

SOLUTIONS

des 78 exercices de l'ouvrage



Ce document présente les solutions aux exercices des pages 511-552 de l'ouvrage « Sûreté-Criticité – Des phénomènes physiques à l'analyse de sûreté nucléaire », ISBN : 978-2-7598-3695-6, EDP Sciences, 2025.

La dernière version de ce document est disponible sur le site :
<https://laboutique.edpsciences.fr/produit/1496/9782759836963/suretecriticite>.

Exercice 1 : terme « criticité ».

1. voir l'index page 606 pour les différents termes et leur signification.
2. en informatique : détermination et hiérarchisation du degré d'importance et de la disponibilité d'un système d'information.
- en économie : mesure du niveau de dépendance à l'égard de ressources considérées comme « critiques » en raison notamment de leur rareté ou l'incertitude quant à leur disponibilité.

Exercice 2 : maîtrise du risque de criticité.

1. dû aux conséquences et aux caractéristiques des accidents de criticité : brusques sans signe précurseur, potentiellement létales rapidement, grande variabilité (lieu, matière, durée, énergie).
 2. effet local, peut être lié au temps de l'accident, donc l'éloignement peut jouer un grand rôle dans la limitation des doses collectives.
 3. criticité : conséquence très certainement létale immédiatement pour les personnes proches.
- incendie et rupture du circuit primaire d'un REP : les premiers instants ne sont pas encore irréversibles vis-à-vis des conséquences pour les personnes proches. Des actions peuvent être réalisées pour éviter d'atteindre des conséquences importantes : pour l'incendie, extinction automatique ou intervention des pompiers pour éteindre l'incendie avant détérioration des structures et/ou relâchement de produits dangereux ; pour la rupture du circuit primaire d'un REP, conduite accidentelle des opérateurs pour mettre le réacteur en état de repli avant fusion du cœur).

Exercice 3 : dégradation du plutonium.

Le ^{241}Pu , fissile, disparaît et crée de l' ^{241}Am , capturant (tableau 23.1 et figure 3.4). À l'échelle humaine, les autres isotopes du plutonium retenus en criticité varient peu. Cela se traduit par une dégradation des qualités neutroniques du plutonium pour un recyclage dans des réacteurs à neutrons thermiques. Pour des considérations liées au stockage profond, l' ^{241}Am , et son effet capturant, finit aussi par disparaître (figure 3.4). Cette disparition doit alors être prise en compte.

À noter que les variations du vecteur isotopique du plutonium ont également un impact sur les propriétés thermiques et la radioprotection de ces matières.

Exercice 4 : rapport de modération maximal de l' UF_6 .

$$\frac{m_{\text{UF}_6}}{m_{\text{UF}_6} + m_{\text{HF}}} = 0,995$$

$$m_i = n_i \times M_i$$

$$\frac{H}{U} = \frac{n_H}{n_U} = \frac{n_{HF}}{n_{UF_6}}$$

A.N. :

$$\frac{H}{U} \approx 0,0885$$

Exercice 5 : enrichissement des « réacteurs » d'Oklo.

$$1. \text{ teneur}_{235U}(t) = \frac{N_{235U}(t)}{N_{235U}(t) + N_{238U}(t)}$$

$$N_i(t) = N_i(0) \exp(-\lambda_i t) = N_i(0) \exp\left(-\frac{\ln(2)t}{t_{1/2_i}}\right)$$

Raisonnez en considérant 100 noyaux à l'instant actuel ($N_{235U}(0) = 0,72$ et $N_{238U}(0) = 99,28$).

A.N. :

$$\text{teneur}_{235U}(-2E9) \approx 3,672 \%$$

2. À sec, la criticité est impossible (cf. page 258). Il fallait donc un modérateur, de l'eau en particulier. L'ordre de grandeur de la masse minimale critique d'uranium (cf. tableau 20.5) est d'environ 100 kg pour un milieu homogène réfléchi et modéré par de l'eau (et environ 60 kg d'uranium dans le cas hétérogène).

Exercice 6 : enrichissement massique et atomique.

1.

$$n = \frac{m}{M}$$

$$\text{teneur}_{\text{massique}} = \frac{m_5}{m_5 + m_8}$$

$$\text{teneur}_{\text{atomique}} = \frac{n_5}{n_5 + n_8}$$

$$\text{teneur}_{\text{massique}} = \frac{1}{1 + \frac{M_8}{M_5} \frac{(1 - \text{teneur}_{\text{atomique}})}{(\text{teneur}_{\text{atomique}})}}$$

$$\text{teneur}_{\text{atomique}} = \frac{1}{1 + \frac{M_5}{M_8} \frac{(1 - \text{teneur}_{\text{massique}})}{(\text{teneur}_{\text{massique}})}}$$

2. pour l'uranium, en masse.

3. pour le plutonium, en isotope.

Exercice 7 : enrichissement de l'uranium.

Conservation de la masse d'uranium total et de celle d' ^{235}U entre l'alimentation (F) et la sortie enrichie (P) et faiblement enrichie (T).

$$F = P + T$$

$$F \times x_F = P \times x_P + T \times x_T$$

Pour $P = 1$ kg

$$F = \frac{x_P - x_T}{x_F - x_T}$$

Pour un enrichissement massique de sortie (x_T) de 0,2 %, il faut environ 9,23 kg d'uranium naturel pour produire 1 kg d'uranium enrichi à 5 % en masse en ^{235}U .

Exercice 8 : vitesse et énergie.

$$E_c = \frac{1}{2} m_n v^2$$

$m_n = 1,0086649 \text{ uma} = 1,0086649 \times 931,494 \text{ MeV}/c^2$
pour une énergie E_c exprimée en MeV :

$$v = c \sqrt{\frac{2 \times E_c}{1,0086649 \times 931,494}}$$

A.N. :

pour un neutron thermique : $v = 2187 \text{ m.s}^{-1}$

pour un neutron de 2 MeV : $v = 19\,561 \text{ km.s}^{-1}$

Exercice 9 : taille d'un noyau, masse volumique et terrain de football.

1.

$$\text{section} = \pi r^2 = \pi \frac{D^2}{4}$$

A.N. :

pour l'hydrogène : $4,52.10^{-26} \text{ cm}^2$

pour l'uranium 238 : $1,74.10^{-24} \text{ cm}^2$

2. pour les gros noyaux, du même ordre de grandeur que le barn (10^{-24} cm^2)

3. masse de l'hydrogène (1 proton) = $1,66054.10^{-24} \text{ g} \times 1,0072765 = 1,6726.10^{-24} \text{ g}$

volume du noyau de l'hydrogène = $\frac{4\pi}{3}(D_n)^3 = 7,238.10^{-39} \text{ cm}^3$

masse volumique de l'hydrogène = $2,3108.10^{14} \text{ g.cm}^{-3}$

masse volumique de l' ^{238}U = $2,3128.10^{14} \text{ g.cm}^{-3}$

Ces valeurs sont à comparer à environ 20 g.cm^{-3} , soit un facteur 10^{13} .

4. diamètre dans lequel gravite l'électron : $40\,000 \times 1,5 \text{ cm} = 600 \text{ m}$ de diamètre, soit 300 m de rayon, c'est-à-dire bien derrière les buts !

5. la matière est constituée de beaucoup de vide.

Exercice 10 : fission de l' ^{235}U et de l' ^{238}U .

Cf. section 4.1.2 page 47.

Exercice 11 : masse d'un atome et modèle de la goutte liquide.

$$\text{masse } {}^1_8\text{O} = 8m_p + 8m_n - W/c^2 + 16m_e$$

En utilisant les valeurs de la page 47, avec $A = 16$ et $Z = 8$:

$$W/c^2 = (16a_v - a_s 16^{2/3} - a_c \frac{8^2}{16^{1/3}} - a_a \frac{(16-2 \times 8)}{16}) + a_p (16)^{-0,5}) / 931,494 \text{ MeV/uma} = 0,1328122 \text{ uma}$$

A.N. :

$$\text{masse } {}^1_8\text{O} = 16,0034963 \text{ uma, soit une erreur relative de } 0,05 \text{ \%}.$$

Exercice 12 : énergie de la fission et de la fusion.

$$1. 1 \text{ g d' } {}^{235}\text{U} \text{ contient } \frac{N_A}{M_{235\text{U}}} \text{ noyaux d' } {}^{235}\text{U}.$$

$$1 \text{ J} \approx 3,3 \cdot 10^{10} \text{ fissions}$$

$$\text{Ces noyaux génèrent } \frac{N_A}{M_{235\text{U}} \times 3,3 \cdot 10^{10}} \text{ J}$$

A.N. :

$$7,7654 \cdot 10^{10} \text{ J pour la fission d'1 g d' } {}^{235}\text{U}$$

$$2. 0,54 \text{ g d' } {}^{235}\text{U} \text{ produit autant que 1 tep.}$$

3. la combustion est liée aux atomes et aux cortèges électroniques. La fission est liée au noyau.

$$4. 1 \text{ MWj} = 10^6 \text{ J.s}^{-1} \times 86\,400 \text{ s} = 8,64 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

$$1 \text{ g d' } {}^{235}\text{U} \text{ fissionné produit } 0,9 \text{ MWj}$$

un assemblage contient environ 0,5 tonne de ML (tableau 25.1). Donc un assemblage a produit 20 000 MWj, soit $20\,000 \times 8,64 \cdot 10^{10} \text{ J} = 1,728 \cdot 10^{15} \text{ J}$, soit 22,25 kg d' ^{235}U fissionné.

En réalité, cette perte d' ^{235}U est un ordre de grandeur car l' ^{235}U peut subir des captures radiatives et le plutonium produit en cours d'irradiation contribue également à la libération d'énergie par fission d'un assemblage.

$$5. \text{ Figure 4.2 page 46 : énergie libérée } \approx 4 \times 7 - 3 \times 2,8 - 2 \times 1 = 17,6 \text{ MeV, soit } 17,6 \cdot 10^6 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \approx 2,82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$6. \text{ masse des réactifs : } 5 \text{ uma} \approx 8,3 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$$\text{Pour 1 gramme d'un mélange : } \frac{2,82 \cdot 10^{-12}}{8,3 \cdot 10^{-24}} = 3,40 \cdot 10^{11} \text{ J, soit } 340 \text{ GJ.}$$

À masse égale, 4,4 fois l'énergie libérée par la fission de l' ^{235}U .

Exercice 13 : neutrons émis par fissions spontanées du ^{252}Cf .

nombre de désintégration par seconde :

$$A = \lambda N = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \frac{m \times N_A}{M}$$

A.N. :

$$A = 2.10^{10} \text{ s}^{-1}.$$

Nombre de neutrons émis par seconde et par mg : $2,32.10^9$.

Exercice 14 : concept de dose.

1. Pu métal très dense. Les rayonnements gamma sont principalement auto-absorbés dans la matière.

2. Dose en Gray = $21/10 = 2,1$ Gy

Énergie absorbée par l'opérateur : $70 \times 2,1 = 147$ J

Très faible énergie : une LED de 10 W pendant 15 s.

3.

$$\Phi = \frac{\text{Dose}}{C} = \frac{21 \text{ Sv}}{300.10^{-12} \text{ Sv.cm}^2.\text{neutron}^{-1}} = 7.10^{10} \text{ neutrons.cm}^{-2}$$

4.

$$\phi = \frac{\Phi}{\Delta t} = 1,4.10^{11} \text{ neutrons.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

5. Il s'agit en réalité d'une évaluation simplifiée. Les neutrons traversant le corps humain (composé principalement d'eau), le flux va s'atténuer et l'énergie des neutrons va diminuer. Ainsi, avec ces deux composantes, la dose neutron à travers le corps humain baisse à mesure que les neutrons le traversent.

Exercice 15 : fluence du réacteur Caliban.

$$k_{\infty} = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} P_{NF} = k_{\infty} (1 - P_F) \approx 1 \text{ pendant toute l'expérience}$$

La probabilité de fuite des neutrons $P_F = (k_{\infty} - 1)/k_{\infty}$

nombre de neutrons fuyant le réacteur par fission : $\nu \times P_F$

$$\text{fluence} = \frac{S}{4\pi d^2}$$

A.N. :

neutrons ayant fuit le réacteur pendant l'expérience : $6,072.10^{16}$

fluence = $4.832.10^{11}$ neutrons par cm^2

Exercice 16 : probabilité de ralentissement.

1. Il est possible d'approximer cette probabilité en considérant qu'à chaque choc, il y a une probabilité $1 - p_a$ d'être absorbé, avec $p_a = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_a + \Sigma_s}$ et de faire intervenir le nombre moyen de chocs entre les deux énergies n . La probabilité est ainsi la suivante :

$$(1 - p_a)^n$$

$$n = \frac{\ln(E/E_{th})}{\xi}$$

Pour l'eau, l'oxygène sera négligé.

Le ξ d'un mélange est la moyenne pondérée par la section efficace macroscopique de diffusion.

$$\xi_{\text{mélange}} = \frac{\xi_H \Sigma_{sH} + \xi_U \Sigma_{sU}}{\Sigma_{sH} + \Sigma_{sU}}$$

A.N. :

La probabilité est de 8,0549 % pour le mélange U-H₂O.

2. La probabilité est de 0 % pour le mélange U-C.

Exercice 17 : perte d'efficacité du bore.

1. Il faut calculer le volume de la chemise, puis la masse de bore 10, ce qui permet d'obtenir le nombre d'atomes de bore 10 qui doit disparaître. En connaissant le nombre de neutrons produits par seconde, le temps nécessaire pour faire disparaître ce nombre d'atomes peut être évalué.

A.N. :

7,27398.10⁻⁴ g de bore 10, soit 4,37478.10¹⁹ atomes de bore 10.

neutrons produits par seconde : 10¹¹ n.s⁻¹.

temps pour faire disparaître cette masse de bore 10 = 4,37478.10⁸ s, soit environ 14 ans.

2. Ce phénomène n'est pas un problème en criticité.

3. Il faut calculer la concentration atomique en bore 10, puis le nombre de captures par seconde par cm³ dans le réacteur. En utilisant le volume de la chemise, il est possible d'obtenir le nombre de captures par seconde, puis de déterminer le temps nécessaire pour faire disparaître la quantité de bore 10.

A.N. :

concentration atomique de bore 10 : 1,245.10²¹ cm⁻³

dans le réacteur, nombre de captures par seconde par cm³ : 1,434.10¹⁴

temps pour faire disparaître la quantité de bore : 86,8 s

Ce phénomène est à regarder pour des réacteurs ayant des flux importants.

