UE Géoressources – Licence 2 – R. Thiéry

Métaux : du gisement à l'impact minier

Usages, métallogénie, exploitation, traitement et drainage minier acide

Compétences travaillées

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

- relier les principaux métaux à leurs propriétés et à leurs usages ;
- distinguer minerai, minéral utile, gangue, teneur, facteur de concentration, ressource et réserve ;
- associer de grands types de gisements à leurs processus métallogéniques ;
- raisonner sur le choix entre mine à ciel ouvert et exploitation souterraine ;
- établir un bilan simple de métal contenu et de récupération métallurgique ;
- expliquer la formation d'un drainage minier acide dans un terril ou une mine ;
- calculer un ordre de grandeur de neutralisation d'une eau ou d'un déchet minier acide.

Données et conventions

Les exercices sont volontairement simplifiés. Sauf indication contraire :

- $1\,\% = 10\,\mathrm{kg}$ de métal par tonne de minerai ; $1\ \mathrm{ppm} = 1\,\mathrm{g/t}$;
- métal contenu = tonnage de minerai × teneur ; métal récupéré = métal contenu × récupération ;
- pour le drainage minier acide, on utilisera la réaction globale simplifiée :

$$\mathrm{FeS_2} + \frac{15}{4}\mathrm{O_2} + \frac{7}{2}\mathrm{H_2O} \rightarrow \mathrm{Fe(OH)_3} + 2\mathrm{SO_4^{2-}} + 4\mathrm{H^+};$$

- neutralisation par la calcite : $\mathrm{CaCO_3} + 2\mathrm{H^+} \rightarrow \mathrm{Ca^{2+}} + \mathrm{CO_2} + \mathrm{H_2O}$;
- masses molaires : $M(\mathrm{FeS_2}) = 120\,\mathrm{g/mol}$; $M(\mathrm{CaCO_3}) = 100\,\mathrm{g/mol}$.

A. Culture générale : métaux, propriétés et applications

1. À chaque métal son usage. Associez chaque métal de la colonne de gauche à une application caractéristique de la colonne de droite. Pour cinq associations de votre choix, indiquez la propriété recherchée.

Métal		Application	
Cuivre	A	**1**	Aimants permanents très puissants
Aluminium	B	**2**	Câbles électriques et électronique
Zinc	C	**3**	Galvanisation de l'acier
Lithium	D	**4**	Outils de coupe et carbures très durs
Néodyme	E	**5**	Batteries Li-ion
Platine	F	**6**	Catalyse automobile et chimique
Tungstène	G	**7**	Structures légères, aéronautique, lignes électriques
Étain	H	**8**	Brasures et étamage
Titane	I	**9**	Aéronautique et implants biomédicaux
Cobalt	J	**10**	Superalliages haute température et certaines cathodes
Plomb	K	**11**	Batteries au plomb et écrans contre les rayonnements
Nickel	L	**12**	Aciers inoxydables, alliages et batteries

a) Parmi ces métaux, citez deux métaux de base, un métal précieux et trois métaux souvent qualifiés de critiques dans les chaînes technologiques modernes.

b) Pourquoi un métal « critique » n'est-il pas nécessairement rare dans la croûte terrestre ?

c) Donnez un exemple où le recyclage peut réduire la dépendance à l'extraction primaire, et une limite possible du recyclage.

B. Teneur, facteur de concentration et métal contenu

2. Un porphyre cuprifère simplifié. Un gisement contient 42 Mt de minerai à une teneur moyenne de 0,85 % Cu. La teneur moyenne de la croûte continentale en cuivre sera prise égale à 60 mg/kg. La récupération globale mine + usine est de 88 %.

a) Convertissez 0,85 % en kg/t puis en ppm.

b) Calculez le facteur de concentration par rapport à la croûte moyenne.

c) Calculez la masse de cuivre contenue dans le gisement, puis la masse théoriquement récupérée.

d) Le bloc périphérique contient 8 Mt à 0,22 % Cu. Si la teneur de coupure est 0,30 % Cu, ce bloc est-il compté comme minerai exploitable dans ce modèle ? Expliquez ce que représente une teneur de coupure.

e) Pourquoi une ressource géologique n'est-elle pas automatiquement une réserve minière ?

C. Métallogénie : reconnaître les processus de concentration

3. Quel gisement, quel processus ? Pour chacun des huit cas ci-dessous, proposez le type de gisement le plus probable et les métaux ou substances typiquement recherchés.

Cas	Indices géologiques	Type de gisement / substances
1	Intrusion mafique stratifiée avec niveaux riches en chromite et sulfures	
2	Stockwork de veinules autour d'une intrusion porphyrique, altérations hydrothermales zonées	
3	Lentille de sulfures massifs au sommet d'une série volcanique sous-marine, stockwork sous-jacent	
4	Dolomies de plate-forme recoupées par des fluides de bassin salins, Pb-Zn sans lien magmatique évident	
5	Horizons ferrifères laminés très anciens, alternances riches en oxydes de fer et silice	
6	Profil d'altération tropicale très épais développé sur roche alumineuse ou ultramafique	
7	Sables et graviers de rivière où se concentrent les minéraux les plus denses	
8	Sulfures Ni-Cu associés à une grande intrusion mafique et à des conduits magmatiques	

a) Classez les cas 1 à 8 selon le processus dominant : magmatique, hydrothermal, sédimentaire, supergène ou mécanique.

b) Pour le cas 2, expliquez pourquoi la circulation de fluides peut concentrer des métaux initialement dispersés dans un grand volume de roche.

c) Pour le cas 3, indiquez le rôle de l'eau de mer, de la chaleur et des fractures dans la formation d'un VMS.

d) Pour le cas 7, quelle propriété physique permet la concentration d'or, de cassitérite ou de certains minéraux lourds ?

