

INNOVATIONS EN ENVIRONNEMENT MINIER : ENTRE GESTION INTÉGRÉE EN AMONT ET RESTAURATION EN AVAL

Par **Mostafa BENZAAZOUA**, PhD
Professeur titulaire Université du Québec (UQAT)



Chaire de recherche du Canada
Gestion intégrée des rejets miniers

Introduction : Impacts environnementaux de l'industrie minière



Chaire de recherche du Canada
Gestion intégrée des rejets miniers

Introduction

- Pour beaucoup de pays, l'industrie minière constitue un **bonne part de leur PIB**;
- Les mines exploitent divers types de gisements mais **laissent en fin de procédés d'importantes quantités de rejets solides et liquides**;
- Une mine doit **gérer ses rejets** sur le site même;
- La bonne **gestion de l'eau** en surface est essentielle; tente de minimiser son utilisation et de la réutiliser autant que possible;
- Il faut **traiter l'eau à l'effluent** final, si elle ne respecte pas les critères environnementaux.

Introduction

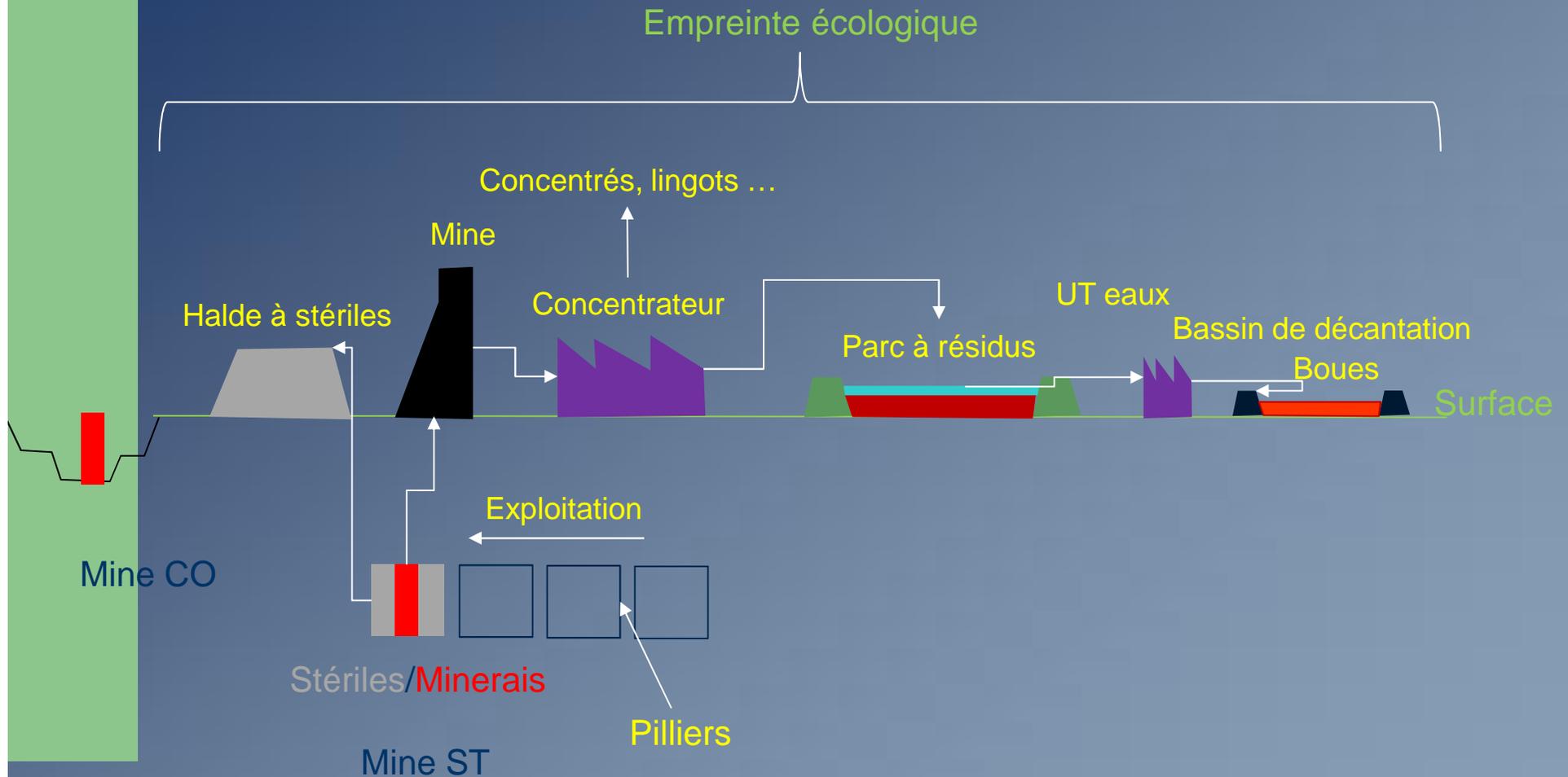
- En termes de gestion des rejets miniers on peut sans trop faire d'erreurs dire que l'année 1990 a été un tournant ici au Canada
- Démarrage du programme NEDEM (MEND en anglais): vaste programme de R&D dans le domaine de l'environnement minier;
- Ça a permis de progresser significativement les connaissances qui sous-tendent la gestion et le comportement des rejets et la restauration des sites miniers;
- On voudrait tendre vers des mines plus propres (clean mines).

