UE Géoressources – Licence 2

Uranium et ressources nucléaires

Corrigé – Du gisement au combustible, du réacteur aux déchets

Point de vigilance

Les calculs de ce TD sont volontairement simplifiés. Ils servent à fixer des ordres de grandeur et à relier géologie, cycle du combustible et physique nucléaire. Une ressource ou une réserve réelle nécessite des données géologiques, géostatistiques, minières, métallurgiques, économiques et réglementaires beaucoup plus détaillées.

1. Radioactivité et demi-vie

Éléments de correction

a) Définitions. La demi-vie $T_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés. L'activité est le nombre de désintégrations par unité de temps :

$$A = \lambda N.$$

Son unité SI est le **becquerel** : 1 Bq = 1 s^{-1}.

b) Après trois demi-vies. 90 a correspondent à trois demi-vies de 30 a. Il reste donc :

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8} = 0{,}125.$$

Il reste **12,5 %** de la quantité initiale.

c) Activité spécifique. Pour un même nombre de noyaux, $A = \lambda N$ avec $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$. Une demi-vie longue correspond donc à une constante radioactive faible et, à quantité comparable, à une activité plus faible.

2. Pourquoi Oklo a-t-il pu fonctionner ?

Éléments de correction

Pour remonter de $\Delta t = 2{,}0$ Ga dans le passé, on inverse la décroissance :

$$N(-\Delta t) = N(0)\, 2^{\Delta t / T_{1/2}}.$$

a) Pour ^{235}U :

$$2^{2.0/0.704} \simeq 7{,}16.$$

b) Pour ^{238}U :

$$2^{2.0/4.468} \simeq 1{,}36.$$

Le rapport isotopique actuel simplifié vaut :

$$R_0 = \frac{0{,}00711}{0{,}992745} \simeq 7{,}16 \times 10^{-3}.$$

Il y a 2,0 Ga :

$$R = R_0\, 2^{2.0(1/0.704 - 1/4.468)} \simeq 0{,}0376.$$

La fraction de ^{235}U vaut alors approximativement :

$$x_{235} = \frac{R}{1+R} \simeq 0{,}0363,$$

soit **environ 3,6 % de ^{235}U**.

Cette proportion est environ cinq fois plus élevée que la valeur actuelle de 0,711 %. En présence d'eau jouant le rôle de modérateur, d'une concentration suffisante en uranium et d'une géométrie permettant de limiter les fuites neutroniques, une réaction en chaîne naturelle pouvait donc devenir possible. Le cas d'Oklo illustre directement l'effet de la différence de demi-vie entre ^{235}U et ^{238}U.

3. Bilan de matière lors de l'enrichissement

Éléments de correction

Les deux bilans sont :

$$F = P + W$$

et

$$x_F F = x_P P + x_W W.$$

En remplaçant $W = F - P$:

$$F(x_F - x_W) = P(x_P - x_W),$$

d'où

$$F = P\,\frac{x_P - x_W}{x_F - x_W}.$$

Avec $P = 24\,\text{tU}$, $x_P = 0{,}0400$, $x_F = 0{,}00711$ et $x_W = 0{,}0025$:

$$F = 24 \times \frac{0{,}0400 - 0{,}0025}{0{,}00711 - 0{,}0025} \simeq 195{,}2\,\text{tU}.$$

Donc :

$$W = F - P \simeq 171{,}2\,\text{tU}.$$

Masses de ^{235}U :

$$m_{235,F} = 195{,}2 \times 0{,}00711 \simeq 1{,}388\,\text{t},$$

$$m_{235,P} = 24 \times 0{,}0400 = 0{,}960\,\text{t},$$

$$m_{235,W} = 171{,}2 \times 0{,}0025 \simeq 0{,}428\,\text{t}.$$

On vérifie : $0{,}960 + 0{,}428 \simeq 1{,}388$ t.
L'enrichissement **ne crée pas de** ^{235}U : il sépare partiellement les isotopes et concentre le ^{235}U dans une fraction du flux, au prix d'un flux appauvri.