D. Exploitation minière et traitement du minerai

4. Ciel ouvert ou souterrain ? Deux corps minéralisés ont la même teneur et la même valeur par tonne de minerai.

	Gisement A	Gisement B
Profondeur du toit	20 m	550 m
Épaisseur minéralisée	80 m	12 m
Géométrie	large et subhorizontale	filon subvertical
Roche encaissante	modérément compétente	très compétente
Rapport stérile/minerai estimé en fosse	1,8	9,5

a) Quel mode d'exploitation paraît le plus logique pour A ? pour B ? Justifiez.

b) Définissez le rapport stérile/minerai (*stripping ratio*). Pourquoi tend-il souvent à augmenter quand une fosse s'approfondit ?

c) Citez trois contraintes ou impacts propres à une mine à ciel ouvert et trois à une mine souterraine.

d) Dans une galerie, pourquoi la stabilité mécanique et la ventilation deviennent-elles des paramètres essentiels ?

5. Bilan matière d'une usine de concentration. Une usine traite 1 000 t de minerai contenant 0,60 % Cu et 1,20 % Zn. Après broyage et flottation :

— 90 % du cuivre est récupéré dans un concentré à 25 % Cu ;

— 85 % du zinc est récupéré dans un concentré à 50 % Zn.

a) Calculez les masses initiales de Cu et Zn contenues dans le minerai.

b) Calculez les masses de Cu et Zn récupérées.

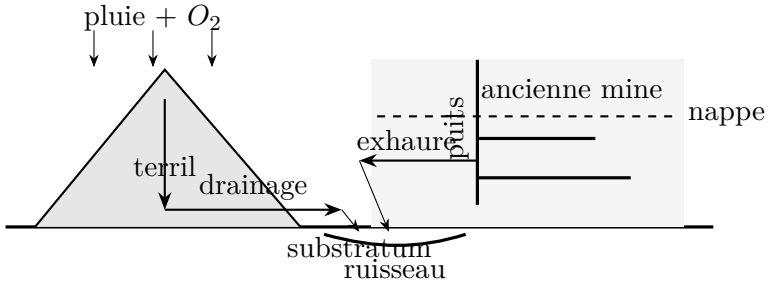
c) Déduisez la masse de concentré de cuivre et la masse de concentré de zinc produites.

d) Estimez la masse totale envoyée vers les résidus, en négligeant les variations liées à l'eau de procédé.

e) Pourquoi les résidus peuvent-ils représenter un enjeu environnemental même lorsque la récupération métallurgique est bonne ?

E. Drainage minier acide : terrils et eaux d'exhaure

6. Pourquoi une mine peut-elle produire de l'eau acide ? Le schéma ci-dessous représente deux situations classiques.



a) Identifiez les deux sources possibles de drainage minier acide représentées.

b) Pourquoi la présence simultanée de sulfures, d'eau et d'oxygène est-elle déterminante ?

c) Que devient l'acidité produite lorsque l'eau traverse des roches carbonatées ? Et dans une encaissante pauvre en carbonates ?

d) Expliquez pourquoi une ancienne mine peut continuer à polluer après l'arrêt de l'exploitation et du pompage d'exhaure.

7. Potentiel acidifiant d'un terril. Un terril contient 800 000 t de stériles avec 1,20 % de pyrite FeS_2. On suppose, pour donner un ordre de grandeur maximal, que toute la pyrite s'oxyde selon la réaction fournie en début de sujet.

a) Calculez la masse totale de pyrite contenue dans le terril.

b) Combien de moles de H^+ sont produites par mole de pyrite ? Combien de moles de calcite sont nécessaires pour les neutraliser ?

c) Montrez que la masse théorique de calcite nécessaire vaut environ 1,67 fois la masse de pyrite oxydée.

d) Calculez la masse théorique de calcite nécessaire pour le terril.

e) Si le calcaire utilisé contient 90 % de $CaCO_3$ et que l'efficacité réelle de neutralisation n'est que de 70 %, quelle masse de calcaire faut-il prévoir ?

f) Pourquoi ce calcul ne suffit-il pas à concevoir une stratégie réelle de gestion du terril ?

8. Eaux d'exhaure et traitement. Une mine pompe en continu 35 m^3/h d'eau d'exhaure. L'acidité totale mesurée est de 650 mg/L exprimée en équivalent $CaCO_3$. Les analyses donnent : pH = 2,9, sulfates = 1 450 mg/L, Fe = 180 mg/L, Zn = 12 mg/L.

a) Calculez le volume d'eau pompé par jour.

b) Calculez la masse quotidienne d'acidité à neutraliser, en kg équivalent $CaCO_3$ par jour.

c) Quelle masse annuelle cela représente-t-il ?

d) Si le réactif calcaire a une pureté de 90 %, estimez la masse minimale de réactif nécessaire par jour, sans appliquer ici de facteur d'efficacité supplémentaire.

e) Pourquoi la simple remontée du pH ne suffit-elle pas toujours avant rejet ? Que faut-il aussi faire des métaux dissous et des boues formées ?

f) Proposez trois moyens de prévention ou de traitement, en distinguant si possible actions à la source et traitement de l'eau.

Question de synthèse

Un gisement métallique n'est pas seulement une concentration géologique. En dix lignes maximum, expliquez quelles conditions doivent être réunies pour qu'une concentration métallique devienne une **réserve exploitable de manière acceptable**. Votre réponse devra faire intervenir au moins : teneur et tonnage, géométrie du gisement, technique minière, récupération métallurgique, prix/coûts, déchets, eau et réhabilitation.