Introduction

A l'UQAT (Réputation de renommée mondiale)

- URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale: beaucoup de projet en environnement minier;
- La chaire industrielle Ecole Polytechnique UQAT en Gestion et restauration des sites miniers (**M Aubertin et B Bussière**);
- Chaire de recherche du Canada en Restauration des sites miniers abandonnés (**B Bussière**).
- Chaire de recherche du Canada en Gestion intégrée des rejets miniers (**M Benzaazoua**)
- Chaire internationale du CRDI en Gestion et stabilisation des rejets miniers et industriels (**M Benzaazoua et Rachid Hakkou**)
- Chaire de recherche du Canada en Tacitement passif des eaux minières (**C Neculita**)
- Institut de Recherche en Mines et Environnement

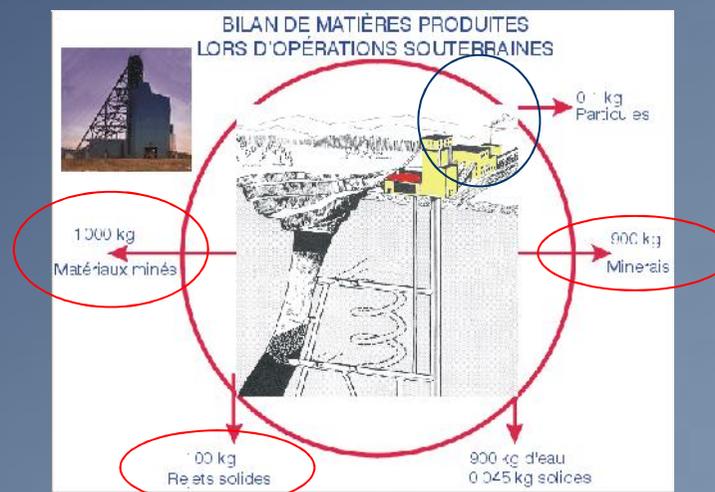
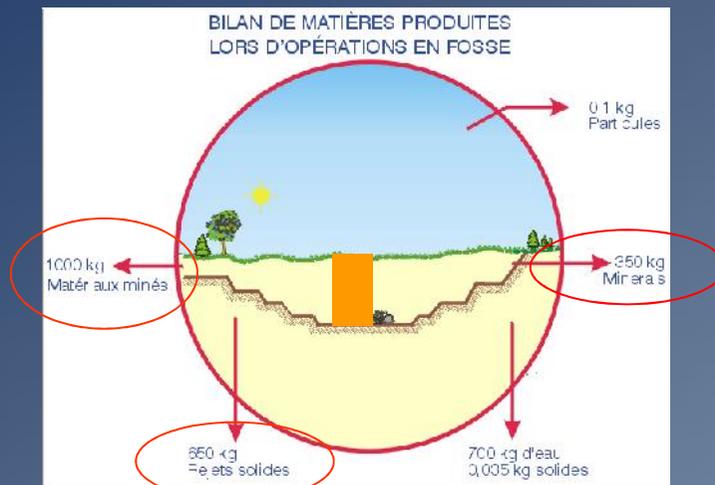
Introduction: origine des rejets



Gestion conventionnelle des rejets

Introduction: origine des rejets

Tonnage extrait/Minerai



Minerai/Teneur



1000 kg de minerai donne
5-10 g d'Au, et engendre

4 à 5 tonnes de rejets solides et liquides....

