UE Géoressources – Licence 2

Métaux : du gisement à l'impact minier

Corrigé – usages, métallogénie, exploitation et drainage minier acide

Point de vigilance

Les réponses proposées constituent un corrigé de niveau L2. Les classifications métallogéniques sont des modèles : un gisement réel peut combiner plusieurs processus et présenter des transitions. De même, les calculs de teneur, de récupération et de neutralisation sont des ordres de grandeur et non des études de faisabilité.

1. Culture générale : métaux, propriétés et applications

Éléments de correction

Associations :

Métal	Application	Propriété ou raison principale
Cuivre	2	Très bonne conductivité électrique, ductilité.
Aluminium	7	Faible densité, bonne conductivité, résistance à la corrosion par passivation.
Zinc	3	Protection sacrificielle de l'acier contre la corrosion.
Lithium	5	Faible masse atomique et potentiel électrochimique favorable aux batteries.
Néodyme	1	Aimants permanents Nd-Fe-B à forte énergie magnétique.
Platine	6	Excellentes propriétés catalytiques et résistance chimique.
Tungstène	4	Très haute température de fusion ; carbures très durs.
Étain	8	Bas point de fusion de certains alliages, mouillabilité ; protection de surface.
Titane	9	Rapport résistance/masse élevé, résistance à la corrosion, biocompatibilité.
Cobalt	10	Tenue à haute température dans les superalliages ; rôle dans certaines cathodes.
Plomb	11	Electrochimie des accumulateurs ; forte densité utile pour l'atténuation des rayonnements.
Nickel	12	Résistance à la corrosion, alliages et électrochimie des batteries.

Exemples de **métaux de base** : Cu, Zn, Ni, Pb, Sn. Le **platine** est un métal précieux. Li, Co, Nd, W ou certaines terres rares sont des exemples de métaux pouvant être considérés comme critiques selon les usages, la concentration de la production et les possibilités de substitution.
Un métal critique n'est pas nécessairement géologiquement rare. La criticité dépend aussi de la croissance de la demande, du petit nombre de producteurs, du raffinage, des risques géopolitiques, des coproductions, de la substituabilité et du recyclage. Le recyclage du Cu, de l'Al, du Pb ou de certains métaux de batteries réduit la demande primaire. Ses limites sont notamment la dispersion des métaux dans les produits, les pertes de collecte, les mélanges complexes, la consommation d'énergie et le fait qu'une demande en croissance rapide ne peut pas être couverte uniquement par les stocks déjà en circulation.

2. Teneur, facteur de concentration et métal contenu

Éléments de correction

a) Conversion de la teneur
Une tonne contient 1 000 kg. Une teneur de 0,85 % correspond à :

$$0.0085 \times 1000 = \boxed{8{,}5\,\text{kg/t}}.$$

Or 1 g/t = 1 ppm, donc :

$$8{,}5\,\text{kg/t} = 8\,500\,\text{g/t} = \boxed{8500\ \text{ppm}}.$$

b) Facteur de concentration
La teneur crustale donnée vaut 60 mg/kg = 60 ppm. Donc :

$$F = \frac{8500}{60} \simeq \boxed{142}.$$

c) Métal contenu et récupéré

$$M_{Cu} = 42 \times 10^6 \times 0.0085 = \boxed{357\,000\,\text{t } de\ Cu}.$$

Avec 88 % de récupération :

$$M_{rec} = 357000 \times 0.88 = \boxed{314\,160\,\text{t } de\ Cu}.$$

d) Teneur de coupure
Le bloc à 0,22 % Cu est sous la coupure de 0,30 % : dans ce modèle, il n'est pas classé comme minerai exploitable. La teneur de coupure est la teneur minimale à partir de laquelle il devient économiquement préférable de traiter le matériau plutôt que de l'écarter comme stérile ou minerai marginal. Elle dépend des prix, coûts, récupérations, géométrie, dilution, contraintes environnementales et stratégie de mine.

e) Ressource versus réserve
Une ressource décrit une concentration géologique estimée avec un certain degré de confiance. Pour devenir une réserve, une partie de cette ressource doit être démontrée comme exploitable en tenant compte de facteurs techniques, miniers, métallurgiques, économiques, juridiques, environnementaux et sociaux.

3. Métallogénie : reconnaître les processus de concentration

Éléments de correction

Cas	Type de gisement	Processus dominant	Substances typiques
1	Intrusion mafique stratifiée (type Bushveld)	magmatique	Cr, PGE, V, parfois Ni-Cu
2	Porphyre cuprifère	hydrothermal magmatique	Cu, Mo, Au
3	Sulfures massifs volcanogènes (VMS)	hydrothermal sous-marin	Cu, Zn, Pb, Ag, Au
4	MVT	hydrothermal de bassin	Pb, Zn, parfois F-Ba
5	Formation de fer rubané (BIF)	sédimentaire / chimique	Fe
6	Latérite / bauxite	supergène	Al ; ou Ni-Co sur ultramafites
7	Placer	mécanique	Au, cassitérite, diamant, minéraux lourds
8	Sulfures magmatiques Ni-Cu-PGE (type Norilsk/-Sudbury)	magmatique	Ni, Cu, Co, PGE

