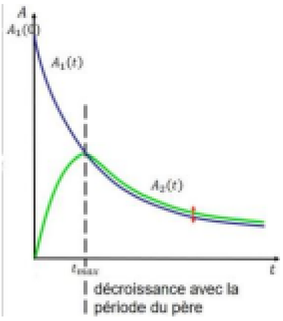
Le noyau père **radioactif** se désintègre en noyau fils, lui-même **radioactif** qui donne X3 MAIS avec le cas particulier de l'équilibre de régime (ou équilibre séculaire).

On a un **équilibre de régime** lorsque le père se désintègre **moins vite** que le fils. (Les deux relations reviennent au même, car la période radioactive T est l'inverse de la constante radioactive λ).

λ	$\lambda_1 < \lambda_2$
T	$T_1 > T_2$

<u>En termes d'activité</u> : on a la formule de l'activité du fils à un instant t :

$$A_2(t) = A_1(0)\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$



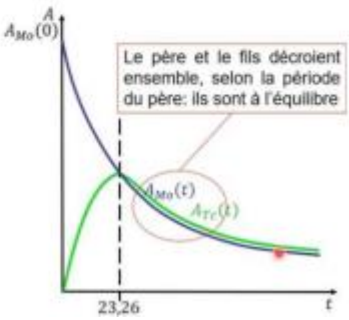
Pour tout temps t > tmax *(pas le scooter hein)* on montre que : l'activité du **fils égale l'activité du père** au même instant multiplié par un <u>coefficient de proportionnalité</u> :

$$A_2(t) \cong A_1(t) \times \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Coef de proportionalité

Donc après **tmax** (après son palier maximum) ET toujours sous la condition que **T1>T2** :

- La décroissance du fils X2 sera **proportionnelle** à celle du père X1, elle suit la décroissance du père avec la même période radioactive que celle du père
- Il y a une légère différence (A du fils > A du père) qui correspond au coefficient de proportionnalité qui nous donne la vraie activité du fils
- Ceci n'est vrai que quand les noyaux pères et fils sont **ensemble**, dans le même compartiment si on les sépare <u>on perd cet équilibre de régime.</u>



$$ {}^{99}_{42}Mo \rightarrow {}^{99m}_{43}Tc \rightarrow {}^{99}_{43}Tc $$

λ	$10^{-2}h^{-1}$	$11{,}5.10^{-2}h^{-1}$
T	$67\ h$	$6\ h$

$$t_{max} = \frac{Ln\lambda_2 - Ln\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 23{,}26\text{h}$$

Pour $t > t_{max}$

$$A_2(t) \cong A_1(t) \times \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = 1{,}09$$

$$\mathbf{A_{Tc}(t) = 1{,}09 \times A_{Mo}(t)}$$

<u>Exemple</u> : Le Tc-99m est utilisé en médecine pour les <u>scintigraphies</u>.

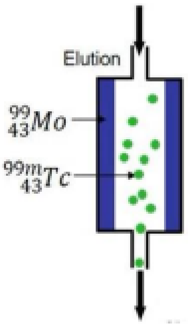
On a des générateurs avec du Mo-99 pour obtenir du Tc-99m (puis du Tc-99).

On peut calculer le tmax = 23,26h, au-delà duquel l'activité du Tc-99m sera égale à l'activité du Mo-99 multipliée parle facteur de proportionnalité (on le calcule =1,09).

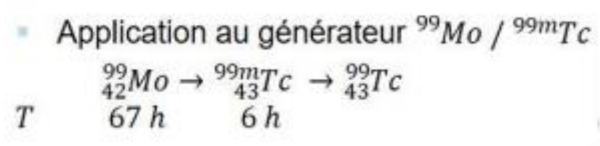
ATc99m = 1,09 x AMo

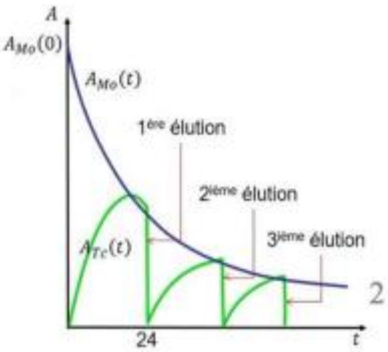
La courbe de décroissance de l'activité du Tc subit celle du Mo en étant légèrement supérieure (avec un facteur 1,09).

<u>Attention</u> : On dit que l'activité du Tc décroit avec l'activité du Mo, dans ce cas on considère l'activité globale du Tc dans le générateur. Si on regardait individuellement ce qu'il se passe pour chaque noyau de Tc-99m, chacun diminuerait avec sa période propre (de 6h), mais globalement quand Mo et Tc sont ensemble dans le générateur, ils diminuent avec la même période.



<u>Schéma</u> : On a ici un schéma du générateur de Tc-99m présent dans les services de médecine nucléaire. Il est fait d'une résine échangeuse d'ions dans laquelle est incorporé le Mo-99. Quand il se désintègre en Tc-99m, ce dernier est libéré de la résine et se retrouve dans la cavité centrale du générateur ; il faudra soit faire des élutions soit faire passer un liquide (ex : eau) dans le générateur pour récupérer les noyaux de Tc-99m de la cavité centrale (le Mo reste dans la résine on récupère seulement le Tc pour l'imagerie).





<u>Activité du Mo</u> : il reste inclus dans la résine donc son activité décroit exponentiellement avec le temps selon sa période de 67h ;

<u>Activité du Tc</u> : à t=0 il n'y a pas de Tc.

Puis il y a formation de Tc, activité qui augmente jusqu'à arriver à tmax (environ 23h)

Au-delà il commence à décroitre avec le Mo c'est donc le moment idéal pour faire l'élution (on a un max de Tc dans la cavité)

On récupère le Tc donc son activité dans le générateur retombe à 0

On répète le processus… on va souvent jusqu'à 3 élutions (il y a de moins en moins de Tc, car de moins en moins de Mo)

- Grâce à cet équilibre de régime, les physiciens peuvent prévoir quelle quantité de Tc-99m on récupérera à chaque élution.
- La durée de vie du générateur de médecine nucléaire est d'environ 3j, on le change 2 fois par semaine.

Tableau récap des formules importantes
(présent dans la ronéo de l'année dernière)

$\boxed{P(dt) = \lambda \cdot dt}$	$\boxed{A(t) = \lambda \cdot N(t)}$
$\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}}$	$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$
$N\left(\frac{1}{\lambda}\right) = N_0 \times 0{,}37$	$m(t) = N(t) \times \frac{M}{N_A} = \frac{A(t)}{\lambda} \times \frac{M}{N_A} = \frac{M}{N_A} \times \frac{A(t) \times T}{\ln 2}$
$N(T) = \frac{N_0}{2}$	$t_{max} = \frac{Ln\lambda_2 - Ln\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$
$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$	1 Ci = $3{,}7.10^{10}$ Bq = 37GBq
$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{physiq.}} + \frac{1}{T_{bio}}$	$N_2(t) = N_1(0) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$ $A_2(t) = A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$

Voilàààà c'est la fin de cette fiche, elle est compliquée à comprendre c'est vrai, donc si au final ça ne rentre vraiment pas apprenez simplement, même si la compréhension aide toujours l'apprentissage évidemment.