Introduction

- **INNOVATION MAJEURE:** Il faut aborder la problématique environnementale à toutes les étapes de la vie d'une mine :
 - Exploration et développement: prédiction.
 - Exploitation: prévention, réutilisation et contrôle.
 - Fermeture (après mine): contrôle à long terme.

Approvisionnement monétaire tout le long de l'exploitation: on ne veut plus de site abandonnés

Introduction: Principaux impacts

Déposition de rejets en surface

- Résidus de concentrateur
- Stériles
- Boues

Contamination des eaux

- Sous terre : eau d'exhaure
- En surface : Drainage neutre et acide, eaux de procédé, etc.

Autres nuisances

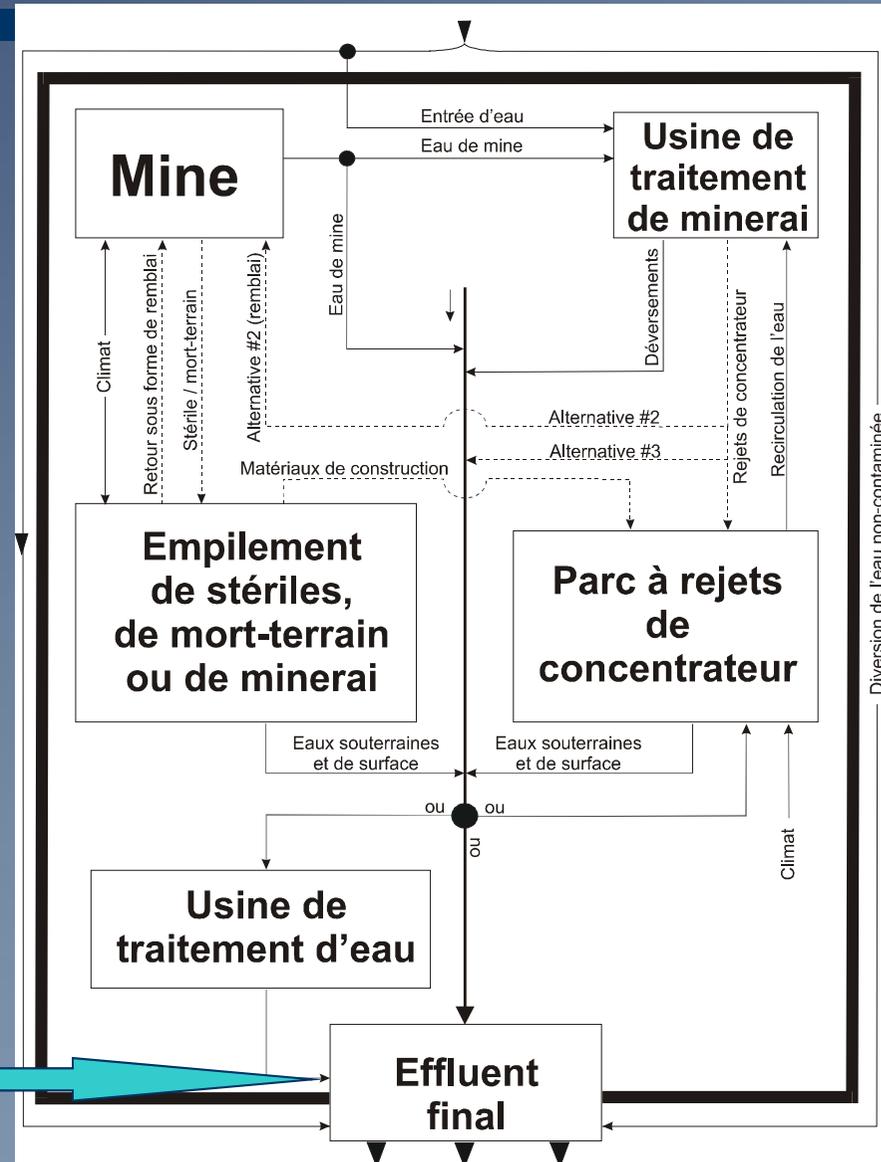
- Poussières
- Bruits
- Esthétique

L'eau dans la mine

Site contrôlé
et étanchéifié!!!

