UE Géoressources – Licence 2

Uranium et ressources nucléaires

Du gisement au combustible, du réacteur aux déchets

Compétences travaillées

À l'issue du TD, vous devrez être capable de :

— relier les propriétés isotopiques de l'uranium à la radioactivité, à la fission et au cas d'Oklo ;

— reconstituer un système métallogénique uranifère selon le triptyque *source–transport–piège* ;

— calculer une teneur, un tonnage et une quantité d'uranium contenue, puis distinguer ressource et réserve ;

— établir un bilan de matière simplifié lors de l'enrichissement de l'uranium ;

— relier puissance, facteur de charge et énergie produite par une centrale ;

— interpréter conjointement le volume, l'activité et la durée de vie des déchets radioactifs.

Données et conventions

Sauf indication contraire, on utilisera les relations et données suivantes :

— loi de décroissance : $N(t) = N_0\, 2^{-t/T_{1/2}}$ et $A = \lambda N$, avec $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$;

— abondances isotopiques actuelles simplifiées de l'uranium naturel : $^{235}\mathrm{U} = 0{,}711\,\%$ et $^{238}\mathrm{U} = 99{,}2745\,\%$;

— demi-vies : $T_{1/2}(^{235}\mathrm{U}) = 0{,}704$ Ga et $T_{1/2}(^{238}\mathrm{U}) = 4{,}468$ Ga ;

— énergie moyenne libérée par une fission : $E_f \simeq 200$ MeV ;

— 1 eV $= 1{,}602 \times 10^{-19}$ J, $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1}, 1 an $= 8760$ h ;

— pour l'enrichissement : bilan total $F = P + W$ et bilan en $^{235}\mathrm{U}$, $x_F F = x_P P + x_W W$, où F est l'alimentation, P le produit enrichi et W les résidus appauvris.

Les valeurs numériques fournies dans les exercices sont des **données pédagogiques simplifiées** destinées aux calculs d'ordre de grandeur.

A. Radioactivité, isotopes et réacteurs naturels

1. Radioactivité et demi-vie.

a) Définissez la demi-vie radioactive et l'activité d'un échantillon. Quelle est l'unité SI de l'activité ?

b) Un radionucléide possède une demi-vie de 30 a. Quelle fraction de la quantité initiale reste-t-il après 90 a ?

c) Expliquez pourquoi une longue demi-vie signifie généralement une faible activité spécifique, toutes choses égales par ailleurs.

2. Pourquoi Oklo a-t-il pu fonctionner ? Les réacteurs nucléaires naturels d'Oklo ont fonctionné il y a environ 2,0 Ga. On cherche à estimer la proportion de $^{235}\mathrm{U}$ à cette époque.

a) Calculez le facteur par lequel il faut remonter l'abondance actuelle de $^{235}\mathrm{U}$ pour retrouver sa quantité il y a 2,0 Ga.

b) Faites de même pour $^{238}\mathrm{U}$.

c) À partir du rapport isotopique actuel $R_0 = N_{235}/N_{238}$, calculez le rapport R il y a 2,0 Ga, puis la fraction isotopique de $^{235}\mathrm{U}$ correspondante.

d) Comparez cette valeur aux 0,711 % actuels et expliquez qualitativement pourquoi les conditions étaient alors plus favorables à une réaction en chaîne naturelle, en présence d'un modérateur et d'une géométrie favorable.

B. Cycle du combustible, enrichissement et production électrique

3. Bilan de matière lors de l'enrichissement. Une centrale reçoit chaque année $P = 24\,\mathrm{tU}$ d'uranium enrichi à $x_P = 4{,}00\,\%$ en ^{235}U. L'uranium naturel contient $x_F = 0{,}711\,\%$ de ^{235}U et les résidus appauvris sortent à $x_W = 0{,}25\,\%$.

a) Écrivez les deux bilans de matière permettant de relier F, P et W.

b) Calculez la masse d'uranium naturel F nécessaire.

c) Calculez la masse de résidus appauvris W.

d) Calculez les masses de ^{235}U contenues dans l'alimentation, le produit et les résidus. Vérifiez le bilan isotopique.

e) Expliquez en une phrase ce que fait physiquement l'enrichissement : crée-t-il de l'uranium fissile ?

4. Puissance, énergie et facteur de charge. On considère un réacteur de puissance électrique nominale $P_e = 1\,300\,\mathrm{MW}$, fonctionnant avec un facteur de charge annuel de 75 %.

a) Calculez l'énergie électrique produite en une année, en TW h.

b) Pour un rendement thermodynamique global de 33 %, estimez l'énergie thermique libérée dans le coeur sur l'année.

c) Convertissez 200 MeV en joules par fission.

d) Estimez le nombre de fissions nécessaires pour fournir l'énergie thermique annuelle.

e) En assimilant, pour l'ordre de grandeur, chaque fission à celle d'un noyau de ^{235}U, calculez la masse de ^{235}U équivalente consommée.

f) Pourquoi cette masse ne doit-elle pas être confondue avec la masse totale de combustible chargée dans le réacteur ?