Exercice 18 : durée de ralentissement d'un neutron dans l'eau.

$$1. C_{H_2O} = C_O = \frac{C_H}{2} = \frac{\rho_{H_2O} N_A}{M_{H_2O}}$$

$$\lambda_s = \frac{1}{C_O \sigma_s^{16O} + C_H \sigma_s^{1H}}$$

A.N. :

$$C_{H_2O} = 3,3456.10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$\lambda_s = 0,6642 \text{ cm}$$

2. Formule de la page 89 :

$$n = \frac{\ln(E_0/E_n)}{\xi}$$

Soit :

$$E_n = E_0 \exp(-n\xi)$$

La vitesse au parcours 0 est $E_0 = \frac{1}{2}m_n v_0^2$, soit :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m_n}}$$

La vitesse au parcours 1 est : $E_1 = E_0 \exp(-1 \times \xi)$

Soit :

$$\frac{1}{2}m_n v_1^2 = \frac{1}{2}m_n v_0^2 \exp(-1 \times \xi)$$

$$v_1 = v_0 (\exp(-1 \times \xi))^{1/2} = v_0 \exp\left(\frac{-1 \times \xi}{2}\right)$$

$$v_2 = v_1 \exp\left(\frac{-1 \times \xi}{2}\right) = v_0 \exp\left(\frac{-2 \times \xi}{2}\right)$$

Soit :

$$v_n = v_0 \exp\left(\frac{-n \times \xi}{2}\right)$$

La durée du parcours élémentaire est : $t_n = \lambda / v_n = \frac{\lambda}{v_0} \exp\left(\frac{n \times \xi}{2}\right)$

La durée totale est la somme des durées de chaque parcours :

$$T = \sum_0^{N-1} t_n = \frac{\lambda}{v_0} \frac{1 - \exp\left(\frac{N \times \xi}{2}\right)}{1 - \exp\left(\frac{\xi}{2}\right)}$$

A.N. :

$$N = 14,5$$

$$T = 0,74 \text{ } \mu\text{s}$$

3. Les hypothèses retenues conduisent à considérer que les premières étapes du ralentissement ont une durée négligeable devant les dernières. Mais il est fait l'approximation que λ est supposé constant sur le domaine d'énergie, ce qui n'est pas le cas en pratique.

Exercice 19 : section efficace et libre parcours moyen.

$$1. N = \frac{\rho N_A}{M}$$

A.N. :

$$N = 4,84331 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$2. \Sigma_a = N \sigma_a = \frac{1}{\lambda_a}$$

A.N. :

$$\Sigma_a = 33,419 \text{ cm}^{-1}, \text{ soit } \lambda_a = 0,03 \text{ cm}$$

$$3. \Sigma_a(\text{H}_2\text{O}) = \Sigma_a(\text{H}) + \Sigma_a(\text{O}) = \sigma_a(\text{H}) \times N_{\text{H}} + \sigma_a(\text{O}) \times N_{\text{O}}$$

$$N_{\text{H}} = 2 \times N_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \times N_{\text{O}}$$

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda_a} + \frac{1}{\lambda_s}$$

A.N. :

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = 3,34561 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Sigma_a(\text{H}_2\text{O}) = 2,209 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}, \text{ soit } \lambda_a(\text{H}_2\text{O}) = 45,27 \text{ cm}$$

$$\Sigma_s(\text{H}_2\text{O}) = 1,499 \text{ cm}^{-1}, \text{ soit } \lambda_s(\text{H}_2\text{O}) = 0,667 \text{ cm}$$

$$\lambda_t(\text{H}_2\text{O}) = 0,6575 \text{ cm}$$

$$4. N_{235\text{U}} = \frac{C(^{235}\text{U}) \times N_A}{M_{235\text{U}}}$$

$$\frac{H}{235\text{U}} = \left(\frac{\rho_{235\text{U}}}{C(^{235}\text{U})} - 1 \right) \times \frac{2\rho_{\text{H}_2\text{O}} M_{235\text{U}}}{\rho_{235\text{U}} M_{\text{H}_2\text{O}}} \text{ (cf. page 277)}$$

$$N_H = \frac{H}{235\text{U}} \times N_{235\text{U}}$$

$$N_O = \frac{N_H}{2}$$

A.N. :

$$H/U = 520,840682$$

$$N_H = 6,67352 \cdot 10^{22}$$

$$\Sigma_t = 1,607 \text{ cm}^{-1}, \text{ soit } \lambda_t = 0,6222 \text{ cm}$$

Exercice 20 : sections efficaces et criticité.

1. Cf. page 63 pour la vraie figure.

2. La section efficace dans le domaine rapide est plus faible que dans le domaine thermique avec des résonances non résolues. Le domaine intermédiaire présente de fortes résonances. Dans la région thermique, la section efficace évolue relativement lentement et augmente avec la diminution de l'énergie du neutron.

Pour avoir une vision complète, il faut aussi comparer les sections efficaces de capture et le nombre de neutrons émis par fission (cf. pages 384 et 385). Il est possible de retenir que la masse critique à sec est plus importante que le milieu modéré (spectre énergétique des neutrons thermiques). Il y a un comportement particulier au niveau des résonances : l'uranium peut être plus pénalisant que le plutonium dans cette zone d'énergie.

La grande résonance du plutonium dans le domaine thermique participe à l'explication d'un coefficient de température positif pour les solutions de plutonium faiblement concentrées.

Exercice 21 : k_∞ et enrichissement en isotope ^{235}U .

1.

$$k_\infty = \frac{\nu_{235\text{U}} \sigma_f^{235\text{U}}}{\sigma_a^{235\text{U}} + \sigma_a^{238\text{U}} \frac{(1-x)}{x}}$$

A.N. :

$$x = 6,65 \%$$

2.

$$k_\infty = \frac{\nu_{235\text{U}} \sigma_f^{235\text{U}}}{\sigma_a^{235\text{U}} + 2\sigma_a^{16\text{O}} + (\sigma_a^{238\text{U}} + 2\sigma_a^{16\text{O}}) \frac{(1-x)}{x}}$$

A.N. :

$$x = 6,65 \%$$

3. dans ces calculs, l'impact de l'oxygène n'est pas observé.

4. L'exercice est une vision simplifiée de la réalité. L' ^{238}U peut fissionner à haute énergie avec un seuil aux alentours du MeV (cf. page 383). La valeur moyenne de 0,8 MeV est discutable pour les données nucléaires. Les diffusions déplacent le spectre énergétique des neutrons. L'oxygène participe à cette diffusion, ce qui fait évoluer l'enrichissement limite pour atteindre un k_∞ de 1 à sec, malgré sa faible absorption.

Exercice 22 : comparaison de deux k_{eff} .

1.

$$k_{\text{eff}1} = \frac{k_{\infty 1}}{1 + M_1^2 B_g^2} = k_{\text{eff}2} = \frac{k_{\infty 2}}{1 + M_2^2 B_g^2}$$

pour un milieu infini placé dans l'air, cela peut être équivalent à B_g^2 nul (pas de fuite). Ils auront le même k_{eff} s'ils ont le même k_∞ . Mais pour qu'ils aient le même k_{eff} en isolé, il faut qu'ils aient un même M^2 : cela paraît très improbable. Donc ils n'auront pas le même k_{eff} pour un réseau infini.

2. la réponse va dépendre de la taille du réseau, des k_∞ et des aires de migration. Il n'y a pas de cas général. Dans l'air (c'est-à-dire sans absorption ni modification du spectre neutronique), plus le réseau fini sera grand et plus celui-ci tendra vers le réseau infini.

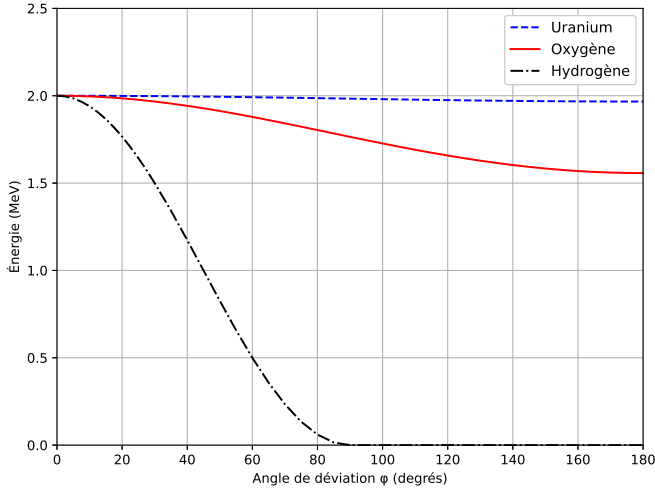
3. le milieu le plus pénalisant ne va pas être le même si la taille de la géométrie est augmentée ou diminuée. Pour une diminution, le milieu avec le plus faible k_∞ sera le plus pénalisant.

Exercice 23 : perte d'énergie par choc élastique.

1. En utilisant la formule donnant $\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$ (page 86) et celle exprimant $\cos \varphi$ (page 87), on retrouve bien la formule proposée. En particulier, il faut retrouver que $\left[\sqrt{A^2 - 1 + \cos^2 \varphi} + \cos \varphi \right]^2 = 1 + A^2 + 2A \cos \theta$.

Cela passe par trouver que :

$$\sqrt{\cos^2 \varphi + A^2 - 1} = \frac{A(A + \cos \theta)}{\sqrt{1 + A^2 + 2A \cos \theta}}$$



Exercice 24 : section efficace thermique moyenne.

1. Cette vitesse correspond à celle des neutrons thermiques à une température de 20 °C ($kT = 0,025$ eV). À cette température, les neutrons sont en équilibre thermique avec leur environnement (cf. page 97).
2. Le modèle maxwellien est de la forme générale (page 52) :

$$\chi(E, T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}(kT)^3} \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

Le flux prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Phi(E, T) &= nv(E)\chi(E, T) = \frac{2n}{\sqrt{\pi}(kT)^3} \sqrt{\frac{2}{m}} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \\ &= C(T) \frac{E}{kT} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \end{aligned}$$

avec $C(T)$ une constante ne dépendant que de T .

La section efficace microscopique d'absorption moyenne ($\bar{\sigma}$) a pour expression :

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(E)\Phi(E, T)dE}{\int \Phi(E, T)dE}$$

Par ailleurs, $\sigma(E) = \frac{\sigma_R \sqrt{E_R}}{\sqrt{E}}$
avec R l'indice de référence.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_R \sqrt{E_R} \int \frac{1}{\sqrt{kT}} \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{kT}} \exp(-\frac{E}{kT}) dE}{\int \frac{E}{kT} \exp(-\frac{E}{kT}) dE}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_R \sqrt{E_R} \frac{1}{\sqrt{kT}} \frac{\Gamma(3/2)}{\Gamma(2)} = \sigma_R \sqrt{\frac{E_R}{kT}} \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

avec la fonction $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt$

Pour $E_R = kT$, $\sigma_R = \sigma_{2200}$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_{2200} \approx 0,886 \sigma_{2200}$$

Exercice 25 : courant, flux et épaisseur saturante.

1.

$$J^+(0) = s$$

$$\phi(a) = 0$$

$$D\Delta\phi - \Sigma_a\phi = 0$$

$$\Delta\phi - \frac{1}{M^2}\phi = 0$$

2. Le flux est de la forme :

$$\phi(x) = A \exp(\frac{x}{M}) + B \exp(-\frac{x}{M})$$

En utilisant la condition aux limites en a :

$$\phi(a) = A \exp(\frac{a}{M}) + B \exp(-\frac{a}{M}) = 0$$

$$\phi(x) = 2B \frac{1}{\exp(\frac{a}{M})} \left[\frac{\exp(\frac{a-x}{M}) - \exp(-\frac{a-x}{M})}{2} \right]$$

$$\phi(x) = C \sinh(\frac{a-x}{M})$$

En utilisant la condition aux limites en 0 :

$$J^+(0) = s = \frac{\phi(0)}{4} - \frac{D}{2} \frac{d\phi(0)}{dx}$$

$$\phi(0) = C \sinh(\frac{a}{M})$$

$$\begin{aligned}\frac{d\phi(0)}{dx} &= -\frac{C}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) \\ \frac{C \sinh(\frac{a}{M})}{4} + \frac{D}{2} \frac{C}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) &= s \\ C &= \frac{4s}{\sinh(\frac{a}{M}) + \frac{2D}{M} \cosh(\frac{a}{M})}\end{aligned}$$

3. Comme il n'y a pas de neutrons qui viennent de la droite :

$$\begin{aligned}\frac{J(a)}{s} &= -\frac{D}{s} \frac{d\phi(a)}{dx} \\ \frac{J(a)}{s} &= \frac{D}{s} \frac{C}{M} \cosh(0) \\ \frac{J(a)}{s} &= \frac{D}{sM} \frac{4s}{\sinh(\frac{a}{M}) + \frac{2D}{M} \cosh(\frac{a}{M})} \cosh(0) \\ \frac{J(a)}{s} &= \frac{4D}{M} \frac{1}{\sinh(\frac{a}{M}) + \frac{2D}{M} \cosh(\frac{a}{M})}\end{aligned}$$

4.

$$\begin{aligned}\frac{J^-(0)}{J^+(0)} &= \beta = \frac{J^-(0)}{s} \\ \frac{J^-(0)}{s} &= \frac{\phi(0)}{4s} + \frac{D}{2s} \frac{d\phi(0)}{dx} \\ \frac{J^-(0)}{s} &= \frac{C \sinh(\frac{a}{M})}{4s} - \frac{D}{2s} \frac{C}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) \\ \frac{J^-(0)}{s} &= C \left[\frac{\sinh(\frac{a}{M})}{4s} - \frac{D}{2sM} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) \right] \\ \frac{J^-(0)}{s} &= \frac{4s}{\sinh(\frac{a}{M}) + \frac{2D}{M} \cosh(\frac{a}{M})} \left[\frac{\sinh(\frac{a}{M})}{4s} - \frac{D}{2sM} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) \right] \\ \frac{J^-(0)}{s} &= \frac{1}{\sinh(\frac{a}{M}) + \frac{2D}{M} \cosh(\frac{a}{M})} \left[\sinh\left(\frac{a}{M}\right) - \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) \right]\end{aligned}$$

en introduisant $\gamma = \frac{2D}{M} \coth\left(\frac{a}{M}\right)$

$$\frac{J^-(0)}{s} = \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma}$$

5. Il est possible de trouver la solution par deux approches. En premier lieu, une approche complémentaire :

$$\begin{aligned}\frac{\text{Absorption}}{s} &= 1 - \frac{J^-(0)}{s} - \frac{J(a)}{s} \\ \frac{\text{Absorption}}{s} &= 1 - \frac{\left[\sinh\left(\frac{a}{M}\right) - \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)\right]}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} - \frac{4D}{M} \frac{1}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} \\ &= \frac{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} - \frac{\left[\sinh\left(\frac{a}{M}\right) - \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)\right]}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} \\ &\quad - \frac{4D}{M} \frac{1}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} \\ &= \frac{1}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} \left(\frac{4D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right) - \frac{4D}{M} \right)\end{aligned}$$

ou bien en considérant la relation suivante :

$$\begin{aligned}\frac{1}{s} \int_0^a \Sigma_a \phi(x) dx &= \frac{D}{sM^2} \int_0^a \phi(x) dx = \frac{DC}{sM^2} \int_0^a \sinh\left(\frac{a-x}{M}\right) dx \\ \frac{1}{s} \int_0^a \Sigma_a \phi(x) dx &= \frac{DC}{sM^2} M (\cosh\left(\frac{a}{M}\right) - 1) \\ \frac{1}{s} \int_0^a \Sigma_a \phi(x) dx &= \frac{4s}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} \frac{D}{sM} (\cosh\left(\frac{a}{M}\right) - 1) \\ \frac{1}{s} \int_0^a \Sigma_a \phi(x) dx &= \frac{4D}{M} \frac{1}{\sinh\left(\frac{a}{M}\right) + \frac{2D}{M} \cosh\left(\frac{a}{M}\right)} (\cosh\left(\frac{a}{M}\right) - 1)\end{aligned}$$

6. l'épaisseur saturante correspond à une épaisseur avec une faible valeur de 3. et une asymptote de 4.