Car l'eau est la
principale source de
diffusion de la
contamination

Traitement nécessaire si
critères environnementaux non
respectés (Directive 019)

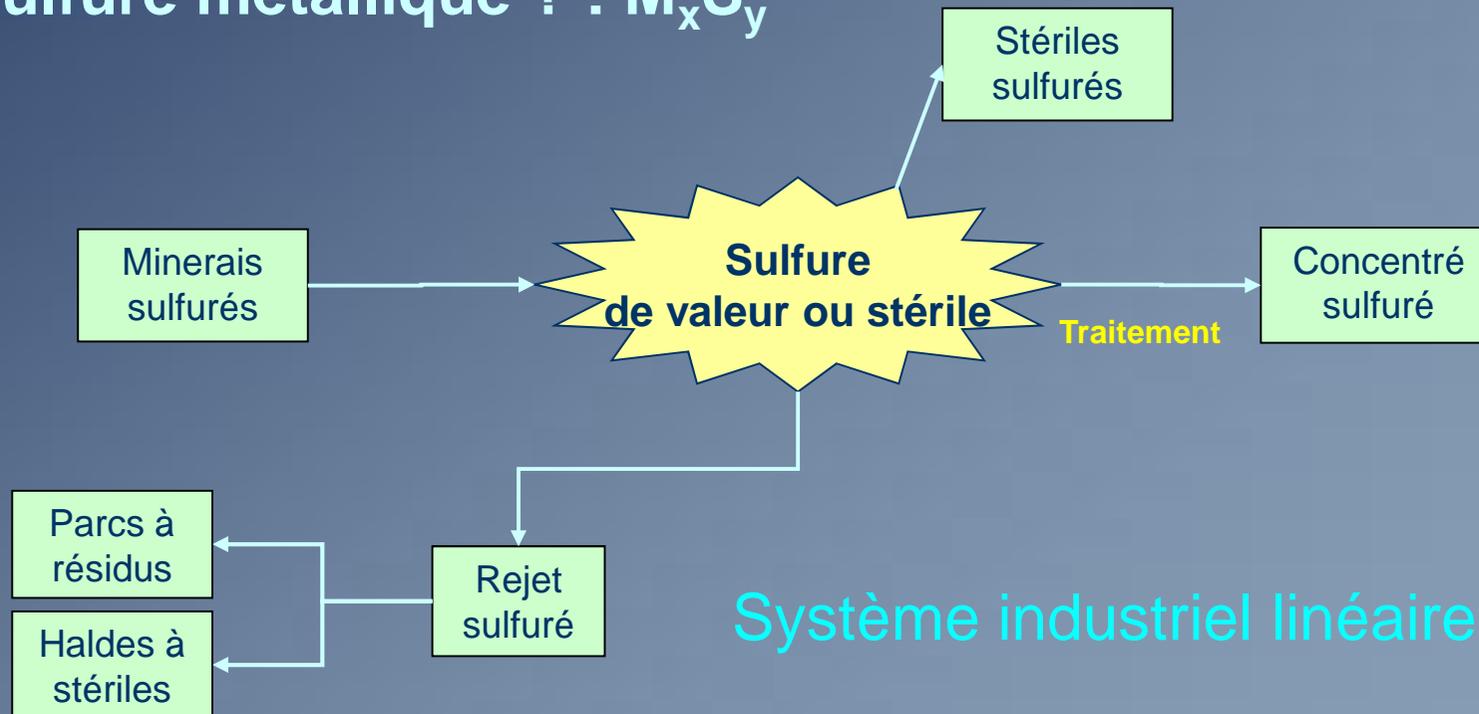


Drainage minier acide (DMA)

■ Aspects environnementaux très variés

■ Pour les rejets solides : DMA

Sulfure métallique ? : M_xS_y



Exemples de DMA

Exemple: Site Manitou (abandonné), situé près de Val-d'Or (Canada)



Exemples de DMA

Exemple: Site Manitou (abandonné), situé près de Val-d'Or (Canada)

Zone d'épanchement



Exemples de DMA

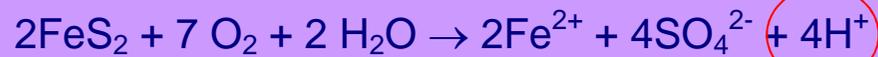
Exemple: Site Aldermach (abandonné), situé près de Rouyn-Noranda (Canada)
Problématique à grande échelle



