UE Géoressources – Licence 2

Matériaux : de la carrière au recyclage

Corrigé – granulats, minéraux industriels, déchets et eaux usées

Point de vigilance

Ce corrigé privilégie les ordres de grandeur et le raisonnement. Les données numériques ont été simplifiées pour le TD. Pour les déchets et les eaux usées, les performances réelles dépendent fortement du procédé, de la composition des flux, des normes applicables et des conditions locales.

1. Culture générale : matières premières et applications

Éléments de correction

Les associations attendues sont :

Matière première	Réponse	Justification principale
Calcaire	C	Chaux, clinker/ciment, granulats et charges minérales.
Gypse	A	Déshydratation partielle pour fabriquer le plâtre, puis réhydratation lors de la prise.
Silice / quartz	B	Constituant majeur du réseau silicaté des verres.
Kaolin	E	Argile blanche recherchée pour les céramiques et comme charge minérale.
Bentonite	F	Forte capacité de gonflement et d'adsorption ; étanchéité et boues.
Feldspath	D	Apporte des alcalins et agit comme fondant.
Granulats	G	Constituants massifs des bétons, routes, ballast et enrobés.
Sel gemme	H	Matière première chimique, usages alimentaires et déneigement.

a) Les granulats ont une faible valeur unitaire mais sont consommés en énormes volumes. Le transport devient rapidement une part importante du coût et de l'empreinte énergétique : d'où l'intérêt d'une ressource locale.
b) L'abondance géologique ne suffit pas. Une ressource industrielle doit présenter les bonnes propriétés : pureté, granulométrie, couleur, blancheur, minéralogie, aptitude à la cuisson, résistance mécanique, absence d'éléments indésirables, accessibilité et proximité du marché.
c) Exemples : silice très pure pour certains verres ; kaolin blanc pour papier/céramique ; calcaire pauvre en impuretés pour charges ; granulométrie contrôlée des granulats ; gypse à pureté suffisante pour le plâtre.

2. Granulométrie d'un granulat

Éléments de correction

Le passant cumulé à 20 mm est 86 %. Donc la fraction > 20 mm vaut :

$$100 - 86 = \boxed{14\,\%}.$$

Entre 4 et 20 mm :

$$86 - 32 = \boxed{54\,\%}.$$

Sous 4 mm :

$$\boxed{32\,\%}.$$

Pour 1 200 t :

$$M_{>20} = 1200 \times 0.14 = \boxed{168\,\text{t}},$$

$$M_{4-20} = 1200 \times 0.54 = \boxed{648\,\text{t}},$$

$$M_{<4} = 1200 \times 0.32 = \boxed{384\,\text{t}}.$$

La somme vaut bien 1 200 t.
Une bonne distribution granulométrique permet d'optimiser l'empilement des grains, de limiter les vides et donc la quantité de liant nécessaire. Pour les chaussées, elle contrôle également compacité, portance, drainage et comportement mécanique. Un excès de fines ou de gros éléments peut rendre le matériau impropre à un usage donné.

3. Ressource et durée de vie d'une carrière

Éléments de correction

Surface :

$$A = 12 \times 10000 = 120\,000\,\text{m}^2.$$

Volume géologique :

$$V = Ae = 120000 \times 18 = \boxed{2{,}16 \times 10^6\,\text{m}^3}.$$

Masse brute :

$$M_b = V\rho = 2.16 \times 10^6 \times 2.4 = \boxed{5{,}184 \times 10^6\,\text{t}}.$$

Après retrait de 12 % de zones non exploitables :

$$M_1 = 5.184 \times 10^6 \times 0.88 = 4{,}562 \times 10^6 \text{ t}.$$

Après rendement de préparation de 92 % :

$$M_c = 4.562 \times 10^6 \times 0.92 \simeq \boxed{4{,}197 \times 10^6 \text{ t}}.$$

Durée de vie théorique :

$$t = \frac{4.197 \times 10^6}{250000} \simeq \boxed{16.8 \text{ ans}}.$$

Cette durée dépend en réalité du phasage d'exploitation, des variations de qualité, des contraintes géotechniques, des autorisations, des marchés, de la demande, du rendement réel, des zones de protection et des choix de réaménagement.