Une épaisseur d'environ 20 cm correspond à ces deux critères (pour des neutrons thermiques).

Exercice 26 : formule de densité.

1. En utilisant la formule de la page 113 :

$$M_{c_i} \times d_i^2 = M_{c_f} \times d_f^2$$

A.N. :

$$M_{cf} = 8,2645 \text{ kg ou } 12,346 \text{ kg}$$

2.

$$V_{c_i} \times d_i^3 = V_{c_f} \times d_f^3$$

A.N. :

$$V_{c_f} = 375,66 \text{ cm}^3 \text{ ou } 685,87 \text{ cm}^3$$

Exercice 27 : condition pour que la masse critique à sec soit plus pénalisante que la masse faiblement modérée.

1.

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{R^2} \rightarrow B_g = \frac{\pi}{R} = B_m$$

$$M_c = C(X)V_c = C(X)\frac{4\pi}{3}R^3 = \frac{4\pi^4}{3}\frac{C(X)}{B_m^3}$$

$$\frac{dM_c}{dC(X)} = \frac{4\pi^4}{3} \left[\frac{1}{B_m(C(X))^3} - 3\frac{C(X)}{B_m(C(X))^4} \frac{dB_m(C(X))}{dC(X)} \right]$$

Pour que la masse à sec soit plus faible que la masse faiblement modérée, il faut que $\frac{dM_c}{dC(X)} < 0$. La condition est la suivante :

$$\frac{B_m(C(X))}{C(X)} < 3 \frac{dB_m(C(X))}{dC(X)}$$

2. c'est bien vérifié (approximez la dérivée à la tangente à l'origine).

Exercice 28 : laplacien et volume minimal critique.

1. Cf. tableau 7.1 page 106.

pour la sphère :

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{R^2}$$

pour la cylindre :

$$B_g^2 = \frac{j_0^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{H^2} = \frac{j_0^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{(2\alpha)^2 R^2} = \frac{1}{(2\alpha)^2 R^2} ((2\alpha)^2 j_0^2 + \pi^2)$$

pour la parallélépipède :

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{a^2} + \frac{\pi^2}{b^2} + \frac{\pi^2}{c^2}$$

2.

$$V_s = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$V_c = \pi R^2 H = 2\alpha\pi R^3$$

$$V_p = abc$$

pour la sphère :

$$V_s = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \frac{\pi^3}{B^3} \approx \frac{130}{B^3}$$

pour le cylindre :

$$V_c = 2\alpha\pi R^3 = 2\alpha\pi \frac{((2\alpha)^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}}{(2\alpha)^3 B^3}$$

$$V_c = \frac{1}{B^3} \frac{\pi}{(2\alpha)^2} ((2\alpha)^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}$$

Il faut minimiser la fonction $h(\alpha)$:

$$h(\alpha) = \frac{\pi}{(2\alpha)^2} ((2\alpha)^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}$$

Il faut trouver la dérivée nulle de la fonction $h = uv$ avec :

$$u = \frac{\pi}{(2x)^2}$$

$$u' = -\frac{\pi}{2x^3}$$

$$v = ((2x)^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}$$

v est une fonction composée $f \circ g$ avec $f = X^{3/2}$ et $g = ((2x)^2 j_0^2 + \pi^2)$

$$f' = \frac{3}{2} X^{1/2}$$

$$v' = (f' \circ g) \times g'$$

$$v' = \frac{3}{2} ((2x)^2 j_0^2 + \pi^2)^{1/2} 8x j_0^2$$

Ainsi :

$$h' = \frac{\pi}{(2x)^2} \frac{3}{2} ((2x)^2 j_0^2 + \pi^2)^{1/2} 8x j_0^2 - \frac{\pi}{2x^3} ((2x)^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}$$

$$x = \frac{\pi}{j_0 \sqrt{2}} \approx 0,9237454$$

Le volume minimal n'est pas pour un orthocylindre (i.e. $\alpha = 1$).

$$h_{\min} = \frac{\pi}{(2 \frac{\pi}{j_0 \sqrt{2}})^2} ((2 \frac{\pi}{j_0 \sqrt{2}})^2 j_0^2 + \pi^2)^{3/2}$$

$$h_{\min} = \frac{j_0^2}{2} (3)^{3/2} \pi^2 \approx 148,3$$

$$V_c \approx \frac{148,3}{B^3}$$

pour le parallélépipède :

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{a^2} + \frac{\pi^2}{b^2} + \frac{\pi^2}{c^2}$$

$$B_g^2 = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right)$$

$$V_p = abc$$

volume minimal pour un cube $a = b = c$

$$B_g^2 = \pi^2 \left(\frac{3}{a^2} \right) = \frac{3\pi^2}{a^2}$$

$$B = \frac{\sqrt{3}\pi}{a}$$

$$V_p = a^3$$

$$V_p = \frac{3^{3/2} \pi^3}{B^3} \approx \frac{161}{B^3}$$

4. pour la sphère :

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{(R + d_{ext})^2} = \frac{\pi^2}{(R + \mu R)^2} = \frac{\pi^2}{(1 + \mu)^2 R^2}$$

$$V_s = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi \frac{\pi^3}{(1 + \mu)^3 B^3} = \frac{4}{3} \frac{\pi^4}{(1 + \mu)^3 B^3}$$

Pour les faibles valeurs de μ :

$$V_s \approx \frac{4}{3} \frac{\pi^4 (1 - 3\mu)}{B^3} = V_s(\text{sans } d_{ext}) - \frac{4\mu\pi^4}{B^3}$$

Pour le parallélépipède :

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{(a + 2d_{ext})^2} + \frac{\pi^2}{(b + 2d_{ext})^2} + \frac{\pi^2}{(c + 2d_{ext})^2}$$

$$V_p = abc$$

$$B_g^2 = \frac{3\pi^2}{(1+2\mu)^2 a^2}$$

$$V_p = a^3 = \frac{3^{3/2}\pi^3}{(1+2\mu)^3 B^3}$$

Pour les faibles valeurs de μ :

$$V_p \approx \frac{3^{3/2}\pi^3(1-6\mu)}{B^3} = V_p(\text{sans } d_{\text{ext}}) - \frac{18\sqrt{3}\mu\pi^3}{B^3}$$

À continuer pour le cylindre !

Exercice 29 : équation de la diffusion pour un réacteur cylindrique.

1. Le B^2 de cette équation peut être interprété comme le laplacien matière de formule $B_m^2 = \frac{k_\infty - 1}{M^2}$.

Pour être critique dans un milieu fini, il faut a minima que le $k_\infty > 1$, c'est-à-dire que $B_m^2 > 0$ car l'aire de migration M^2 est toujours > 0 .

2.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)\theta(z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi(r)\theta(z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi(r)\theta(z)}{\partial z^2} + B^2 \psi(r)\theta(z) = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)\theta(z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \psi(r)\theta(z)}{\partial z^2} + B^2 (\psi(r)\theta(z)) = 0$$

$$\frac{\theta(z)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \psi(r) \frac{\partial^2 \theta(z)}{\partial z^2} + B^2 (\psi(r)\theta(z)) = 0$$

$$\frac{\theta(z)}{r\psi(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta(z)}{\partial z^2} + B^2 \theta(z) = 0$$

$$\frac{1}{r\psi(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{\theta(z)} \frac{\partial^2 \theta(z)}{\partial z^2} + (\alpha^2 + \beta^2) = 0$$

En séparant les variables, les deux équations suivantes sont obtenues :

$$\frac{1}{r\psi(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \alpha^2 = 0$$

$$\frac{1}{\theta(z)} \frac{\partial^2 \theta(z)}{\partial z^2} + \beta^2 = 0$$

3. Dépendance en z :

$$\frac{\partial^2 \theta(z)}{\partial z^2} + \theta(z)\beta^2 = 0$$

$$\theta(z) = A \cos(\beta z) + B \sin(\beta z)$$

Le flux est symétrique et positif, donc $B = 0$.

Pour la condition aux limites :

$$\Phi(r, \frac{H}{2} + d_{\text{ext}}) = \psi(r)\theta(\frac{H}{2} + d_{\text{ext}}) = 0$$

$$\theta(\frac{H}{2} + d_{\text{ext}}) = 0$$

$\beta(\frac{H}{2} + d_{\text{ext}}) = \frac{\pi}{2}$ pour le mode fondamental

Soit :

$$\beta^2 = \frac{\pi^2}{(H + 2d_{\text{ext}})^2}$$

4. Dépendance en r :

$$\frac{1}{r\psi(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \alpha^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + r\psi(r)\alpha^2 = 0$$

$$r \frac{\partial^2 \psi(r)}{\partial r^2} + \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} + r\psi(r)\alpha^2 = 0$$

Soit $\psi(r) = g(u)$ avec $u = \alpha r$

$$\frac{d\psi(r)}{dr} = \frac{dg(u)}{du} \frac{du}{dr} = \alpha \frac{dg(u)}{du}$$

$$\frac{d^2 \psi(r)}{dr^2} = \frac{d}{dr} \left(\alpha \frac{dg(u)}{du} \right) = \alpha \frac{d}{du} \left(\frac{dg}{du} \right) \frac{du}{dr} = \alpha^2 \frac{d^2 g(u)}{du^2}$$

Ainsi, il vient :

$$r\alpha^2 \frac{d^2 g(u)}{du^2} + \alpha \frac{dg(u)}{du} + r\alpha^2 g(u) = 0$$

$$r^2 \alpha^2 \frac{d^2 g(u)}{du^2} + r\alpha \frac{dg(u)}{du} + r^2 \alpha^2 g(u) = 0$$

$$u^2 \frac{d^2 g(u)}{du^2} + u \frac{dg(u)}{du} + u^2 g(u) = 0$$

Le flux est symétrique et positif, donc les $D_m = 0$.

$$J_0(u) = 0$$

La première racine de la fonction $J_0(x) = 0$ est définie par j_0 .

$$\alpha(R + d_{\text{ext}}) = j_0$$

Soit :

$$\alpha^2 = \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}$$

5. Au final :

$$\Phi(r, z) = J_0(\alpha r) \cos(\beta z)$$

et

$$B^2 = \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2} + \frac{\pi^2}{(H + 2d_{\text{ext}})^2}$$

Exercice 30 : flux et équation de la diffusion.

1. L'équation de la diffusion est de la forme :

$$D\Delta\phi + N - \Sigma_a\phi = 0$$

Le milieu infini se caractérise par l'absence de fuite ($\Delta\phi = 0$).

$$\phi = \frac{N}{\Sigma_a}$$

2. Comme le milieu est stationnaire, $k_\infty = 1$.

3. L'équation de la diffusion est de la forme, en coordonnées cartésiennes selon x :

$$D \frac{d^2\phi}{dx^2} + N - \Sigma_a\phi = 0$$

$$-D \frac{d^2\phi}{dx^2} + \Sigma_a\phi = N$$

La solution générale de cette équation est la somme de deux composantes (sans second membre et avec second membre). On pose $M^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$

$$\phi(x) = A \exp -\frac{x}{M} + B \exp \frac{x}{M} + \frac{N}{\Sigma_a}$$

pour obtenir A et B, il faut utiliser les conditions aux limites.

$$\phi(a) = 0$$

$$\phi(-a) = 0$$

A et B solution d'un système de deux équations à deux inconnus.

$$\phi(x) = \frac{N}{\Sigma_a} \left(1 - \frac{\exp(-x/M) + \exp(x/M)}{\exp(-a/M) + \exp(a/M)} \right)$$

Nota : il est également possible d'utiliser les cosinus hyperboliques ou des sinus hyperboliques pour représenter les résultats.

4.

$$J = -D \frac{d\phi}{dx} = S/2$$

$$\frac{d\phi(0)}{dx} = -\frac{S}{2D}$$

$$D \frac{d^2\phi}{dx^2} - \Sigma_a \phi = 0$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\Sigma_a}{D} \phi$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{1}{M^2} \phi$$

$$\phi(x) = A \exp\left(\frac{x}{M}\right) + B \exp\left(-\frac{x}{M}\right)$$

$$\frac{d\phi(0)}{dx} = \frac{A}{M} - \frac{B}{M} = -\frac{S}{2D}$$

$$A = 0 \text{ et } B = \frac{SM}{2D}$$

Ainsi :

$$\phi(x) = \frac{SM}{2D} \exp\left(-\frac{x}{M}\right)$$

5. Il s'agit de la somme du flux de la question 1 et celui de la question 4.

$$\phi(x) = \frac{N}{\Sigma_a} + \frac{SM}{2D} \exp\left(-\frac{x}{M}\right)$$

Exercice 31 : masse minimale critique d'un milieu homogène thermique.