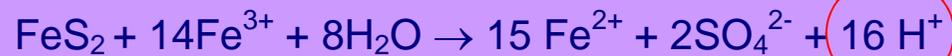
Drainage minier acide (DMA)

Oxydation des sulfures: Drainage minier acide (DMA)

L'oxydation directe : pH Neutres



L'oxydation indirecte : pH Acides



Réaction globale :

bactéries



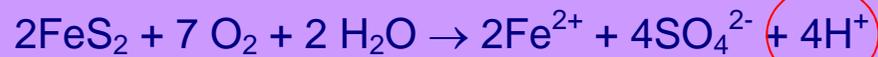
TRITEMENT DES EAUX ACIDES NECESSAIRE

Très couteux!!!

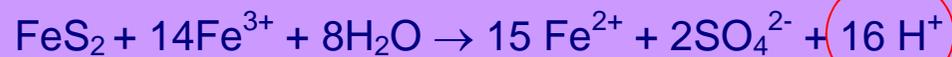
Drainage minier acide (DMA)

Oxydation des sulfures: Drainage minier acide (DMA)

L'oxydation directe : pH Neutres



L'oxydation indirecte : pH Acides



Réaction globale :

bactéries



↑
Éliminer S

↑
Barrière à l'eau

↑
Barrière à O₂

Recouvrement en eau

Recouvrement en matériaux naturels

Après mine

- La responsabilité environnementale d'une exploitation minière ne s'arrête pas à la période d'exploitation; demeure présente après la fermeture du site;
- À la fin de la vie de la mine, il faut remettre en état le site en procédant au démantèlement des infrastructures et à la restauration des aires d'entreposage des rejets; (**Empreinte écologique**)
- Cette restauration engendre des coûts élevés, et des défis techniques et pratiques.

Divers modes de gestion des rejets miniers

Modes de gestion conventionnels



Rejets miniers liquides

- **Les eaux de mine : différents types de contaminants;**
- **Classifiés selon:**
 - Solubles : acides générés par le DMA, métaux lourds et contaminants provenant du traitement du minerai (cyanures, agents de traitement, thiosels).
 - Non solubles : particules en suspension
 - Radioactifs : radium, thorium et du plomb 210
- **Si les eaux sont contaminées, il faut les traiter de façon à respecter les lois et les règlements.**
- **Traitement actif surtout (chaullage)**

Rejets miniers solides

- **Principaux rejets miniers solides générés par les exploitations minières sont :**
 - le mort-terrain résultant du décapage et de l'excavation de la surface (cas de mine à ciel ouvert);
 - les roches stériles issues des opérations d'extraction;
 - les rejets du concentrateur produits lors du traitement minéralurgique;
 - les boues provenant du traitement chimique des eaux.

Rejets miniers solides : stériles

- Les stériles miniers : stockés dans des haldes;
- Le mode de déposition entraîne une grande hétérogénéité dans la halde;
- La principale préoccupation liée aux empilements de stériles est leur stabilité physique et chimique (DMA).