4. Puissance, énergie et facteur de charge

Éléments de correction

a) Énergie électrique annuelle.

$$E_e = P_e\, f\, t = 1\,300\,\text{MW} \times 0{,}75 \times 8\,760\,\text{h}.$$

Ainsi :

$$E_e = 8{,}541 \times 10^6\,\text{MW h} = \boxed{8{,}54\,\text{TW h}}.$$

b) Énergie thermique. Avec $\eta = 0{,}33$:

$$E_{th} = \frac{E_e}{\eta} \simeq \frac{8{,}541}{0{,}33} \simeq \boxed{25{,}9\,\text{TW h}}.$$

En joules :

$$E_{th} = 25{,}9 \times 3{,}6 \times 10^{15} \simeq 9{,}32 \times 10^{16}\ \text{J}.$$

c) Énergie d'une fission.

$$E_f = 200 \times 10^6 \times 1{,}602 \times 10^{-19} \simeq \boxed{3{,}20 \times 10^{-11}\ \text{J}}.$$

d) Nombre de fissions.

$$N_f = \frac{E_{th}}{E_f} \simeq \frac{9{,}32 \times 10^{16}}{3{,}20 \times 10^{-11}} \simeq \boxed{2{,}91 \times 10^{27}}.$$

e) Masse équivalente de ^{235}U. Le nombre de moles vaut :

$$n = \frac{N_f}{N_A} \simeq \frac{2{,}91 \times 10^{27}}{6{,}022 \times 10^{23}} \simeq 4{,}83 \times 10^3\ \text{mol}.$$

La masse correspondante est :

$$m = n \times 235\,\text{g/mol} \simeq 1{,}135 \times 10^6\ \text{g} \simeq \boxed{1{,}14\,\text{t}}.$$

f) Interprétation. Cette masse est une masse *équivalente fissile* dans un modèle où toutes les fissions seraient celles de ^{235}U. Le combustible réel contient surtout ^{238}U, une partie du ^{238}U est convertie en noyaux fissiles, notamment du plutonium, tout le combustible n'est pas fissionné et la gestion du coeur se fait par rechargements partiels. Il ne faut donc pas confondre cette masse avec les dizaines de tonnes de combustible présentes ou renouvelées.

5. Reconstituer la chronologie du gisement

Éléments de correction

Une chronologie cohérente est la suivante :

1. mise en place et différenciation du leucogranite, qui concentre l'uranium dans la croûte supérieure ;
2. fracturation, cisaillement et circulation de fluides au sommet et autour du pluton ;
3. altération et lixiviation du granite par des fluides oxydants ;
4. passage de l'uranium en solution sous forme oxydée U^{6+} et transport dans les fractures ;
5. arrivée des fluides au contact d'un milieu réducteur, notamment les *black shales* riches en matière organique ;
6. réduction en U^{4+}, perte de solubilité et précipitation d'oxydes d'uranium.

Le triptyque métallogénique est donc :

— **source** : leucogranite enrichi en uranium ;

— **transport** : fluides hydrothermaux ou météoriques oxydants circulant dans un réseau de fractures ;

— **piège** : combinaison d'un contrôle structural et d'une barrière d'oxydoréduction au contact des niveaux réducteurs.

La tectonique fournit la *plomberie* : fractures, zones de cisaillement et discontinuités contrôlent l'accès des fluides à la source puis leur focalisation vers le piège. Les *black shales* jouent un rôle chimique en imposant une réduction de l'uranium et peuvent aussi coïncider avec une interface lithologique ou structurale qui canalise les fluides.

Pour tester ce modèle, on peut notamment rechercher : halos d'altération, minéraux d'uranium et leur paragenèse, orientations des veines et fractures, géochimie U–Th–Pb, états d'oxydation, isotopes de l'oxygène ou des fluides, relation géométrique entre minéralisation et niveaux carbonés.

6. Teneur, tonnage et uranium contenu

Éléments de correction

Le volume de la lentille vaut :

$$V = 250 \times 120 \times 6 = \boxed{180\,000\,\text{m}^3}.$$

Avec $\rho = 2{,}60\,\text{t/m}^3$:

$$M_{minerai} = V\rho = 180000 \times 2{,}60 = \boxed{468\,000\,\text{t}}.$$

La teneur 0,18 % correspond à une fraction massique de 0,0018. La masse d'uranium contenue vaut :

$$M_U = 468000 \times 0{,}0018 = \boxed{842{,}4\,\text{t}}.$$

Après récupération minière de 90 % :

$$842{,}4 \times 0{,}90 = 758{,}2\,\text{t}.$$

Après récupération métallurgique de 85 % :

$$758{,}2 \times 0{,}85 \simeq \boxed{644\,\text{t}}.$$

Ce calcul ne suffit pas à définir une réserve, car il suppose notamment une géométrie parfaitement connue, une teneur homogène, l'absence de dilution, une continuité de la minéralisation et des récupérations constantes. Il ne prend pas en compte les coûts, la profondeur, la géotechnique, la méthode d'exploitation, le prix de l'uranium, les contraintes environnementales, les infrastructures ni les incertitudes géostatistiques.