1.

$$B_m^2 = \frac{k_\infty - 1}{M^2}$$

2.

$$B_g^2 = \frac{\pi^2}{R^2} = B_m^2$$

$$B_m = \frac{\pi}{R}$$

$$V_s = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4\pi^4}{3} \frac{1}{B_m^3}$$

3.

$$k_\infty = \epsilon p f \eta \approx f \eta$$

$$\eta = \frac{\nu \sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}}}$$

$$f = \frac{\sigma_a^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}} + \sigma_a^{\text{H}} \left(\frac{N^{\text{H}}}{N^{\text{Pu}}} \right)} = \frac{\sigma_a^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}} + \sigma_a^{\text{H}} \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

$$k_\infty = \frac{\nu \sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}}} \frac{\sigma_a^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}} + \sigma_a^{\text{H}} \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

$$k_\infty = \frac{\nu \sigma_f^{\text{Pu}}}{\sigma_a^{\text{Pu}} + \sigma_a^{\text{H}} \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

La forme suivante sera gardée :

$$k_\infty = \frac{\eta}{1 + K \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

avec $K = \frac{\sigma_a^{\text{H}}}{\sigma_a^{\text{Pu}}}$

4.

$$\text{Masse} = C(\text{Pu}) \times V$$

$$C(\text{Pu}) = 1 / \left(a + b \frac{\text{H}}{\text{Pu}} \right)$$

$$\frac{\text{H}}{\text{Pu}} = \frac{1 - a \times C(\text{Pu})}{b \times C(\text{Pu})}$$

$$k_{\infty} = \frac{\eta}{1 + K \frac{1-a \times C(\text{Pu})}{b \times C(\text{Pu})}} = \frac{\eta b \times C(\text{Pu})}{b \times C(\text{Pu}) + K(1 - a \times C(\text{Pu}))}$$

$$k_{\infty} - 1 = \frac{\eta b \times C(\text{Pu})}{b \times C(\text{Pu}) + K(1 - a \times C(\text{Pu}))} - 1$$

$$k_{\infty} - 1 = \frac{\eta b \times C(\text{Pu}) - [b \times C(\text{Pu}) + K(1 - a \times C(\text{Pu}))]}{b \times C(\text{Pu}) + K(1 - a \times C(\text{Pu}))}$$

$$k_{\infty} - 1 = \frac{C(\text{Pu}) \times (\eta b - (b - Ka)) - K}{C(\text{Pu}) \times (b - Ka) + K}$$

$$B_{\text{m}}^3 = \frac{(k_{\infty} - 1)^{3/2}}{M^3}$$

$$\frac{1}{B_{\text{m}}^3} = \frac{M^3}{(k_{\infty} - 1)^{3/2}} = \frac{M^3 \times (C(\text{Pu}) \times (b - Ka) + K)^{3/2}}{(C(\text{Pu}) \times (\eta b - (b - Ka)) - K)^{3/2}}$$

$$\text{Masse} = C(\text{Pu}) \times \frac{4\pi^4}{3} \frac{1}{B_{\text{m}}^3}$$

$$\text{Masse} = C(\text{Pu}) \times \frac{4\pi^4}{3} \frac{M^3 \times (C(\text{Pu}) \times (b - Ka) + K)^{3/2}}{(C(\text{Pu}) \times (\eta b - (b - Ka)) - K)^{3/2}}$$

$$\text{Masse} = \frac{4\pi^4 M^3}{3} \frac{[C(\text{Pu})^{5/3} \times (b - Ka) + K \times C(\text{Pu})^{2/3}]^{3/2}}{[C(\text{Pu}) \times (\eta b - (b - Ka)) - K]^{3/2}}$$

La fonction est de la forme :

$$y = \gamma \frac{[\mu x^{5/3} + Kx^{2/3}]^{3/2}}{[x(\eta b - \mu) - K]^{3/2}}$$

avec $\gamma = \frac{4\pi^4 M^3}{3}$, $\mu = b - aK$

Déterminons la ou les racines de la dérivée de cette fonction.

$$y(x) = \gamma u(x)^{3/2}$$

avec

$$u(x) = \frac{\mu x^{5/3} + Kx^{2/3}}{x(\eta b - \mu) - K}$$

$$\frac{dy}{dx} = \gamma \frac{3}{2} u(x)^{1/2} \frac{du}{dx}$$

$$u(x) = \frac{N(x)}{D(x)}$$

avec

$$N(x) = \mu x^{5/3} + K x^{2/3}$$

$$D(x) = x(\eta b - \mu) - K$$

$$N'(x) = \mu \frac{5}{3} x^{2/3} + K \frac{2}{3} x^{-1/3}$$

$$D'(x) = \eta b - \mu$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{N'(x)D(x) - N(x)D'(x)}{D(x)^2}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{(\mu \frac{5}{3} x^{2/3} + K \frac{2}{3} x^{-1/3})(x(\eta b - \mu) - K) - (\mu x^{5/3} + K x^{2/3})(\eta b - \mu)}{(x(\eta b - \mu) - K)^2}$$

$$\frac{dy}{dx} = \gamma \frac{3}{2} \left[\frac{\mu x^{5/3} + K x^{2/3}}{x(\eta b - \mu) - K} \right]^{1/2} \frac{du}{dx}$$

On cherche $\frac{dy}{dx} = 0$ pour des valeurs positives de x .

K et μ étant positifs, il faut chercher $\frac{du}{dx} = 0$, soit $N'(x)D(x) = N(x)D'(x)$

$$(\mu \frac{5}{3} x^{2/3} + K \frac{2}{3} x^{-1/3})(x(\eta b - \mu) - K) = (\mu x^{5/3} + K x^{2/3})(\eta b - \mu)$$

En développant et en regroupant les termes, il vient :

$$x^{5/3} \left[\frac{2}{3} \mu \eta b - \frac{2}{3} \mu^2 \right] + x^{2/3} \left[-\frac{7}{3} K \mu - \frac{1}{3} K \eta b + \mu K \right] + x^{-1/3} \left[-K^2 \frac{2}{3} \right] = 0$$

on pose $T = x^{1/3}$

$$aT^5 + bT^2 + cT^{-1} = 0$$

En multipliant par T (avec T différent de 0), l'équation devient :

$$aT^6 + bT^3 + c = 0$$

on pose $z = T^3$, l'équation devient :

$$az^2 + bz + c = 0$$

La solution est de la forme :

$$z = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$z = T^3 = (x^{1/3})^3 = x$$

Avec les valeurs fournies, on trouve un optimum de masse pour 29,07 gPu.l⁻¹, soit un H/Pu d'environ 1025.

La masse minimale critique obtenue est d'environ 1017 g de Pu.

Valeur critique sans réflecteur, cohérente avec les valeurs de la littérature. Une hypothèse importante a été de considérer les données nucléaires (aire de migration, section efficace) constantes, ce qui présupposait d'obtenir l'optimum dans une zone d'énergie thermique. Par ailleurs, la longueur d'extrapolation n'a pas été prise en compte.

Exercice 32 : manipulation des formules simples.

1.

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{1 + (k_{\infty} - 1) \frac{B_g^2}{B_m^2}}$$

$$B_g^2 = \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}$$

À la criticité : $B_m^2 = B_g^2$ pour un diamètre de 33,11 cm, la valeur du B_m^2 correspondant permet d'estimer d_{ext} :

$$d_{\text{ext}} = \frac{j_0}{\sqrt{B_m^2}} - R_c$$

avec $j_0 = 2,40483$

A.N. :

$d_{\text{ext}} = 6,81$ cm, à comparer à la valeur de 6,5 cm du tableau 7.3 de la page 111.

pour un diamètre de 28,14 ($= 33,11 \times 0,85$), $B_g^2 = 0,013265$ cm⁻²

$k_{\text{eff}} = 0,947$ (via un code de calcul, la valeur obtenue est 0,942).

2.

$$B_g^2 = \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2} + \frac{\pi^2}{(H + 2d_{\text{ext}})^2}$$

$$H = \frac{\pi}{\sqrt{B_g^2 - \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}}} - 2d_{\text{ext}}$$

$$B_g^2 = B_m^2 \frac{k_{\infty} - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}(k_{\infty} - 1)}$$

A.N. :

pour un k_{eff} de 0,97, $H = 68$ cm (via un code de calcul, la valeur obtenue est 0,967)

Exercice 33 : signification du laplacien géométrique.

1. cf. page 104

2.

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B_g^2} = k_{\infty} P_{\text{NF}}$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production}}{\text{Absorption} + \text{Fuite}}$$

$$k_{\infty} = \frac{\text{Production}}{\text{Absorption}}$$

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} \frac{1}{1 + \frac{\text{Fuite}}{\text{Absorption}}}$$

C'est le rapport des fuites sur les absorptions du système isolé.

Exercice 34 : production de produits de fission.

Tout est rapporté à une tonne d'uranium.

1 000 g de PF = 1 000 g d' ^{235}U fissionné = $\frac{1000 N_A}{235}$ noyaux d' ^{235}U fissionné

1 fission libère environ 200 MeV et 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J

1 000 g d' ^{235}U fissionné produisent $8,21 \cdot 10^{13}$ J.

1 GWj = $10^9 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \times 86\,400 \text{ s} = 8,64 \cdot 10^{13} \text{ J}$

1 GWj/ t_U correspond à 1,052 kg/ t_U de PF formé

Exercice 35 : risque de criticité en présence d'uranium naturel.

1. La mise en barreau permet d'augmenter la probabilité d'échapper aux captures des résonances de l' ^{238}U pendant le ralentissement des neutrons (augmentation du facteur antitrappe par rapport à un milieu homogène). Il s'agit de l'effet d'hétérogénéité présenté dans la section 11.2 (page 153).

2. UNGG, CANDU, Zoé, etc.

Exercice 36 : interprétation de résultats de calcul.

1. Matière fissile sèche + interposition d'un modérateur (CH_2) conduisent à l'augmentation de la modulation des neutrons passant d'un équipement à l'autre (si les équipements sont initialement fortement couplés) ; cet effet l'emportant sur la perte de neutrons due à la traversée de cet écran. Autre explication recevable : effet réflecteur de l'écran de découplage > perte d'interaction qu'il induit (car équipements initialement peu couplés)

2. Matériau de découplage contenant un neutrophage (en plus du thermalisant)

Exercice 37 : paramètres affectant la réactivité.

Masse de matière fissile : $\nearrow$ — Production

Épaisseur de plomb : $\searrow$ — Fuite

Eau : $\searrow$ — Absorption

Porogène : $\nearrow$ — Production

Épaisseur d'un mur : $\searrow$ ou $\nearrow$ — Production, absorption ou fuite. Cela va dépendre du type de matière et du couplage neutronique entre les deux cellules.

Ratio : $\searrow$ — Fuite

Épaisseur d'une plaque : $\searrow$ (ou $\nearrow$) — Production, absorption. L'épaisseur de la plaque va aussi avoir un impact sur la modération entre les deux assemblages, qui aura un impact sur l'efficacité de la plaque.

Concentration en gadolinium : $\searrow$ — Absorption

Distance : $\searrow$ pour une configuration finie — Fuite

Enrichissement : $\nearrow$ — Production et absorption. Quand l'enrichissement varie, l' ^{235}U (fissile) et l' ^{238}U (capturant) sont modifiés.

Densité : $\searrow$ pour un système fini — Fuite

Concentration : $\nearrow$ — Absorption

Exercice 38 : hydrogène et criticité.

1. L'hydrogène peut améliorer ou dégrader le bilan neutronique selon les configurations. En particulier, il peut ralentir les neutrons mais aussi les capturer. Sa présence dilue la matière, ce qui a également un impact sur la densité du milieu, et donc sur les fuites de neutrons (chapitre 12 page 157). Il intervient également dans la réflexion des neutrons.

2. La concentration et la modération. L'hydrogène, par son effet modérateur, a également un rôle important pour l'empoisonnement.

3. eau, plastique, huile, porogène, additif, etc.

Exercice 39 : réflexion par du plomb.

À leur épaisseur saturante, le plomb est meilleur réflecteur que l'eau (cf. figure 10.1 page 146). Sa présence doit être prise en compte dans les calculs de criticité. Néanmoins, l'épaisseur saturante du plomb est supérieure à 100 cm. Cette épaisseur est très rarement rencontrée dans les installations. Une épaisseur plus faible, mais raisonnablement pénalisante, de 25 cm de plomb est ainsi considérée. Si des épaisseurs supérieures de plomb sont rencontrées, une analyse particulière est réalisée. Une épaisseur de 20 cm d'eau (correspondant à l'épaisseur saturante d'eau) est ensuite ajoutée à

l'épaisseur de plomb afin de s'assurer du caractère isolé du système : le k_{eff} n'augmentera plus si on rajoute un autre matériau réflecteur après ces 20 cm d'eau.

Exercice 40 : perception du risque de criticité.

1. 50 gU.L⁻¹
2. 300 gU.L⁻¹
3. non, cela ne change pas
4. 300 gU.L⁻¹ toujours pénalisant
5. ²³⁵U toujours pénalisant

Exercice 41 : détermination de l'équation de la cinétique ponctuelle à partir de l'équation de la diffusion.

La démonstration suivante est issue de [191].

L'équation de la diffusion (cf. page 104) est complétée pour intégrer la variation temporelle du flux et l'existence des neutrons retardés :

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, t)}{\partial t} &= D \Delta \phi(\vec{r}, t) - \Sigma_a \phi(\vec{r}, t) + \nu(1 - \beta) \Sigma_f \phi(\vec{r}, t) \\ &\quad + \sum_i \lambda_i C_i(\vec{r}, t) + S(\vec{r}, t) \\ \frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} &= \nu \beta_i \Sigma_f \phi(\vec{r}, t) - \lambda_i C_i(\vec{r}, t) \end{aligned}$$

En faisant apparaître la densité de neutrons ($\phi(\vec{r}, t) = vN(\vec{r}, t)$) et en considérant que les variables d'espace et de temps sont séparables ($N(\vec{r}, t) = f(\vec{r})n(t)$ et $C_i(\vec{r}, t) = g(\vec{r})c_i(t)$), il vient :
pour les précurseurs :

$$\begin{aligned} g(\vec{r}) \frac{dc_i(t)}{dt} &= \nu \beta_i \Sigma_f v f(\vec{r}) n(t) - \lambda_i g(\vec{r}) c_i(t) \\ \frac{dc_i(t)}{dt} &= \nu \beta_i \Sigma_f v \frac{f(\vec{r})}{g(\vec{r})} n(t) - \lambda_i c_i(t) \end{aligned}$$

pour les neutrons :

$$\begin{aligned} f(\vec{r}) \frac{dn(t)}{dt} &= D v n(t) \Delta f(\vec{r}) - \Sigma_a v f(\vec{r}) n(t) + \nu(1 - \beta) v \Sigma_f f(\vec{r}) n(t) \\ &\quad + \sum_i \lambda_i g(\vec{r}) c_i(t) + S(\vec{r}, t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = Dvn(t) \frac{\Delta f(\vec{r})}{f(\vec{r})} - \Sigma_a vn(t) + \nu(1 - \beta)v\Sigma_f n(t) \\ + \sum_i \lambda_i \frac{g(\vec{r})}{f(\vec{r})} c_i(t) + \frac{S(\vec{r}, t)}{f(\vec{r})} \end{aligned}$$

Pour pouvoir simplifier ces équations, il faut considérer que les fonctions de forme des neutrons et des précurseurs sont identiques $f(\vec{r}) = g(\vec{r})$. De même, les sources externes peuvent s'écrire de la façon suivante : $q(t) = \frac{S(\vec{r}, t)}{f(\vec{r})}$.

Pour que l'équation des neutrons ne soit qu'une fonction du temps, il faut que l'équation suivante soit satisfaite : $\Delta f(\vec{r}) + B_g^2 f(\vec{r}) = 0$.