Rejets miniers solides : stériles



LaRonde, Abitibi, Qc

Rejets miniers solides : stériles

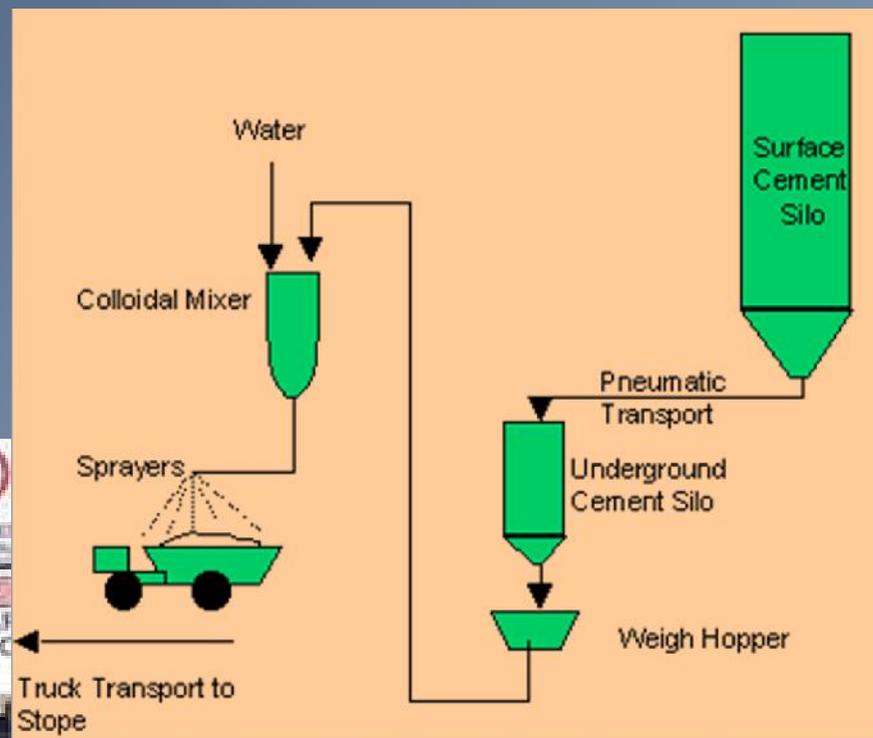
Souvent, haldes de grandes dimensions



Goldstrike, Nevada

Rejets miniers solides : stériles

- Les stériles miniers : peuvent servir aussi pour le remblayage des cavités souterraines pour un meilleur support de terrain + gain environnemental



Rejets miniers solides : résidus

- Les rejets de concentrateur : habituellement transportés sous forme de **pulpe** jusqu'au bassin d'entreposage;
- Ils sont dans un état **lâche et fortement saturé**; se consolident lentement en raison du mode de mise en place, de sa teneur en eau initiale et de sa faible conductivité hydraulique; peut entraîner des problèmes de stabilité physique;
- Tout comme pour les stériles, il peut y avoir des problèmes de **DMA** avec ce type de rejet (selon minéralogie).

Rejets miniers solides : résidus

Résidus
déversés sous
forme de pulpe



Rejets miniers solides : résidus

Installations de grandes dimensions
Parc est une partie intégrante du complexe minier



Rejets miniers solides : résidus

Parcs à résidus miniers (rejets de concentrateur et boues)



Rejets miniers solides : résidus

Digues de retenue, avec DMA



Rejets miniers solides : résidus

Risques géotechniques
Ruptures fréquentes de digues...



Boues de traitement

- Lorsqu'il y a génération d'acide durant l'opération, il faut traiter l'eau afin de respecter les normes environnementales;
- Habituellement, on a recours au traitement chimique qui produit des boues de traitement;
- Ces boues doivent être entreposées de façon convenable, **mais prennent de la place!**;
- On connaît peu leurs propriétés physiques, et leur stabilité chimique à long terme.