C. Géologie d'un gisement d'uranium

Document 1 – Modèle simplifié d'un système uranifère de type Pen Ar Ran

On retient les observations suivantes :

— un leucogranite constitue une source primaire d'uranium, concentré lors de la différenciation magmatique ;

— une altération hydrothermale et météorique affecte le sommet du pluton et les zones fracturées ;

— dans un milieu oxydant, l'uranium sous forme U^{6+} est relativement soluble et peut être transporté par les fluides ;

— les circulations sont guidées par des fractures et des zones de cisaillement ;

— au contact de niveaux riches en matière organique de type *black shales*, le milieu devient réducteur ;

— la réduction de U^{6+} en U^{4+}, beaucoup moins soluble, provoque la précipitation d'oxydes d'uranium.

5. Reconstituer la chronologie du gisement.

a) Classez les six étapes du document 1 dans un ordre chronologique cohérent.

b) Identifiez explicitement la **source**, le **vecteur de transport** et le **piège**.

c) Quel rôle joue la tectonique cassante ou ductile-cassante dans ce système ?

d) Pourquoi le contact avec les *black shales* constitue-t-il à la fois un piège chimique et, localement, un piège structural ?

e) Indiquez deux observations de terrain ou analyses qui permettraient de tester ce modèle.

6. Teneur, tonnage et uranium contenu. Une lentille minéralisée simplifiée est assimilée à un parallélépipède de longueur 250 m, largeur 120 m et épaisseur moyenne 6 m. La masse volumique moyenne du minerai est 2,60 t/m^3 et sa teneur moyenne est de 0,18 % U.

a) Calculez le volume de minerai.

b) Calculez le tonnage de minerai.

c) Calculez la masse d'uranium contenue.

d) En supposant 90 % de récupération minière et 85 % de récupération métallurgique, estimez la masse d'uranium finalement récupérable.

e) Citez au moins trois raisons pour lesquelles ce calcul géométrique ne suffit pas à définir une réserve au sens économique.

7. Ressource ou réserve ? On dispose des quatre blocs suivants. Pour l'exercice, on retient une teneur de coupure simplifiée de 0,10 % U.

Bloc	Tonnage de minerai	Teneur moyenne en U
A	180 000 t	0,32 %
B	240 000 t	0,18 %
C	300 000 t	0,09 %
D	120 000 t	0,45 %

a) Calculez la quantité totale d'uranium géologiquement contenue dans les quatre blocs.

b) Quels blocs sont retenus au-dessus de la teneur de coupure ?

c) Calculez la quantité d'uranium contenue dans ces blocs.

d) Avec 90 % de récupération minière, estimez la *réserve minière simplifiée* en uranium contenu ; avec en plus 85 % de récupération métallurgique, estimez la quantité d'uranium récupérable.

e) Expliquez pourquoi une variation du prix de l'uranium ou des coûts d'exploitation peut déplacer la frontière entre ressource et réserve.

D. Déchets radioactifs et synthèse du cycle

Document 2 – Volume stocké et part de la radioactivité totale

Les valeurs ci-dessous reprennent les ordres de grandeur présentés dans le cours.

Catégorie	Volume stocké en France (m^3)	Part de la radioactivité totale
Faiblement radioactifs à courte vie	778218	0,07 %
Très faiblement radioactifs à courte vie	108219	0,00 %
Très faiblement radioactifs à vie longue	44559	0,01 %
Moyennement radioactifs à vie longue	43359	3,87 %
Hautement radioactifs à vie longue	1639	96,05 %

8. Interpréter volume et activité des déchets.

a) Calculez le volume total représenté dans le document 2.

b) Quelle fraction du volume total représente la catégorie hautement radioactive à vie longue ?

c) Additionnez les volumes et les parts de radioactivité des deux catégories à vie longue les plus actives (moyennement + hautement radioactives). Que montre cette comparaison ?

d) Pourquoi le volume d'un déchet ne constitue-t-il pas, à lui seul, une mesure de sa dangerosité ou de la difficulté de sa gestion ?

e) Citez quatre paramètres pertinents pour définir une stratégie de confinement.

9. QCM de synthèse. Pour chaque proposition, indiquez *vrai* ou *faux* et justifiez brièvement.

a) Un becquerel correspond à une désintégration radioactive par seconde.

b) ^{238}U est un noyau fissile par neutron thermique au même titre que ^{235}U.

c) L'enrichissement augmente la proportion de ^{235}U mais ne crée pas de nouveaux atomes d'uranium.

d) Un milieu réducteur peut favoriser la précipitation de l'uranium transporté sous forme oxydée.

e) Une catégorie de déchets représentant moins de 1 % du volume total représente nécessairement moins de 1 % de la radioactivité totale.

f) Le facteur de charge relie l'énergie réellement produite à celle qui aurait été produite à puissance nominale pendant toute la période.

Question de synthèse

En dix lignes maximum, montrez que l'énergie nucléaire constitue une chaîne complète de géoressources : *formation et concentration naturelle de l'uranium – exploration et extraction – conversion et enrichissement – fabrication du combustible – fission dans le réacteur – gestion des matières et déchets*. Votre conclusion devra faire apparaître au moins un enjeu géologique, un enjeu industriel et un enjeu de long terme.