L'équation se simplifie de la façon suivante :

$$\frac{dn(t)}{dt} = -Dvn(t)B_g^2 - \Sigma_a vn(t) + k_\infty \Sigma_a (1 - \beta)vn(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t)$$

En utilisant $M^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$, il vient :

$$\frac{dn(t)}{dt} = n(t)v\Sigma_a [-M^2 B_g^2 - 1 + k_\infty(1 - \beta)] + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t)$$

En posant $l_\infty = \frac{1}{v\Sigma_a}$, le temps de vie avant absorption et en utilisant la relation $k_{\text{eff}} = \frac{k_\infty}{1 + M^2 B_g^2}$, il vient :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{n(t)}{l_\infty} (1 + M^2 B_g^2) [-1 + k_{\text{eff}}(1 - \beta)] + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t)$$

En posant $l_0 = \frac{l_\infty}{1 + M^2 B_g^2}$:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{n(t)}{l_0} [k_{\text{eff}} - 1 - \beta k_{\text{eff}}] + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t)$$

En utilisant $\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$ et en posant $l = \frac{l_0}{k_{\text{eff}}}$, le temps de génération, il vient :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t)$$

De même, pour les précurseurs de neutrons retardés, l'équation devient :

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i c_i(t)$$

Exercice 42 : nombre de fissions dans un REP.

1. 3 300 MJ_{thermique} par seconde

1 J = 3,3.10¹⁰ fissions

par seconde, ce réacteur génère environ 10²⁰ fissions

2. en 1 seconde, ce réacteur génère autant de fissions que le nombre total maximal généré sur toute la durée de l'accident par un accident de criticité (1,2.10²⁰ fissions pour l'accident de Chalk River en 1952)

3. pour une fission, il y a généralement la création de deux produits de fission. Comme un assemblage reste plusieurs années dans un réacteur, la quantité de produits de fission dans un cœur n'est pas du même ordre de grandeur que celle générée par un accident de criticité. En cas de rejets de PF d'un cœur de réacteur, l'activité rejetée et les conséquences seront plus importantes que pour un accident de criticité. Ceci est confirmé par le REX des accidents de criticité qui montre que le rejet de PF n'est pas la conséquence la plus importante (comparée aux doses de rayonnement (neutrons et rayonnements gamma) qui peuvent tuer les personnes à proximité du siège de l'accident de criticité).

Exercice 43 : accident de criticité.

1. cf. page 342

2. irradiation (neutrons et rayonnements gamma) des intervenants directs (rayon d'impact significatif : quelques centaines de mètres)

Exercice 44 : consommation de matière en cas d'accident de criticité.

1. 10²⁰ fissions générées nécessitent 10²⁰ noyaux d'²³⁵U

$$m_{235\text{U}} = \frac{M_{235\text{U}} \times \text{nombre}_{\text{atome}}}{N_A}$$

A.N. :

$$m_{235\text{U}} = 39 \text{ mg}$$

2. ~ 40 mg à comparer à la masse minimale critique pour de l'²³⁵U d'environ 870 g pour une modération et une réflexion par de l'eau.

La différence est tellement importante que l'accident de criticité ne s'arrêtera pas par disparition des isotopes fissiles.

Exercice 45 : usage de fluides caloporteurs.

1. Situation normale : prise en compte de la réflexion dans les calculs : 20 cm d'eau par exemple pour atteindre l'épaisseur saturante.

2. Situations incidentelles :

- Fuite du caloporteur dans la matière fissile → changement de MFR et/ou précipitation de la matière fissile et/ou dilution d'un éventuel poison neutronique. b/ Prévention : compatibilité chimique ou empoisonnement du caloporteur ou double enveloppe du caloporteur
- Fuite de la matière fissile dans le caloporteur → dispersion de la matière fissile (si cuve de géométrie sûre). b/ Prévention : dimensionnement en géométrie sûre du circuit caloporteur ou double enveloppe
- Arrêt du refroidissement → évaporation et concentration de la matière fissile (si contrôle par la concentration), déformation géométrique (si contrôle par la géométrie), etc. b/ Prévention : redondance/secours du refroidissement
- ...

Exercice 46 : mode de contrôle par la géométrie.

1. Paramètre (masse, géométrie, modération, concentration, empoisonnement) sur lequel est imposée une limite dont le respect permet de garantir la sous-criticité d'un système quelles que soient les valeurs prises par les autres paramètres de ce système.

La définition réglementaire est disponible dans l'article 3.1.2 de la décision ASN 2014-DC-0462.

2. Déformations (vieillessement/corrosion, agression physique/chimique, etc.)

Fuites/débordements

Transferts intempestifs vers une géométrie non sûre

Interaction fortuite avec un équipement mobile contenant de la matière fissile (ou bien un réflecteur plus pénalisant que celui retenu dans les analyses)

3. cf. rapport IRSN N° 2022-00749 par exemple pour plus de détails.

Exercice 47 : densité de surface.

1. une plaque d'épaisseur finie et de largeur / longueur infinies réfléchie par une épaisseur saturante de béton (des deux côtés de la plaque). La plaque est modélisée par un mélange homogène de ^{239}Pu et d'eau avec un rapport de modération H/Pu variable. Pour chaque rapport de modération, la densité de surface critique est obtenue par le produit de l'épaisseur critique (obtenue par le calcul) multipliée par la concentration en ^{239}Pu correspondant à ce calcul (obtenue grâce à la loi de dilution). La plus petite valeur correspond à la densité de surface minimale critique.

2. Le rapport de modération conduisant à la valeur la plus pénalisante est si important que toutes les lois de dilution des différentes formes physico-chimiques (métal, oxyde, etc.) sont confondues.

3.

$$S = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$\frac{n \times m_{\text{fût}}}{S} = 0,14 \text{ g.cm}^{-2}$$

A.N. :

$$S = 2642,08 \text{ cm}^2$$

$$n = 3,70$$

Il est possible de mettre trois niveaux de fûts de déchets.

4. configuration de calcul : un réseau (infini ou fini en fonction des besoins et des résultats de calcul) de fûts de déchets au pas de 150 cm sur un ou plusieurs niveaux. La matière fissile est modélisée par une sphère modérée par de l'eau et décentrée (axialement et radialement) dans le fût.

Les scénarios incidentels à étudier sont les suivants :

- un surchargement d'un ou plusieurs fûts ;
- un surchargement du nombre de niveaux ;
- une réduction du pas du réseau ;
- un incendie ;
- présence d'un meilleur modérateur que l'eau (plastique par exemple) ;
- etc.

Exercice 48 : manipulation des données d'entrée pour les lois de dilution.

1.

$$\frac{m_U}{m_U + m_{A1}} = 0,2$$

Soit :

$$m_{A1} = \frac{0,8}{0,2} m_U$$

Dans 1 cm³ de mélange :

$$1 = V_U + V_{A1} = \frac{m_U}{d_U} + \frac{m_{A1}}{d_{A1}} = \frac{m_U}{d_U} + \frac{0,8}{0,2} \frac{m_U}{d_{A1}}$$

$$m_U = \frac{1}{\frac{1}{d_U} + \frac{0,8}{0,2} \frac{1}{d_{A1}}}$$

$$m_{A1} = \frac{1}{\frac{0,2}{0,8} \frac{1}{d_U} + \frac{1}{d_{A1}}}$$

A.N. :

masse volumique du mélange (masse UAl dans 1 cm³ de mélange) :

$$m_U = \frac{1}{\frac{1}{18,9} + \frac{0,8}{0,2} \frac{1}{2,7}} = 0,6517241379$$

$$m_{Al} = \frac{1}{\frac{0,2}{0,8} \frac{1}{18,9} + \frac{1}{2,7}} = 2,606896552$$

masse volumique (ρ) = 3,25862069
équivalent à :

$$\rho = \frac{1}{\frac{0,2}{18,9} + \frac{0,8}{2,7}}$$

2.

$$V_U = \frac{m_U}{d_U} = \frac{0,2\rho}{d_U}$$

$$V_{Al} = \frac{m_{Al}}{d_{Al}} = \frac{0,8\rho}{d_{Al}}$$

fraction volumique de l'uranium :

$$\frac{V_U}{V_U + V_{Al}} = \frac{1}{1 + \frac{0,8d_U}{0,2d_{Al}}} = 3,4482758 \%$$

3.

$$C_U = \frac{0,2\rho N_A}{M_U} = 1,6701055 \cdot 10^{21}$$

$$C_{Al} = \frac{0,8\rho N_A}{M_{Al}} = 5,81444138 \cdot 10^{22}$$

4.

$$m_U = 0,2 \frac{1}{\frac{0,2}{18,9} + \frac{0,8}{2,7}} = 0,6517241379$$

$$m_{Al} = 2,7$$

$$\rho_2 = 3,351724138$$

$$V_U = \frac{m_U}{d_U} = \frac{0,2\rho}{d_U}$$

$$V_{Al} = \frac{m_{Al}}{d_{Al}} = \frac{2,7}{2,7} = 1$$

$$\frac{V_U}{V_U + V_{Al}} = \frac{1}{1 + \frac{d_U}{0,2\rho}} = 3,33333333 \%$$

$$C_U = \frac{0,2\rho N_A}{M_U} = 1,6701055 \cdot 10^{21} \text{ (idem question 3)}$$

$$C_{Al} = \frac{2,7N_A}{M_{Al}} = 6,0221 \cdot 10^{22}$$

Exercice 49 : k_∞ et concentration critique limite en milieu infini.

1.

$$k_\infty = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} = \frac{\nu \sigma_f N_{\text{Pu}}}{\sigma_{\text{aO}} N_{\text{O}} + \sigma_{\text{aPu}} N_{\text{Pu}} + \sigma_{\text{aH}} N_{\text{H}}}$$

le mélange est composé de PuO_2 et d' H_2O avec N_{Pu} pour le Pu, N_{H} pour le H et $2N_{\text{Pu}} + N_{\text{H}}/2$ pour l'O.

$$k_\infty = \frac{\nu \sigma_f N_{\text{Pu}}}{\sigma_{\text{aO}} (2N_{\text{Pu}} + N_{\text{H}}/2) + \sigma_{\text{aPu}} N_{\text{Pu}} + \sigma_{\text{aH}} N_{\text{H}}}$$

$$k_\infty = \frac{\nu \sigma_f}{\sigma_{\text{aO}} (2 + N_{\text{H}}/(2N_{\text{Pu}})) + \sigma_{\text{aPu}} + \sigma_{\text{aH}} N_{\text{H}}/N_{\text{Pu}}}$$

ne dépend pas de la masse volumique.

2.

$$1 = \frac{\nu \sigma_f}{\sigma_{\text{aPu}} + N_{\text{H}}/N_{\text{Pu}} (\sigma_{\text{aH}} + \sigma_{\text{aO}}/2) + 2\sigma_{\text{aO}}}$$

A.N. :

$$N_{\text{H}}/N_{\text{Pu}} = 3487$$

3. formule de la loi de dilution (page 277) :

$$C_X = \frac{\rho_X}{1 + \frac{H}{X} \left(\frac{1}{2} \frac{\rho_X M_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} M_X} \right)}$$

$$\rho_{\text{Pu}} = \rho_{\text{PuO}_2} \frac{M_{\text{Pu}}}{M_{\text{PuO}_2}} = 9,701 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$C(\text{Pu}) = 7,61 \text{ gPu.L}^{-1}$$

valeur cohérente avec celle de la page 156.

Exercice 50 : concentrations atomiques du PuO_2 cristallisé ou mélangé à de l'eau.

1.

$$\text{Pourcentage atomique de } {}^{240}\text{Pu} = \frac{0,17}{M_{240\text{Pu}}} \frac{1}{\frac{0,17}{M_{240\text{Pu}}} + \frac{0,83}{M_{239\text{Pu}}}}$$

$$\frac{M_{239\text{PuO}_2}}{\rho_{239\text{PuO}_2}} = \frac{M_{\text{PuO}_2}}{\rho_{\text{PuO}_2}}$$

A.N. :

$$M_{\text{PuO}_2} = 271,169412$$

$$\rho_{\text{PuO}_2} = 11,467164$$

2. Concentrations atomiques :

$$C(\text{PuO}_2) = C(\text{Pu}) = \frac{C(\text{O})}{2} = \frac{\rho_{\text{PuO}_2} N_{\text{A}}}{M_{\text{PuO}_2}}$$

A.N. :

$$C(^{239}\text{Pu}) = 2,1151887 \cdot 10^{22} \text{ atomes par cm}^3$$

$$C(^{240}\text{Pu}) = 4,3142629 \cdot 10^{21} \text{ atomes par cm}^3$$

$$C(\text{O}) = 5,0932300 \cdot 10^{22} \text{ atomes par cm}^3$$

3.

Dans un litre, il y a $30 \times \frac{M_{\text{PuO}_2}}{M_{\text{Pu}}} = 34,0138912 \text{ g de PuO}_2$.

Le volume occupé par ce PuO_2 est $34,0138912 / \rho_{\text{PuO}_2} = 2,96619906 \text{ cm}^3$

Le volume occupé par l'eau est $1000 - 2,96619906 = 997,0338009 \text{ cm}^3$

En utilisant la densité de l'eau, on obtient la masse d'eau, ce qui permet d'obtenir la masse du mélange dans un litre.

A.N. :

$$\rho_{\text{mélange}} = 1,031047692 \text{ g.cm}^{-3}$$

4.

Le raisonnement est toujours réalisé dans un litre.

$$n_{\text{Pu}} = m_{\text{Pu}} / M_{\text{Pu}}$$

$$n_{\text{H}} = 2n_{\text{H}_2\text{O}} = 2m_{\text{H}_2\text{O}} / M_{\text{H}_2\text{O}}$$

A.N. :

$$\text{H/Pu} = n_{\text{H}} / n_{\text{Pu}} = 883,18514$$

5.

Concentrations atomiques :

$$C(\text{Pu}) = \frac{30 \text{ g.l}^{-1} \times N_{\text{A}}}{M_{\text{Pu}}}$$

$$C(\text{O}_{[\text{PuO}_2]}) = 2 \times C(\text{Pu})$$

$$C(\text{H}) = C(\text{Pu}) \times \frac{\text{H}}{\text{Pu}}$$

$$C(\text{O}_{[\text{H}_2\text{O}]}) = \frac{C(\text{H})}{2}$$

$$C(\text{O}) = C(\text{O}_{[\text{H}_2\text{O}]}) + C(\text{O}_{[\text{PuO}_2]})$$

A.N. :

$$C(^{239}\text{Pu}) = 6,27407 \cdot 10^{19} \text{ atomes par cm}^3$$

$$C(^{240}\text{Pu}) = 1,27970 \cdot 10^{19} \text{ atomes par cm}^3$$

$$C(\text{O}) = 3,35079 \cdot 10^{22} \text{ atomes par cm}^3$$

$$C(\text{H}) = 6,67137 \cdot 10^{22} \text{ atomes par cm}^3$$

Exercice 51 : formule des rapports de modération.