7. Ressource ou réserve ?

Éléments de correction

Quantité d'uranium par bloc :

Bloc	Minerai (t)	Teneur U	Uranium contenu (tU)
A	180000	0,32 %	576
B	240000	0,18 %	432
C	300000	0,09 %	270
D	120000	0,45 %	540
Total	840000	–	1818

La **ressource géologique simplifiée** contient donc $\boxed{1\,818\,\text{tU}}$.
Avec une teneur de coupure de 0,10 %, les blocs A, B et D sont retenus ; le bloc C est écarté dans ce scénario économique. Ils contiennent :

$$576 + 432 + 540 = \boxed{1\,548\,\text{tU}}.$$

Après 90 % de récupération minière :

$$1548 \times 0{,}90 = \boxed{1\,393\,\text{tU}}.$$

C'est ici notre *réserve minière simplifiée* en uranium contenu.
Après 85 % de récupération métallurgique supplémentaire :

$$1393 \times 0{,}85 \simeq \boxed{1\,184\,\text{tU}}.$$

La frontière entre ressource et réserve est économique et technique : une hausse du prix de l'uranium, une baisse des coûts ou une amélioration des procédés peut rendre exploitable un minerai plus pauvre ; l'inverse peut retirer du minerai de la réserve. La teneur de coupure n'est donc pas une constante géologique.

8. Interpréter volume et activité des déchets

Éléments de correction

Le volume total du document est :

$$778218 + 108219 + 44559 + 43359 + 1639 = \boxed{975\,994\,\text{m}^3}.$$

La catégorie hautement radioactive à vie longue représente :

$$\frac{1639}{975994} \times 100 \simeq \boxed{0{,}168\,\%}$$

du volume total, alors qu'elle porte **96,05 % de la radioactivité totale**.
Les deux catégories à vie longue les plus actives, moyennement et hautement radioactives, représentent ensemble :

$$43359 + 1639 = 44\,998\,\text{m}^3,$$

soit :

$$\frac{44998}{975994} \times 100 \simeq \boxed{4{,}61\,\%}$$

du volume, mais :

$$3{,}87 + 96{,}05 = \boxed{99{,}92\,\%}$$

de la radioactivité totale.
La comparaison montre que **volume et activité ne sont pas proportionnels**. La stratégie de gestion dépend aussi de la demi-vie des radionucléides, de la puissance thermique résiduelle, du type de rayonnement, de la radiotoxicité, de la mobilité géochimique, de la forme physico-chimique du déchet et du comportement des barrières de confinement.
Parmi les paramètres à considérer pour un confinement : activité initiale, évolution temporelle de l'activité, chaleur dégagée, durée de vie des radionucléides, solubilité et mobilité, résistance de la matrice de conditionnement, propriétés de la roche hôte, circulation des eaux souterraines et stabilité mécanique à long terme.

9. QCM de synthèse

Éléments de correction

a) **Vrai.** 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

b) **Faux.** ^{235}U est fissile par neutron thermique ; ^{238}U est surtout un noyau fertile, pouvant conduire à la production de noyaux fissiles après capture neutronique et transformations radioactives.

c) **Vrai.** L'enrichissement effectue une séparation isotopique ; il redistribue le ^{235}U entre produit enrichi et résidus appauvris.

d) **Vrai.** Le passage d'un état oxydé soluble à un état réduit peu soluble constitue un mécanisme classique de précipitation de l'uranium.

e) **Faux.** Les déchets hautement radioactifs à vie longue du document ne représentent qu'environ 0,17 % du volume mais 96,05 % de la radioactivité.

f) **Vrai.** Pour une période donnée, $f = E_{\text{réelle}}/(P_{\text{nominale}}\,\Delta t)$.

10. Exemple de conclusion de synthèse

Éléments de correction

L'uranium constitue une géoressource dont l'utilisation résulte d'une chaîne continue allant de processus géologiques très anciens à une industrie de haute technologie. La différenciation magmatique, les circulations de fluides, les conditions d'oxydoréduction et les structures tectoniques contrôlent la formation des gisements. L'exploitation transforme ensuite une ressource géologique en minerai, puis en concentré, avant conversion, enrichissement et fabrication du combustible. Dans le réacteur, la fission de noyaux fissiles et la production de nouveaux noyaux fissiles à partir de noyaux fertiles permettent de libérer une énergie considérable avec une faible masse de matière. En contrepartie, l'ensemble du cycle produit des matières radioactives dont la gestion dépend davantage de leur activité, de leur durée de vie et de leur mobilité que de leur seul volume. L'enjeu est donc à la fois géologique, industriel, énergétique et temporel : il faut gérer sur le long terme des produits issus d'une ressource concentrée par des processus naturels sur des centaines de millions à plusieurs milliards d'années.