Dans un porphyre, un grand volume de fluides chauds circule dans un réseau de fractures. Les métaux peuvent être lessivés du magma et/ou de l'encaissant, transportés sous forme de complexes, puis précipiter lorsque température, pression, pH, état redox ou composition du fluide changent. Une faible teneur dans un très grand volume peut ainsi devenir une minéralisation exploitable.
Dans un VMS, l'eau de mer pénètre dans la croûte volcanique fracturée, se réchauffe au voisinage d'une source magmatique, réagit avec les roches et se charge en métaux. Le fluide remonte par les fractures. Au contact de l'eau de mer froide, les sulfures précipitent sur ou sous le plancher océanique, tandis qu'un stockwork se développe sous le corps massif.
Dans un placer, la concentration repose surtout sur une différence de comportement hydraulique liée à la **densité**, à la taille, à la forme et à la résistance mécanique des grains. Les minéraux lourds se concentrent dans les zones de tri hydraulique.

4. Ciel ouvert ou souterrain ?

Éléments de correction

Le **gisement A** est proche de la surface, épais et étendu : une exploitation à **ciel ouvert** est a priori logique. Le rapport stérile/minerai de 1,8 reste modéré dans ce cas simplifié.
Le **gisement B** est profond, mince et subvertical. Une fosse exigerait de déplacer une énorme quantité de stérile pour atteindre peu de minerai ; le rapport de 9,5 est défavorable. Une exploitation **souterraine** ciblant le filon est donc plus plausible, sous réserve de la géotechnique et de l'économie.
Le rapport stérile/minerai est :

$$SR = \frac{\text{masse ou volume de stérile extrait}}{\text{masse ou volume de minerai extrait}}.$$

En fosse, les talus doivent rester stables. Lorsque la profondeur augmente, il faut élargir la fosse et enlever de plus en plus d'encaissant pour atteindre le minerai : le rapport tend donc à croître.
Ciel ouvert : forte emprise au sol, volumes de stériles, poussières/bruit, modification du relief, rabattement possible de la nappe, stabilité des talus. **Souterrain :** stabilité des ouvrages, ventilation, température, gaz/poussières, eaux d'exhaure, risques d'effondrement et sécurité des accès.
La ventilation apporte de l'air respirable, évacue poussières, gaz, chaleur et éventuellement fumées d'engins ou de tirs. La stabilité est essentielle car les galeries créent des vides et redistribuent les contraintes dans le massif rocheux.

5. Bilan matière d'une usine de concentration

Éléments de correction

Sur 1 000 t de minerai :

$$M_{Cu} = 1000 \times 0.006 = \boxed{6\,\text{t}}, \qquad M_{Zn} = 1000 \times 0.012 = \boxed{12\,\text{t}}.$$

Métal récupéré :

$$M_{Cu,rec} = 6 \times 0.90 = \boxed{5{,}4\,\text{t}},$$

$$M_{Zn,rec} = 12 \times 0.85 = \boxed{10{,}2\,\text{t}}.$$

Concentré Cu à 25 % :

$$M_{conc,Cu} = \frac{5.4}{0.25} = \boxed{21{,}6\,\text{t}}.$$

Concentré Zn à 50 % :

$$M_{conc,Zn} = \frac{10.2}{0.50} = \boxed{20{,}4\,\text{t}}.$$

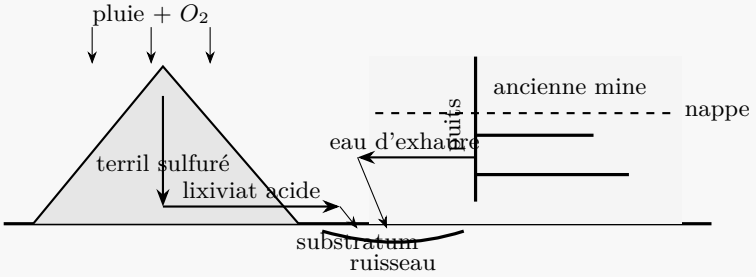
En négligeant l'eau et les éventuels flux intermédiaires :

$$M_{residus} = 1000 - 21.6 - 20.4 = \boxed{958\,\text{t}}.$$

L'exercice montre qu'une mine peut produire beaucoup plus de **résidus** que de concentré. Ces résidus peuvent contenir des sulfures non valorisés, des réactifs, des métaux résiduels et des particules très fines. Leur stockage doit donc assurer stabilité physique, maîtrise des eaux, limitation de l'oxydation et surveillance à long terme.

6. Origine du drainage minier acide

Éléments de correction



Les deux sources représentées sont :

a) un **terril sulfuré** exposé aux pluies et à l'oxygène, où l'eau d'infiltration lessive les produits d'oxydation ;

b) les **travaux miniers** et leurs eaux d'exhaure, en particulier lorsque des surfaces de sulfures fraîches ont été exposées puis remises en contact avec l'eau et l'oxygène.