1. pour le réseau de sphérules :

$$\frac{V_{\text{mod}}}{V_{\text{fissile}}} = \left(1 + \frac{ep_{\text{mod}}}{r_{\text{fis}}}\right)^3 - 1$$

2. pour le réseau de plaques :

$$\frac{V_{\text{mod}}}{V_{\text{fissile}}} = \frac{ep_{\text{mod}}}{ep_{\text{fis}}}$$

3.

$$\frac{V_{\text{mod}}}{V_{\text{fissile}}} = \left(1 + \frac{ep_{\text{g}} + ep_{\text{mod}}}{r_{\text{fis}}}\right)^3 - \left(1 + \frac{ep_{\text{g}}}{r_{\text{fis}}}\right)^3$$

$$\frac{V_{\text{mod}}}{V_{\text{fissile}}} = \frac{ep_{\text{mod}}}{ep_{\text{fis}}}$$

Exercice 52 : palier poudre et laplacien matière.

1. formule page 280 :

$$\frac{H}{U} = \frac{\frac{\rho_U}{C(U)_{\text{poudre}}} - 1}{\frac{1}{2} \frac{\rho_U M_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} M_U}}$$

A.N. :

$$\rho_U = 9,6956$$

$$C(U)_{\text{poudre}} = 3,0850$$

$$\frac{H}{U} = 5,8409$$

2. au point de troncature, $C(U)_{\text{poudre}} = 3,0850$

$$\frac{C_H}{C_U} = \frac{H}{U} = 5,84090909 = \frac{\rho_H M_U}{C(U)_{\text{poudre}} M_H} = \frac{2 \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} M_U}{C(U)_{\text{poudre}} M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,681818181$$

Soit la masse volumique totale $3,5 + 0,681818181 = 4,181818181 \text{ g.cm}^{-3}$

3. le laplacien devrait augmenter car les fuites devraient diminuer (plus forte masse volumique) et l'apport de modération devrait améliorer le processus de fission.

Exercice 53 : lois de dilution Pu-H₂O et Pu-CH₂.

1. pour l'eau :

$$C(\text{Pu}) = \frac{19,6}{1 + \frac{\text{H}}{\text{Pu}} \frac{1}{2} \frac{19,6 \times 18}{1 \times 239}}$$

$$C(\text{Pu}) = \frac{19,6}{1 + 0,738 \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

pour le CH₂ :

$$C(\text{Pu}) = \frac{19,6}{1 + \frac{\text{H}}{\text{Pu}} \frac{1}{2} \frac{19,6 \times 14}{0,96 \times 239}}$$

$$C(\text{Pu}) = \frac{19,6}{1 + 0,598 \frac{\text{H}}{\text{Pu}}}$$

2. Le milieu fissile de référence dépend généralement du mode de contrôle. Pour cet exemple, c'est le CH₂ qui est pénalisant, compte tenu de la loi de dilution et pour un milieu isolé.

3.

$$M_C(\text{H}_2\text{O}) = 510 \text{ g} = \frac{K}{(C(\text{Pu})(\text{H}_2\text{O}))^s}$$

avec s compris entre 1,4 et 2 (cf. page 143).

À $\text{H}/\text{Pu} = 900$, $C(\text{Pu})(\text{H}_2\text{O}) = 0,02946$ et $C(\text{Pu})(\text{CH}_2) = 0,03635$

$$M_C(\text{CH}_2) = 510 \left(\frac{C(\text{Pu})(\text{H}_2\text{O})}{C(\text{Pu})(\text{CH}_2)} \right)^s$$

$M_C(\text{CH}_2) = 335 \text{ g}$ pour $s = 2$ et $M_C(\text{CH}_2) = 380 \text{ g}$ pour $s = 1,4$. Cela encadre la valeur de 340 g. Oui, c'est principalement un effet de densité. Les sections efficaces de capture de O et C sont faibles en particulier par rapport à celle de H.

Exercice 54 : choix d'un milieu fissile de référence.

1. Décision ASN criticité : milieu fissile enveloppe en termes de réactivité de ceux susceptibles d'être présents dans l'installation et conduisant, suite à l'étude des configurations normales et anormales, aux limites associées aux paramètres de criticité les plus pénalisantes compte tenu du mode de contrôle retenu.

2. Globalement décroissant. À mesure que de l'eau est rajoutée, la concentration en matière fissile diminue. Existence d'un palier poudre (cf. page 279).

3. Une phase de montée, correspondant au palier poudre. La concentration en matière fissile reste identique mais un effet de la modération et moins de fuite. Un point singulier car le palier poudre rejoint la loi de dilution de la matière frittée.

4. Le laplacien matière le plus important correspond à la géométrie la plus petite. $H/Pu = 6$ (attention au $H/Pu + 1$!)

5.

$$B_m^2 = B_g^2 = \frac{\pi^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}$$

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{B_m^2}} - d_{\text{ext}}$$

$$M_U = \frac{4\pi}{3} R^3 \times C(U)$$

Il faut faire des estimations pour différents rapports de modération. Un ordre de grandeur d'environ 500 g est retrouvé autour de $H/Pu = 900$.

6. Il faut regarder pour quel rapport de modération le B_m^2 s'annule et utiliser la loi de dilution pour déterminer la concentration. $\rightarrow 7 \text{ g.L}^{-1}$

7.

Géométrie : U(85 %) métal, pour un système isolé et compte tenu de la différence de B_m^2 . Attention néanmoins à la différence de spectre, le laplacien matière maximal n'étant obtenu au même rapport de modération.

Masse : ça dépend, la loi de dilution pour l'U(85 %) métal n'étant pas donnée.

Masse + géométrie : ça dépend (même si la loi de dilution pour l'U(85 %) métal avait été pas donnée).

Géométrie + concentration : ça dépend.

Masse + concentration : ça dépend.

Concentration limite critique : U(85 %) métal.

Exercice 55 : principe de double éventualité - 1.

La réponse (oui ou non) dépend des « caractéristiques » de ces deux anomalies, en lien avec le principe de double éventualité. Il faut d'abord s'assurer de la faible probabilité d'occurrence de ces anomalies. Ensuite vient la notion d'indépendance. Par exemple, si l'incendie engendre une inondation (ou conduit à l'intervention des pompiers avec utilisation d'eau) et que ces deux événements engendrent un accident de criticité, c'est l'incendie, seul, qui est à l'origine de l'accident de criticité, ce qui n'est pas acceptable en vertu du premier alinéa du principe de double éventualité (cf. page 304). Pour que ce cumul soit acceptable, il faut démontrer l'indépendance de ces deux anomalies. Enfin, il faut également mettre en place des moyens de détection pour ces anomalies. En particulier, pour l'incendie, il faut démontrer la fiabilité de la détection et de la lutte contre l'incendie (notion

de temps « adéquat ») pour que cet évènement soit considéré comme une anomalie selon le principe de double éventualité. Dit autrement, une anomalie qui n'est pas détectée (dans un délai adéquat) doit être postulée (de façon déterministe).

Exercice 56 : principe de double éventualité - 2.

En l'absence d'autres éléments, non. Car, au-delà du caractère de faible probabilité d'une défaillance humaine, qui est difficile à justifier, quel est le moyen de contrôle de la possible défaillance du second contrôle (en lien avec la troisième partie du second alinéa du principe de double éventualité (*chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens appropriés et fiables, permettant [...] cf. page 304*) ?

Exercice 57 : principe de double éventualité - 3.

L'accident de criticité peut survenir si les deux anomalies (augmentation de la concentration et fuite) sont :

- indépendantes ;
- de faible probabilité ;
- chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens appropriés et fiables, permettant la réparation ou la mise en place de mesures compensatoires dans un délai adéquat.

Il n'y a pas d'information sur l'indépendance mais on peut raisonnablement le supposer. Il n'y a pas d'information sur la faible probabilité mais on peut également le supposer. À vérifier avec les personnes en charge des équipements et du procédé !

Il faut supposer que la fuite n'est pas instantanée, sinon sa détection n'empêchera pas toute la cuve de se déverser...

1. oui / oui → non
2. oui / non → oui, on détecte la fuite mais il n'y a pas moyen de revenir dans un état sûr.
3. non / oui → oui, car, au sens strict, l'anomalie de fuite n'est pas surveillée. Mais ce point est discutable. En pratique, avec une analyse plus poussée du procédé, il sera fait en sorte d'arriver à répondre non à cette question : parlez-en à un critique chevronné !
4. non / non → oui, le troisième alinéa n'est pas rempli

Exercice 58 : principe de double éventualité - 4.

Cas issus de la RFS I.3.c

1. oui, si les dispositifs de contrôle de bon fonctionnement du procédé respectent le principe de double éventualité, le risque d'arrivée intempestive

de solutions présentant un risque de criticité en milieu infini dans l'appareil de géométrie non sûre doit être négligeable.

Dans le cas contraire, le circuit de transfert est fermé et le transfert de solutions ne peut être réalisé qu'après vérification, par deux estimations, par des méthodes différentes, que la concentration en matière fissile de la solution contenue dans l'appareil de géométrie sûre, est satisfaisante.

2. le circuit de transfert doit être interrompu en fonctionnement normal par des dispositifs appropriés et fiables. L'établissement de la liaison et le transfert se feront selon une procédure écrite prévoyant notamment deux estimations, par des méthodes différentes, de la concentration en matière fissile de la solution contenue dans l'appareil de géométrie sûre.

Exercice 59 : angle solide et interactions.

1. Alignée

2. En étoile (pas triangulaire) pour obtenir l'angle solide maximal. Le cas d'une configuration en carré pourrait être également envisagé pour rechercher le k_{eff} maximal de la configuration.

3. Formule page 567 :

$$\Omega = \frac{4r}{d} \sin \theta$$

avec $\tan \theta = \frac{L}{2d}$

En se plaçant au centre d'un cylindre :

$$d = 100 - 12,5 = 87,5 \text{ cm}$$

$$\tan \theta = \frac{100}{2 \times 87,5}$$

$$\Omega = \frac{4 \times 12,5}{87,5} \sin \theta$$

$$\Omega = 0,2835 \text{ sr}$$

Pour la configuration alignée, l'angle solide maximal est 2Ω . Pour la configuration en étoile, l'angle solide maximal est 3Ω .

4. La configuration alignée présente un k_{eff} plus petit mais nécessite des dispositions pour éviter que l'autre situation ne se produise.

Exercice 60 : utilisation de résultats de norme.

Il faut (et il suffit) qu'un seul paramètre soit inférieur à la valeur admissible pour que la configuration soit admissible.

1. admissible (par le diamètre)

2. admissible (par le diamètre)

3. admissible (par la masse)

4. admissible (par le diamètre et l'enrichissement est plus faible)

Exercice 61 : savoir lire une note de norme.

1.

Volume total : 27 L

Masse : 36 kg d' U_t

Volume d'eau : 21 L

Diamètre : 25,4 cm

Épaisseur : 12 cm

Densité de surface : 12 g.cm⁻³

2.

Volume total : H/U = 10 - 11

Masse : H/U = 25

Volume d'eau : H/U = 8 - 9

Diamètre : H/U = 10 - 11

Épaisseur : H/U = 9 - 10

Densité de surface : H/U = 45

Les dimensions géométriques critiques sont pour les rapports de modération non nuls. La masse minimale critique est obtenue pour un rapport de modération plus important que pour la géométrie. La densité de surface critique est obtenue pour un rapport de modération important mais inférieur à 100.

3. La concentration en uranium pour un rapport de modération nul est de l'ordre de 9,5 g.cm⁻³, compatible avec de l' UO_2 de densité maximale théorique. Il n'y a pas de valeur critique pour un rapport de modération nul. La masse minimale critique est de l'ordre de 35 kg d'uranium. En comparant avec le tableau 20.5 de la page 312, il est possible d'indiquer que le milieu fissile est de l' UO_2 enrichi à 5 %, de densité maximale théorique, modéré par de l'eau et réfléchi par 20 cm d'eau.

Exercice 62 : savoir lire une figure.

1. masse : 1,17 kg / 0,785 kg

2. volume : 22,356 L / 13,063 L

3. concentration : masse min : 32 g.L⁻¹ / 35 g.L⁻¹concentration : volume min : 110 g.L⁻¹ / 135 g.L⁻¹4. concentration limite critique : 10 g.L⁻¹

5. en plus des points déjà déterminés, il faut sélectionner d'autres couples de points (masse critique, volume critique), ce qui donne les concentrations associées. Le volume critique est lié au laplacien par les deux formules suivantes.

$$V_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3$$

$$B_m^2 = B_g^2 = \frac{\pi^2}{(R_c + d_{\text{ext}})^2}$$

Pour une réflexion par 2,5 cm, d_{ext} est de l'ordre de 4 cm (page 111).

6. le k_{eff} baisse (jusqu'à repasser sous-critique)
7. le k_{eff} augmente
8. le k_{eff} augmente puis diminue (jusqu'à repasser sous-critique)
- 9.1. le k_{eff} augmente
- 9.2. le k_{eff} baisse
- 9.3. le k_{eff} baisse (jusqu'à repasser sous-critique)

Exercice 63 : dimensionnement d'un équipement contenant de la poudre.

1. Le laplacien matière maximal est obtenu pour un rapport de modération de 14 ($1,87 \text{ gU.cm}^{-3}$), c'est-à-dire après le palier poudre d'une poudre de densité 3,5 ou 5,5. La sous-criticité n'est donc pas remise en cause.

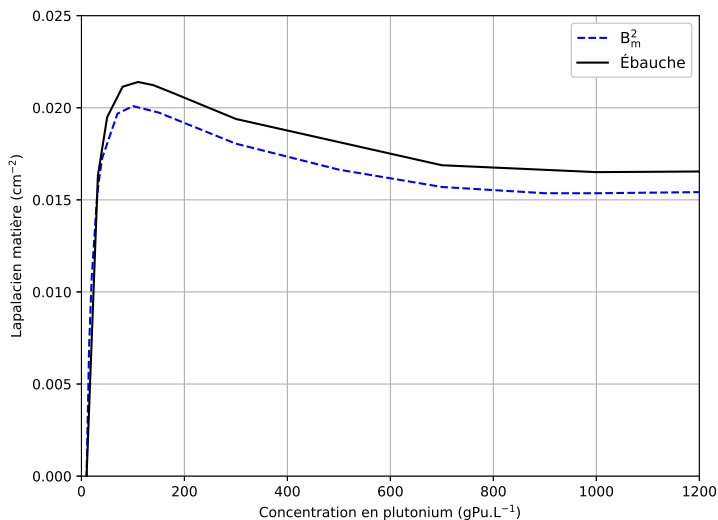
2. L'optimum pour la masse étant situé pour des rapports de modération plus importants que l'optimum pour la géométrie (compte tenu du caractère décroissant de la loi de dilution), la sous-criticité n'est donc pas remise en cause par ce changement d'hypothèse.