4. Du calcaire à la chaux et au ciment

Éléments de correction

D'après la stoechiométrie :

$$100\,\text{kg } CaCO_3 \rightarrow 56\,\text{kg } CaO + 44\,\text{kg } CO_2.$$

Pour 1 t de $CaCO_3$ pur :

$$\boxed{560\,\text{kg } CaO} \quad \text{et} \quad \boxed{440\,\text{kg } CO_2}.$$

Dans 1,5 t de calcaire à 85 % :

$$M_{CaCO_3} = 1.5 \times 0.85 = 1{,}275\,\text{t}.$$

Le CO_2 de procédé vaut donc :

$$M_{CO_2} = 1.275 \times 0.44 = \boxed{0{,}561\,\text{t}} \simeq \boxed{561\,\text{kg}}.$$

Le ciment émet du CO_2 pour deux raisons conceptuellement distinctes : **la décarbonatation du calcaire** libère chimiquement du CO_2, et il faut en plus de l'énergie pour chauffer le four et les matières à haute température.
Leviers possibles : diminuer le taux de clinker par substitution avec des constituants adaptés ; recycler les bétons comme granulats ; améliorer l'efficacité énergétique ; utiliser des combustibles ou sources d'énergie moins carbonés ; optimiser les formulations et la durée de vie des ouvrages. Tous les leviers ne réduisent pas la même composante de l'impact.

5. Verre, plâtre et céramiques

Éléments de correction

Silice et verre. La silice est le principal formateur du réseau vitreux. Sa température de fusion est élevée ; les fondants abaissent les températures de fusion et facilitent l'élaboration industrielle. Des stabilisants sont ensuite nécessaires pour obtenir les propriétés chimiques et mécaniques recherchées.
Gypse et plâtre. Le chauffage du gypse retire une partie de son eau de constitution et forme un matériau capable de reprendre de l'eau lors du gâchage. Cette réhydratation s'accompagne d'une cristallisation et de la prise : on dispose donc d'une poudre facilement transportable et mise en forme qui durcit après ajout d'eau.
Feldspaths. Ils apportent notamment des alcalins et favorisent la formation d'une phase fondue : ce sont des fondants importants des verres et céramiques.
Kaolin / bentonite. Le kaolin est recherché pour sa blancheur, sa faible teneur en impuretés et son comportement à la cuisson. La bentonite, riche en smectites, se distingue par une forte capacité de gonflement, d'échange et d'adsorption. Des minéraux tous deux classés parmi les argiles peuvent donc avoir des propriétés industrielles très différentes.

6. Choisir entre deux carrières

Éléments de correction

Carrière A :

$$C_A = 8 + 25 \times 0.12 = \boxed{11\,€/\text{t}}.$$

Pour 50 000 t :

$$C_{A,tot} = 50000 \times 11 = \boxed{550\,000\,€}.$$

Carrière B :

$$C_B = 5 + 80 \times 0.12 = \boxed{14{,}6\,€/\text{t}}.$$

$$C_{B,tot} = 50000 \times 14.6 = \boxed{730\,000\,€}.$$

La carrière A est moins chère de 180 000 € dans ce modèle, malgré son prix départ plus élevé. Le calcul illustre l'importance de la proximité pour les matériaux pondéreux.
Autres critères : conformité granulométrique et mécanique, disponibilité du volume demandé, régularité de qualité, impacts du trafic routier, émissions, bruit, poussières, accès au chantier, contraintes environnementales, réserves disponibles, sécurité d'approvisionnement et possibilités de recyclage local.

7. Incinération et résidus

Éléments de correction

Pour 1 000 kg de déchets :

$$\frac{270}{1000} \times 100 = \boxed{27\,\%} \quad \text{de mâchefers,}$$

$$\frac{30}{1000} \times 100 = \boxed{3\,\%} \quad \text{de REFIOM.}$$

Pour 50 000 t/a :

$$M_{MIOM} = 50000 \times 0.27 = \boxed{13\,500\,\text{t/a}},$$

$$M_{REFIOM} = 50000 \times 0.03 = \boxed{1\,500\,\text{t/a}}.$$

Les mâchefers sont des résidus minéraux grossiers issus du foyer. Après maturation, contrôles et récupération éventuelle des métaux, certaines fractions peuvent être valorisées selon leur qualité et la réglementation. Les REFIOM concentrent des poussières et substances captées lors de l'épuration des fumées ; leur gestion doit donc être beaucoup plus contrôlée.
La **valorisation énergétique** récupère une partie de l'énergie libérée lors de l'incinération. La **valorisation matière** cherche à réutiliser une matière ou un constituant, par exemple des métaux récupérés ou un granulat minéral conforme.