La pyrite et d'autres sulfures peuvent s'oxyder en présence d'O_2 et d'eau. Cette oxydation produit sulfate, fer et acidité. Des microorganismes peuvent accélérer certaines étapes de l'oxydation du fer et du soufre.

Dans une encaissante carbonatée, la dissolution de calcite ou de dolomite peut neutraliser une partie de l'acidité. Dans une roche pauvre en minéraux neutralisants, le pH peut rester très bas et favoriser la mise en solution de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb ou d'autres éléments selon la minéralogie.

Après l'arrêt du pompage, le niveau d'eau remonte dans les travaux. L'eau réagit avec les surfaces oxydées et les minéraux exposés, puis peut déborder par un puits, une galerie ou une source. Le stock de sulfures et les produits d'oxydation accumulés peuvent donc entretenir des rejets pendant très longtemps.

7. Potentiel acidifiant d'un terril

Éléments de correction

a) Masse de pyrite

$$M_{py} = 800000 \times 0.012 = \boxed{9\,600\,\text{t}}.$$

b) Stoechiométrie de l'acidité

La réaction fournie produit **4 moles de** H^+ par mole de pyrite. Une mole de calcite neutralise 2 moles de H^+, donc il faut :

$$\boxed{2 \text{ mol } CaCO_3 \text{ par mol } FeS_2}.$$

c) Rapport massique

Pour 120 g de pyrite, il faut $2 \times 100\,\text{g} = 200\,\text{g}$ de calcite :

$$\frac{M_{CaCO_3}}{M_{FeS_2}} = \frac{200}{120} = \boxed{1.67}.$$

d) Besoin théorique

$$M_{CaCO_3} = 9600 \times 1.67 \simeq \boxed{16\,000\,\text{t}}.$$

e) Pureté et efficacité

Si seulement 90 % du matériau est du $CaCO_3$ et si 70 % seulement de la capacité théorique est effectivement utilisée :

$$M_{calcaire} = \frac{16000}{0.90 \times 0.70} \simeq \boxed{25\,400\,\text{t}}.$$

f) Limites

Le calcul suppose que toute la pyrite s'oxyde et que tout le neutralisant est accessible et réactif. En réalité il faut connaître la minéralogie complète, la granulométrie, la perméabilité, le bilan hydrique, l'accès de l'oxygène, la cinétique, la présence d'autres sulfures et minéraux neutralisants, ainsi que le devenir des précipités métalliques. Le meilleur traitement est souvent de **limiter l'oxydation et l'infiltration** plutôt que de neutraliser indéfiniment l'eau produite.

8. Eaux d'exhaure et traitement

Éléments de correction

a) Volume journalier

$$V = 35 \times 24 = \boxed{840\,\mathrm{m^3/d}}.$$

b) Masse quotidienne d'acidité

650 mg/L correspond à 0,650 kg/m^3. Donc :

$$M = 840 \times 0.650 = \boxed{546\,\mathrm{kg/d}}$$

en équivalent $CaCO_3$.

c) Masse annuelle

$$546 \times 365 = 199290 \text{ kg/an} \simeq \boxed{199\,\mathrm{t\ per\ an}}.$$

d) Réactif à 90 % de pureté

$$M_{reagent} = \frac{546}{0.90} = \boxed{607\,\mathrm{kg/d}}.$$

C'est un minimum théorique puisque l'on n'applique pas ici de surdosage ni de correction cinétique.

e) Le pH n'est pas le seul problème

Lorsque le pH remonte, Fe et Al peuvent précipiter sous forme d'hydroxydes et entraîner d'autres métaux par coprécipitation ou adsorption. Il faut donc assurer décantation/filtration, gérer les boues produites et vérifier les concentrations résiduelles en métaux et sulfates avant rejet.

f) Exemples d'actions

— **À la source :** couverture du terril, limitation de l'infiltration et de l'entrée d'O_2, séparation des eaux propres et sales, mise sous eau contrôlée de certains déchets, tri des matériaux acidifiants et neutralisants.

— **Traitement actif :** ajout de chaux/calcaire ou autre alcalin, oxydation contrôlée, précipitation des métaux, décantation et gestion des boues.

— **Traitement passif :** drains calcaires, zones humides construites ou systèmes réducteurs adaptés lorsque les débits et charges le permettent.

9. Exemple de synthèse

Éléments de correction

Une concentration métallique devient une réserve exploitable seulement si la géologie, la technique et l'économie convergent. Il faut un tonnage et une teneur suffisants au-dessus d'une teneur de coupure, une géométrie permettant une méthode minière réaliste et des propriétés géotechniques compatibles avec la sécurité. Le minerai doit pouvoir être traité avec une récupération métallurgique satisfaisante et des concentrés commercialisables. Les revenus attendus doivent couvrir extraction, transport, traitement, énergie, eau, gestion des stériles et résidus, fermeture et réhabilitation. L'accès à l'eau et la maîtrise des eaux d'exhaure sont déterminants. Les sulfures peuvent générer un drainage minier acide imposant prévention et traitement à long terme. Enfin, les autorisations, les usages du territoire, les impacts sociaux et environnementaux et la sécurité d'approvisionnement conditionnent aussi le passage d'une ressource à une réserve.