3. $B_m^2(\text{max}) = 0,0221$

$d_{\text{ext}} \approx 6 \text{ cm}$

pour le cylindre :

$$B_m^2 = B_g^2 = \frac{j_0^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}$$



$$D = \frac{2j_0}{\sqrt{B_m^2}} - 2d_{\text{ext}}$$

$$D = 20,35 \text{ cm}$$

pour la masse de matière fissile, pour la sphère :

$$B_m^2 = B_g^2 = \frac{\pi^2}{(R + d_{\text{ext}})^2}$$

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{B_m^2}} - d_{\text{ext}}$$

$$M_U = \frac{4\pi}{3} R^3 \times C(U)$$

pour H/U de 25, une masse minimale d'environ 20,9 kg d'uranium.

4. a priori, oui, les sphérules/pastilles de rayon variable sont plus pénalisantes que la poudre pour un enrichissement de 5 % (cf. page 273).

Exercice 64 : mode de contrôle par la masse entre deux UC.

1.

$$M + \Delta M$$

2.

$$M - \Delta M$$

3. Des comptabilités différentes pour chaque BAG ainsi qu'une « création » de masse de matière fissile.

4. Double pesée dans la BAG 1 mais diversifiée (doseuse et balance).

Une pesée dans la BAG 1 et une pesée dans la BAG 2 (dans une zone préparatoire par exemple).

Bien souvent, il s'agira de 2,5 moyens (une estimation, une première valeur, puis une confirmation).

Il est également possible de comptabiliser la masse brute (conteneur + matière fissile) avec une balance dans la BAG 1 mais il faut dans tous les cas une seconde pesée.

5. Réflecteur différent ou suite du procédé qui impose des restrictions (situation incidentelle spécifique).

6. Transfert unitaire vers cette BAG avec « verrouillage » des autres transferts possibles. La nature du verrouillage est diverse.

7. Ne pas déduire du bilan de la BAG 1 la masse transférée tant qu'il n'y a pas eu la confirmation que celle-ci a bien été réceptionnée.

Exercice 65 : marge de sûreté et k_{eff} .

Non. Tout dépend des autres hypothèses considérées (cf. section 20.7.6 page 328).

Exercice 66 : enrichissement de l'uranium et risque de criticité.

Oui et non.

Oui : en dessous de 1 %, pas de risque de criticité excepté pour des configurations très précises (barreaux dans des modérateurs spécifiques (graphite, eau lourde)).

Non : au-delà de 1 %, les quantités manipulées sont généralement fonction des limites liées à l'enrichissement (cf. section 21.1 page 339).

Exercice 67 : limitation des conséquences.

De façon générale, il faut maximiser la dose pour l'estimation des conséquences (carte de dose) et minimiser la dose pour la détection.

1. carte de dose
2. carte de dose
3. détection
4. carte de dose
5. carte de dose
6. cela dépend des autres hypothèses et distances considérées
7. détection

Exercice 68 : ordre de grandeur de l'accident de Tokai-Mura.

1. Page 222 : SILENE à 1 m (10^{17} fissions) : 20 Gy neutron / 25 Gy gamma (total 45 Gy).

Premier pic : $5 \cdot 10^{16}$ fissions.

Opérateur à 1 m : 10 Gy / 12,5 Gy (total 22,5 Gy).

Opérateur à 0,5 m : 40 Gy / 50 Gy (total 90 Gy).

Opérateur à 4 m : 0,625 Gy / 0,782 Gy (total 1,41 Gy).

Ordre de grandeur supérieur à la dose semi-létale pour les deux opérateurs les plus proches de l'accident de criticité.

2.

$$\text{plateau} : 2,5 \cdot 10^{18} \times 0,9 / (20 - 0,5) = 1,154 \cdot 10^{17} \text{ fissions.h}^{-1}$$

soit environ 1 kW (la puissance d'un radiateur!).

débit de dose neutron (à 150 m) :

$$20 \text{ Gy} \times 10 \text{ Sv.Gy}^{-1} / 150^2 \times 1,154 = 10,26 \text{ mSv.h}^{-1}$$

(contre environ $1,42 \text{ mSv.h}^{-1}$ pour la référence [213])

débit de dose gamma (à 150 m) :

$$25 \text{ Gy} \times 1 \text{ Sv.Gy}^{-1} / 150^2 \times 1,154 = 1,28 \text{ mSv.h}^{-1}$$

(contre environ $0,1 \text{ mSv.h}^{-1}$ pour la référence [213])

débit de dose neutron (à 280 m) : $2,94 \text{ mSv.h}^{-1}$

débit de dose gamma (à 280 m) : $0,368 \text{ mSv.h}^{-1}$

3.

- données dosimétriques de SILENE ;
- double enveloppe en eau ;
- écran (bâtiment) ;
- atténuation à longue distance.

4. Pour chaque PF, la méthode consiste à déterminer :

- l'activité rejetée (en Bq) ;
- puis l'activité volumique (en Bq.m^{-3}) à 100 m en utilisant le coefficient de dilution atmosphérique ;
- puis le débit de dose en utilisant les coefficients de dose, soit par inhalation (ce qui nécessite le débit respiratoire), soit par exposition.

$$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} N$$

avec $t_{1/2}$ exprimée en secondes.

$$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} N_f \times FY$$

pour le Kr-88 :

$$A = \frac{\ln 2}{2,84 \times 3600} 2,5.10^{18} \times 0,0354 = 6.10^{12} \text{ Bq}$$

À 100 m, en tenant compte du facteur de dilution, l'activité volumique du Kr-88 est de 6.10^6 Bq.m^{-3} .

Pendant 1 h :

$$\text{Dose par heure} = 6.10^6 \times \frac{8,4.10^{-9}}{24} = 2,1 \text{ mSv}$$

Pour l'iode 135 :

$$A = \frac{\ln 2}{6,61 \times 3600} 2,5.10^{18} \times 0,0638 = 4,65.10^{12} \text{ Bq}$$

A 100 m, en tenant compte du facteur de dilution, l'activité volumique de l'iode 135 est de $4,65.10^6 \text{ Bq.m}^{-3}$.

En 1 h, compte tenu du débit respiratoire, une personne inhale $4,65.10^6 \times 1,2 = 5,58.10^6 \text{ Bq}$.

Pendant 1 h :

$$\text{Dose par heure} = 5,58.10^6 \times 3,2.10^{-10} = 1,8 \text{ mSv}$$

La valeur la plus importante est $26,6 \text{ mSv}$ par heure pour le Xe-138 (mais présente une période de 14,2 min).

5. L'estimation des rejets est très pénalisante, en particulier :

- $2,5.10^{18}$ fissions générées de façon instantanée ;
- 100 % des PF rejetés (pas de « capture » dans le système divergent, aucun dépôt dans l'installation, aucun filtrage avant de sortir de l'installation) ;
- utilisation du rendement cumulé. Il faut analyser plus finement les chaînes de décroissance ;
- non prise en compte de la décroissance du PF, en particulier pour les plus petites périodes radioactives (Xe-138 en particulier).

Exercice 69 : choix du milieu fissile de référence pour des assemblages combustibles REP.

Les assemblages UOX et MOX ont les mêmes dimensions et le même rapport de modération. Le laplacien matière est donc un paramètre pertinent pour comparer la réactivité des assemblages isolés.

1. manutention en air : MOX 1 / MOX 2 (cf. figure 33.8 pour le plus faible rapport de modération) Ce cas sera rarement présenté dans les analyses de criticité.
 2. manutention en eau : UOX / UOX (cf. figure 33.7 pour un rapport de modération de 2)
 3. expansion en air : MOX 1 / MOX 2 (cf. figure 33.8 pour le plus faible rapport de modération)
 4. expansion en eau : UOX / UOX : il semble peu vraisemblable d'avoir des expansions jusqu'à un rapport de modération de 3 ou 3,5. Dans le cas contraire, il faudra considérer le MOX comme milieu fissile de référence (cf. figure 33.7).
 5. ruine en air : MOX 1 / MOX 2 (cf. figure 33.8 pour le plus faible rapport de modération)
 6. ruine en eau : UOX ou MOX1 en fonction du rapport de modération / MOX 2 (cf. figure 33.8)
 7. entreposage en piscine : cela va dépendre du mode de contrôle retenu (cf. figure 33.7). Le laplacien est applicable principalement pour un système isolé.
 8. découpe et dissolution : de manière générale, cela dépend du mode de contrôle. Il n'y a pas de contrainte sur le rapport de modération ni sur la taille de la pastille (paramètres non contrôlés, cf. figure 33.8).
- géométrie : MOX1 / MOX2. Correspond au laplacien maximal sur toute la plage de variation du rapport de modération.
- masse : MOX1 / MOX2. Situé pour des rapports de modération plus importants que le laplacien maximal (la valeur n'est pas connue précisément ici).
- géométrie + masse : MOX1 / MOX2. Situé entre les deux optimums de laplacien (pour la géométrie et pour la masse).
- Dans cet exemple, c'est systématiquement le MOX qui est enveloppe.

9. fin du procédé (mode de contrôle par la concentration pour un milieu homogène, cf. figure 33.9) : MOX1 / MOX2. Le laplacien est nul (correspondant à un $k_\infty = 1$) pour de plus importantes valeurs de rapport de modération (c'est-à-dire de plus faibles concentrations).

Exercice 70 : transport de matière fissile.

1. CNT : $5N = 50 \rightarrow N = 10$

CAT : $2N = 28 \rightarrow N = 14$

ISC $\times N = 50$

Le N minimal correspond à l'ISC maximal pour ce premier type de colis.

$$\text{ISC}_{\text{colis } 1} = 5$$

2.

$$\sum \text{ISC} = 3 \times \text{ISC}_{\text{colis } 1} + x \times \text{ISC}_{\text{colis } 2} \leq 50$$

$$x \leq \frac{50 - 3 \times 5}{10} = 3,5$$

Le nombre de colis d'un autre type est de 3 pour ce moyen de transport (ainsi $\sum \text{ISC} = 45 \leq 50$).

Exercice 71 : sûreté-criticité et gaine de ventilation.

1. oui, car il peut être difficile d'exclure le risque d'après le principe de double éventualité. Le REX montre qu'il peut y en avoir.

Il s'agira d'une accumulation lente de façon réaliste (ou bien mettre en place des dispositions pour que cela soit le cas).

Dans certains cas, l'accumulation peut être exclue compte tenu des dispositions mises en place.

2. Le mode de contrôle va dépendre du procédé. Cela peut être la géométrie en créditant des poussières (milieu homogène) et des hypothèses réalistes (U_3O_8 par exemple).

Cela peut être la masse ou la masse + la modération. Dans ce cas, la masse est basée sur le transfert d'un flux de matière et un pourcentage de perte, sous hypothèse d'une accumulation lente.

La méthode de prévention est la détection de ces accumulations à intervalle régulier (fréquence à définir) par une inspection visuelle (uranium) ou débit de dose (plutonium).

L'analyse créditera qu'une perte importante de matière sera détectée par le procédé.

Si le scénario d'un transfert massif conduit à une situation inacceptable, la parade passera par un mode de contrôle par la géométrie (ou géométrie + modération).

Exercice 72 : section efficace multigroupe.

Il convient de noter, qu'au début de la criticité, il n'y avait pas de sections efficaces ponctuelles. Les premières sections efficaces étaient donc multigroupes.

Avantage : rapidité, les études de criticité nécessitant en général beaucoup de points de calcul.

La partie « homogénéisation » des sections efficaces permet de couvrir des situations sans avoir à modéliser chaque configuration (modélisation d'un ou plusieurs « trous d'eau » dans un assemblage combustible par exemple).

Inconvénient : approximations physiques (phénomènes d'autoprotection spatiale et énergétique), nécessitant un effort de qualification important.

Les codes déterministe actuels n'utilisent pas les sections efficaces ponctuelles.

Exercice 73 : utilisation des codes de calcul.

- détermination éventuelle de la géométrie et des conditions aux limites → une géométrie (en cm)

- détermination des concentrations atomiques (utilisation des lois de dilution) → concentration atomique (en atomes par cm^3)

- données nucléaires avec les traitements idoines : sections efficaces, nombre de neutrons par fission, etc. pour la température et le maillage énergétique souhaités → bibliothèque de données nucléaires

- calcul en lui-même avec le choix de la méthode (déterministe ou Monte-Carlo) et les options choisies → k_{eff}

Exercice 74 : méthode Monte-Carlo.

1. Dans le repère sphérique, θ varie de façon uniforme entre 0 et 2π tandis que le $\cos \phi$ varie de façon uniforme entre 1 et -1. Soit :

$$\theta = 2\pi n$$

$$\cos \phi = 1 - 2n$$

$$x = \sin(\phi) \cos(\theta)$$

$$y = \sin(\phi) \sin(\theta)$$

$$z = \cos(\phi)$$

2. La probabilité $p(x)$ de parcourir une distance x est donnée par la formule de la page 69.

$$n = \int_0^x \exp(-\Sigma_t s) \Sigma_t ds$$

Soit :

$$n = 1 - \exp(-\Sigma_t x)$$

$$x = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(1 - n)$$

$(1 - n)$ est distribué de la même façon que n , soit :

$$x = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(n)$$

Exercice 75 : étude de cas : dimensionnement d'une cuve d'entreposage.

Partie I

1. MFR :

Nitrate Pu

Vecteur Pu : 71/17/11/1

Homogène

Eau

2. Pour un réflecteur « béton » :

Masse critique : 800 g (contre 250 L $\times$ 90 gPu.L⁻¹ = 22,5 kg)

Volume critique : 13 L (contre 250 L)

Diamètre critique : 17,7 cm (pas adapté car il faut environ 10 m de haut pour contenir 250 L)

Épaisseur critique : 3,7 cm (pas adapté)

Concentration critique : 9,2 g.L⁻¹ (contre 45 ou 90 g.L⁻¹)

L'application des facteurs de sécurité (cf. tableau 20.7 page 330) va amplifier l'inadéquation de ces paramètres comme paramètre contrôlé pour cette conception. Un réflecteur « eau » ne modifiera pas les conclusions.

3. Pas possible de retenir un seul mode de contrôle unique

4. Cela ne change rien aux conclusions

5. - fractionner la matière fissile en volume sûr (environ 10 L) et définir une distance minimale entre chacun de ces objets. Problème d'encombrement pour un entreposage de 250 L + contraintes d'exploitation ;

- empoisonner la solution (Gd ou B) : l'ajout de poison n'est pas envisageable car l'objectif est de réutiliser cette matière (problème de repurification de la solution).

Partie II

6. hauteur de la cuve et épaisseur fissile

$$V_{\text{utile}} = \pi H \times (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2)$$

$$r_{\text{ext}} = r_{\text{int}} + ep_{\text{fissile}}$$

$$\varnothing_{\text{ext}} = \frac{V_{\text{utile}}}{\pi H e p_{\text{fissile}}} + ep_{\text{fissile}} + 2ep_{\text{acier}}$$

7. Modélisation uniquement des éléments ayant un impact significatif sur la réactivité (i.e. réflexion et absorption) dans une optique de sûreté :

- maximisation des réflecteurs (plomb, polyéthylène, structures de forte épaisseur > quelques cm)

- minimisation des absorbants (notamment négliger la « quincaillerie ») : soit inutile pour le k_{eff} , soit il faudra justifier la présence de ces éléments en pratique (en fonctionnement normal ET en situation d'incident et d'accident).