8. Centre de stockage et lixiviats

Éléments de correction

Surface :

$$A = 4 \times 10000 = 40\,000\,\text{m}^2.$$

La pluie annuelle correspond à une lame de 0,8 m, soit :

$$V_P = 0.8 \times 40000 = 32\,000\,\text{m}^3/\text{a}.$$

Avant couverture :

$$V_{lix,1} = 32000 \times 0.65 = \boxed{20\,800\,\text{m}^3/\text{a}}.$$

Après couverture :

$$V_{lix,2} = 32000 \times 0.10 = \boxed{3\,200\,\text{m}^3/\text{a}}.$$

Réduction :

$$1 - \frac{3200}{20800} = 0.846 \simeq \boxed{84.6\,\%}.$$

La **géomembrane** limite les transferts vers le sous-sol ; le **drainage** recueille les lixiviats pour traitement ; la collecte du **biogaz** évite son accumulation et permet éventuellement sa valorisation ; le suivi piézométrique et chimique contrôle l'absence de contamination des eaux souterraines.
Une ancienne décharge non étanchée peut rester polluante parce que l'eau continue à traverser les déchets, à dissoudre ou mobiliser des substances et à alimenter lentement un panache dans la nappe. Le temps de transfert souterrain peut être long et le stock de contaminants persistant.

9. Traitement d'eaux usées domestiques

Éléments de correction

Débit journalier :

$$Q = 12000 \times 150 = 1{,}8 \times 10^6\,\text{L/d} = \boxed{1\,800\,\text{m}^3/\text{d}}.$$

Charge initiale de DBO_5 :

$$L_0 = 12000 \times 60 = 720\,000\,\text{g/d} = \boxed{720\,\text{kg/d}}.$$

Après traitement primaire, il reste 70 % :

$$L_1 = 720 \times 0.70 = \boxed{504\,\text{kg/d}}.$$

Le traitement biologique retire 90 % de ce reste :

$$L_2 = 504 \times 0.10 = \boxed{50{,}4\,\text{kg/d}}.$$

Concentration finale :

$$C = \frac{50.4\ \text{kg/d}}{1800\ \text{m}^3/\text{d}} = 0{,}028\,\text{kg/m}^3 = \boxed{28\,\text{mg/L}}.$$

Rendement global :

$$\eta = 1 - \frac{50.4}{720} = \boxed{93\,\%}.$$

Ordre logique : **dégrillage → décantation primaire → bassin biologique aéré → clarificateur secondaire → rejet ou traitement tertiaire**. Les boues peuvent être épaissies puis digérées, déshydratées, compostées, valorisées sous conditions, méthanisées ou orientées vers d'autres filières de traitement selon leur qualité.

10. Recycler les matériaux de construction

Éléments de correction

Bétons et maçonneries :

$$M_1 = 20000 \times 0.75 = 15\,000\,\text{t}.$$

Masse correctement triée :

$$M_2 = 15000 \times 0.80 = 12\,000\,\text{t}.$$

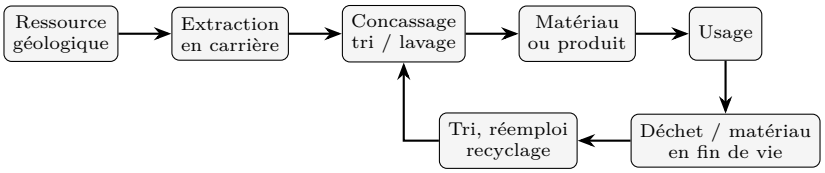
Granulat recyclé :

$$M_R = 12000 \times 0.90 = \boxed{10\,800\,\text{t}}.$$

Part du besoin du chantier :

$$\frac{10800}{15000} \times 100 = \boxed{72\,\%}.$$

Limites possibles : contamination par plâtre, bois, plastiques ou amiante ; hétérogénéité ; performances mécaniques ou durabilité ; coûts de tri et concassage ; distance entre gisement de déchets et chantier ; exigences normatives ; difficulté à recycler certaines fractions fines.



11. Exemple de synthèse

Éléments de correction

Les matériaux de carrière et minéraux industriels sont indispensables à la construction, aux routes, au verre, au ciment, au plâtre, aux céramiques et à de nombreux procédés industriels. Leur valeur dépend moins de leur rareté que de propriétés précises : pureté, granulométrie, couleur, résistance ou comportement à la cuisson. Comme les volumes consommés sont très élevés et la valeur unitaire souvent faible, la proximité de la ressource est déterminante et le transport devient un enjeu économique et énergétique majeur. L'extraction modifie les paysages, produit poussières et bruit et peut affecter les eaux ; la transformation consomme également de l'énergie, notamment pour le ciment. Le réemploi et le recyclage des matériaux de démolition peuvent réduire l'extraction primaire, mais nécessitent tri, contrôle de qualité et débouchés locaux. La gestion des déchets et des eaux usées montre enfin qu'une société doit non seulement extraire des géoressources, mais aussi gérer les flux de matière après usage et chercher à les réintroduire dans les cycles de production.