8. environnement : distance au mur/sol/plafond de la cellule

9. mode de contrôle par la géométrie. Pour cet équipement, plusieurs dimensions géométriques seront à garantir.

10. cuve complètement remplie de matière fissile en faisant varier le rapport de modération (qui n'est pas contrôlé).

11. le k_{eff} est maximal pour $H/\text{Pu} = 0$. Il est sous-critique.

12. débordement, séismes, chute de charge, incendie, inondation

13. le k_{eff} maximal devient surcritique pour une densité de brouillard de 0,1. Avec cette variation de la densité du brouillard d'eau, il existe une compétition entre la réflexion des neutrons, la modération des neutrons et l'absorption des neutrons (découplage entre deux zones opposées de la cuve annulaire). Au final, la conception est à revoir.

14. Rajout de l'empoisonnement hétérogène (mode de contrôle géométrie + empoisonnement) ou de la limitation de la concentration (mode de contrôle géométrie + concentration)

Partie III

15. L'introduction de l'absorbant entraîne une modification de la variation de réactivité avec la densité de brouillard d'eau. L'optimum n'est pas obtenu pour la même densité de brouillard d'eau. L'effet réflecteur de l'eau (extérieure à la cuve) devient prépondérant.

Les résultats des calculs complémentaires montrent l'importance de l'absorbant (prévisible) et du modérateur (polyéthylène) (un peu moins prévisible) dans la maîtrise de la sous-criticité. Il faudra bien analyser les risques de perte / dégradation de ces deux éléments.

Partie IV

16. Le cas le plus pénalisant est obtenu pour les rapports de modération les plus faibles, c'est-à-dire pour les concentrations en plutonium les plus importantes d'après la loi de dilution. La concentration (nominale ou maximale) du procédé conduit à des gains en réactivité très importants.

17. et 18. de manière générale, les exigences de sûreté sont relatives :

- au milieu fissile de référence ;
- au mode de contrôle ;
- à l'environnement.

Exigences liées au milieu fissile de référence. Le contenu de la cuve doit rester limité aux milieux fissiles couverts par le « Sel de Pu standard » (PuO_2F_2). Sont à exclure notamment les milieux dont la densité en Pu serait supérieure pour un même rapport de modération H/Pu (Loi de dilution) (par exemple le PuO_2).

Dont l'isotopie du Pu est couverte par $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu} = 71/17/11/1$ %. Sont à exclure les milieux qui contiendraient moins de ^{240}Pu et plus de ^{239}Pu ou de ^{241}Pu . Ceci pour le fonctionnement normal et les situations d'incident et d'accident définies par l'analyse de sûreté.

Respect des exigences (dispositions de prévention). L'analyse de sûreté devra définir les dispositions prises pour garantir le respect de l'exigence, par exemple : Absence de telles matières dans l'installation, consignes et verrouillages interdisant l'arrivée de telles matières dans l'équipement.

Ainsi, le choix du milieu fissile de référence pour les calculs est fortement lié à l'analyse de sûreté

Exigences liées à la géométrie de l'équipement. L'épaisseur fissile de la cuve doit rester inférieure à 10,4 cm. Doivent donc être inclus dans les 10,4 cm, les tolérances de fabrication, la corrosion des viroles en acier, les sollicitations thermiques, etc. Ainsi, l'épaisseur nominale de la cuve $\ll 10,4$ cm.

Si l'empoisonnement hétérogène avait été choisi, les caractéristiques de l'absorbant auraient dû être garanties, soit : épaisseur et composition du Cd (toutes tolérances & incertitudes incluses ...), présence de la feuille de Cd en tout point en regard de la matière fissile, épaisseur, composition & présence du polyéthylène (en particulier au regard du risque d'incendie, le polyéthylène étant facilement inflammable).

Respect des exigences (dispositions de prévention), par exemple : contrôles de fabrication sur les éléments soumis à exigence et suivi en cours de vie, tenue sismique des équipements pouvant endommager la cuve, interdiction de manutentionner des équipements lourds au-dessus de la cuve, maîtrise du risque d'incendie dans la salle (+ gainage du polyéthylène avec de l'acier).

Exigences liées à la concentration de la matière fissile. La concentration de la solution dans la cuve doit rester inférieure ou égale à 90 g.L^{-1} . En particulier au regard des situations d'un dysfonctionnement du procédé (amont ou aval (retour par débordement)), de la précipitation dans la cuve (risque lié aux conditions d'exploitation : acidité, T° , etc.). Attention, le choix du milieu fissile de référence « sels de Pu standard » (PuO_2F_2), couvrant les précipités n'a plus de sens avec la mise en œuvre d'un contrôle par la concentration (ne couvrant pas les précipités).

Respect des exigences (dispositions de prévention). L'analyse de sûreté devra définir les dispositions prises pour garantir le respect de l'exigence, par exemple, des consignes d'exploitation, les mesures et le contrôle de la

concentration avant envoi dans la cuve (verrouillage criticité), maîtrise du risque de précipitation. Ainsi, les exigences et les dispositions de prévention sont fortement dépendantes de l'ensemble du procédé (pas uniquement de l'équipement).

Exigences liées à l'implantation de l'équipement. La distance entre la cuve et le mur le plus proche doit rester supérieure à 30 cm. La cuve ne doit pas être mise en présence d'autres équipements contenant de la matière fissile (les calculs de dimensionnement n'ont pas étudié de situations d'interaction neutronique).

Respect des exigences (dispositions de prévention). L'analyse de sûreté devra définir les dispositions prises pour garantir le respect de l'exigence, par exemple des consignes d'exploitation, la mise en place de barrières physiques, la tenue sismique de l'ancrage de la cuve.

Exercice 76 : étude de cas : cuves d'effluents et mode de contrôle par la concentration.

1. Sur une liaison de type permanente, la garantie de la concentration de la solution amont repose sur la maîtrise des paramètres en amont (échantillonnages en amont réalisés par l'expéditeur).
2. Système de PE de la cuve A.
3. Il s'agit d'un transfert non permanent de la cuve A vers la cuve B. Les caractéristiques de la concentration en matière fissile de la cuve B sont basées sur la garantie des caractéristiques de la cuve A. Transfert vers la cuve B après vérification des analyses de la cuve A. Le sujet d'un temps de séjour maximum dans la cuve B avant envoi en aval du procédé est à discuter (modification des caractéristiques avec le temps dans la cuve B).
4. Système de PE et plusieurs méthodes d'analyse (peut être difficile selon la gamme de concentration car pas les mêmes méthodes utilisées).
5. Maintien de l'acidité et de la température – contrôle par PE et analyses.
6. Brassage dans les cuves A et B. Dans la cuve A, maintien de l'acidité et de la température – contrôle par PE et analyses.
7. Contrôle systématique de la solution amont. La cuve C est vide en dehors des opérations de rinçage.
8. Dans ce type d'analyse, on réfléchit au temps d'intervention avant d'atteindre une situation inadmissible.
 - Incendie : évaporation ;
 - Perte du refroidissement : échauffement de la solution.
9.
 - Incendie : évaporation → augmentation concentration → risque de précipitation/cristallisation.
 - Inondation : dilution → baisse acidité → risque de précipitation.
 - Défaillance des moyens de contrôle. Envoi de solution incompatible.
 - Transfert intempestif (réactifs, circuits annexes).

- Opérations de maintenance/rinçage (erreur de lignage).
 - Risque lié à une fuite :
 - débordement : passage par trop-plein/évent → présence de liquide non compatible.
 - lèchefrites : présence de liquide non compatible → risque de précipitation (attention lors de la reprise des solutions : réaliser des PE).
 - boucles de fluides caloporteurs : dilution → baisse de l'acidité → risque de précipitation.
 - Perturbation du procédé :
 - augmentation de la température : augmentation de la concentration → risque de précipitation
 - baisse de l'acidité : risque de précipitation.
 - présence ou absence de solvant : séparation sélective, extraction, dés-extraction, formation d'interphase...
 - perte du système de brassage : risque d'accumulation.
10. Brassage + rinçage des cuves.

Exercice 77 : étude de cas - Boîte à gants de mélange et de transfert.

1.

MFR : nitrate de Pu modéré de façon homogène par de l'eau. La valence du nitrate a une importance limitée sur les valeurs critiques et ne change pas les conclusions de cet exercice.

Nitrate de Pu IV avec vecteur Pu (74,37/15/9,75/0,88)

$r_0 \geq 0,15$; $r_1 = {}^{241}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu} \leq 0,65$; $r_2 = {}^{242}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu} \geq 0,09$.

Masse → pas appropriée car procédé continu.

Modération : non car on ne peut pas limiter la quantité de modérateur (procédé fluide!).

Empoisonnement → pas adapté car il faudra repurifier ultérieurement la solution pour utiliser le plutonium.

Concentration → pas appropriée car concentration de solution supérieure aux limites critiques.

Volume → oui en considérant le volume des 3 équipements.

Volume total pots séparateurs + pot de mélange = $2 \times 1,2 + 7,6 = 10$ L

Volume critique = 14,9 L. Volume maximal admissible = $14,9 \times 0,75 = 11,17$ L

2. Dispositions :

- PE pour la garantie du ${}^{240}\text{Pu}/\text{Pu}_t$ d'au moins 15 %. En pratique, cette mesure aura lieu à l'arrivée de la matière dans l'installation, les scénarios de séparation isotopique du plutonium pouvant en pratique être exclus.
- contrôles géométriques des pots avant mise en service → spécification/TQC/PV de recette/fiche de criticité, puis vérification à interval régulier (réexamen par exemple).

- attention aux réflecteurs : moins bon réflecteur que l'eau. Interdire l'introduction de protection radiologique en plomb à l'intérieur de la boîte à gants par exemple.

- exclusion d'une zone autour de la boîte à gants pour limiter les interactions neutroniques et l'apport de bon réflecteur

Dysfonctionnements :

- fuite de la solution en fond de BâG → présence de détecteurs en fond de BâG ; présence d'une tuyauterie de vidange vers une cuve de géométrie sûre ; positionnement du trop plein (vers tuyauterie de vidange) de tel sorte que la hauteur de solution soit inférieure à l'épaisseur maximale admissible (interaction avec le pot de mélange à prendre en compte suivant son positionnement) ; vérification que le débit de fuite et supérieur au débit d'alimentation ; vérification que la vidange fonctionne avant mise en service.

- séisme : en cas de séisme, arrêt de l'alimentation (les éventuelles fuites à l'intérieur de la boîte à gants sont traitées avec les dispositions indiquées précédemment). La boîte à gants doit conserver sa géométrie (présence d'ancrage). Les équipements autour de la boîte à gants ne doivent pas être agresseurs en cas de séisme.

En cas de maintenance, le remplacement des équipements à l'intérieur de la boîte à gants doit faire l'objet de vérifications, quant au volume des nouveaux équipements. La remise en service de la boîte à gants nécessite des vérifications (absence de fuite, absence de produits plus hydrogénés que l'eau (produit de maintenance), non bouchage du trop plein, bon fonctionnement des détecteurs de présence de liquide, etc.).

3. Dans ce cas, il est possible d'argumenter que le volume des tuyauteries est faible et que les interactions des tuyauteries avec les pots sont négligeables. Pour cela, il est possible de mettre en regard la configuration de la boîte à gants avec la configuration retenue pour déterminer le volume minimal critique (sphère de matière fissile à l'optimum de modération réfléchi par 20 cm d'eau au contact de la sphère).

4. Même un mode de contrôle réputé « passif » nécessite différents types de contrôle (actif et administratifs).

5. On suppose l'absence de risque de précipitation et l'absence d'arrivée de précipités. Sinon, il aurait fallu retenir comme MFR un sel de Pu modélisé par du PuO_2F_2 dans les lois de dilution. Le volume critique s'en trouve diminué (13,7 L) mais n'aurait pas conduit à remettre en cause le mode de contrôle retenu (volume). En revanche, cela réduit l'épaisseur admissible de la lèchefrite. Il faudra vérifier que la présence de ces précipités ne modifie pas ou n'ajoute pas de situations incidentelles déjà identifiées.

Exercice 78 : cuve d'effluents et mode de contrôle de la criticité.

MFR pénalisant et non remis en cause. Du ^{239}Pu pur est très rare. Ceci présente une marge non quantifiable.

1. MdC par la masse : limite critique : 510 g de Pu.

Masse maximale en fonctionnement normal : $50\,000\text{ L} \times 10^{-3}\text{ gPu.L}^{-1}$
 $= 50\text{ g} \ll 510\text{ g}$

Moyen de prévention : mesure du volume transféré et de la concentration.
 Deux possibilités : comptabilité des entrées et des sorties (avec prise en compte des incertitudes de mesure) ou bien ajout des masses entrantes (avec prise en compte des incertitudes de mesure) jusqu'à atteindre la limite de 510 g (indépendamment des sorties de matière), puis vidange, nettoyage et remise à zéro de la masse de cette cuve.

En fonction des cas (toujours le même moyen de mesure et le même type de matière transféré par exemple), les incertitudes de mesures peuvent être « intégrées » à la limite de criticité (diminution de celle-ci), les masses ajoutées étant alors considérées sans incertitude.

Moyen de mesure fiable : double mesure de la concentration et du volume si nécessaire (dépend du procédé). Analyse de la représentativité de la mesure (brassage avant prélèvement des solutions à transférer, point de prélèvement judicieux).

Scénario incidentel : surchargement ou accumulation lente.

Surchargement : analyse au cas par cas des scénarios possibles (transfert inopiné, mauvaise mesure, etc.).

Accumulation : brassage (mais non obligatoire). Vidange régulière de la cuve pour inspection et « nettoyage ».

2. MdC par la concentration : limite $7\text{ gPu.L}^{-1} \ll$ valeur en fonctionnement normal.

Moyen de prévention : mesure fiable (double mesure) de la concentration avec prise en compte des incertitudes sur les mesures. Analyse de la représentativité de la mesure (brassage avant prélèvement des solutions à transférer, point de prélèvement judicieux).

Scénario incidentel : mauvaise mesure, précipitation, stratification.

Mauvaise mesure : à traiter avec le principe de double éventualité.

Précipitation : démonstration par la masse de la matière fissile.

Stratification : brassage (obligatoire). Vidange régulière de la cuve pour inspection et « nettoyage ».

3. Pas sensible aux mêmes situations incidentelles.

Pour la concentration, un seul paramètre à mesurer.

La masse est plus robuste car insensible au scénario de précipitation.

En pratique, il y a de fortes similitudes entre ces deux modes de contrôle pour ce type de configuration. Le choix dépendra en partie des unités de criticité qui suivent ou qui précèdent cette cuve. Peut également dépendre du type de matière (présence de matière fissile en suspension par exemple).