Boues de traitement



- **Déposition de boues**
- **Parfois redéposées dans le parc à résidus**



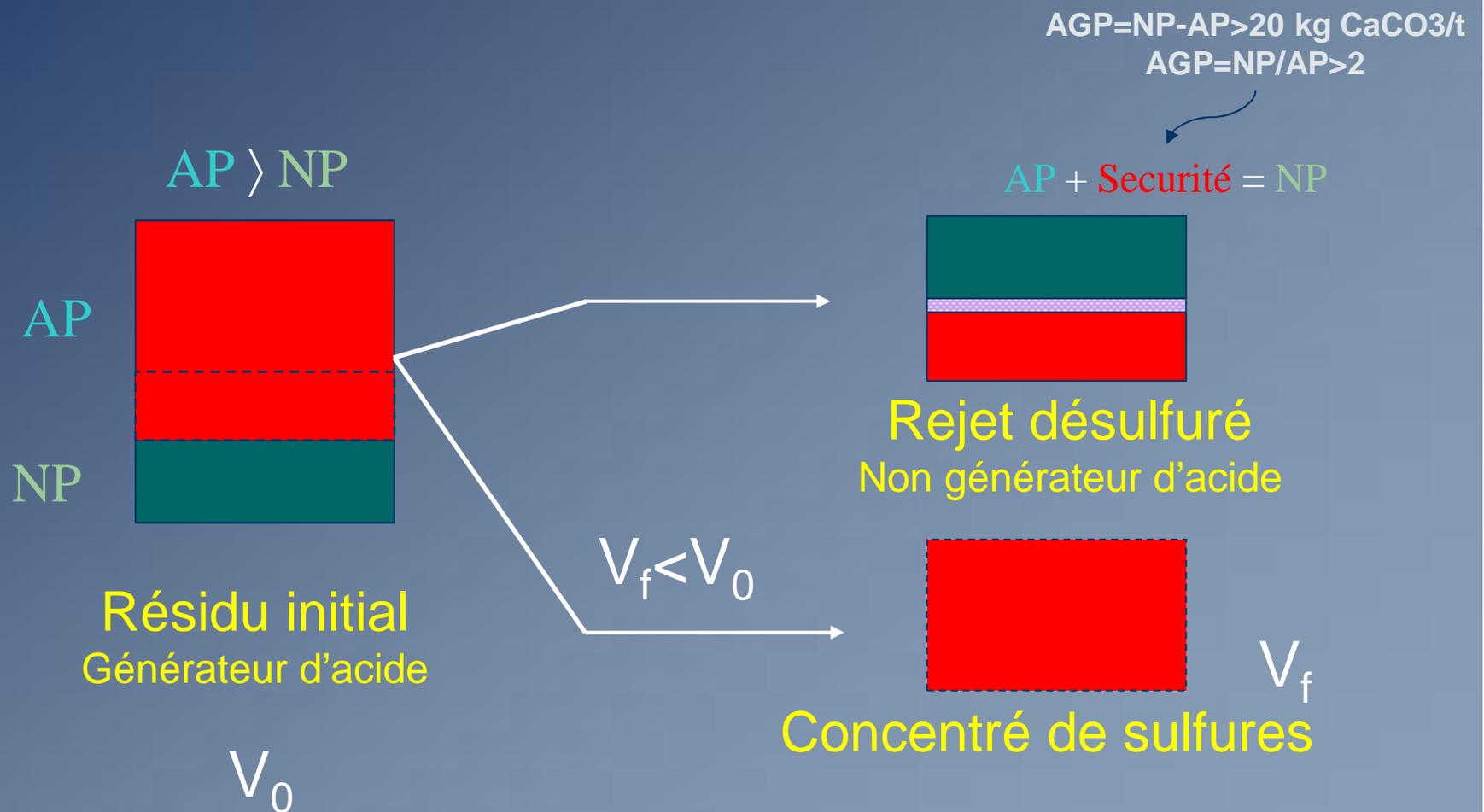
Divers modes de gestion des rejets miniers

Modes de gestion récents



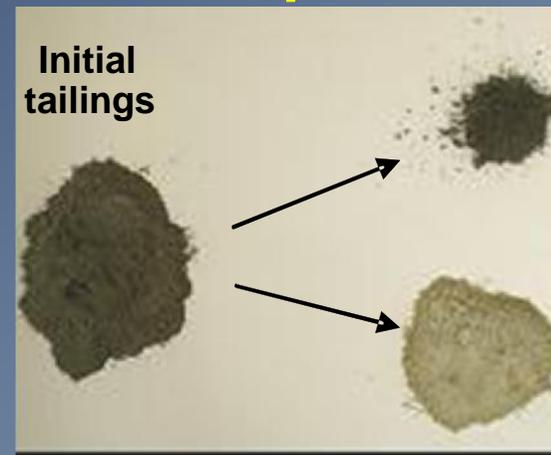
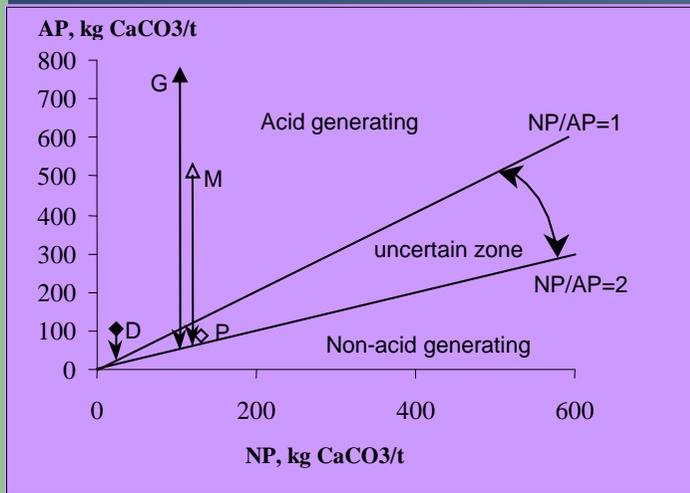
Désulfuration des résidus miniers

Désulfuration environnementale

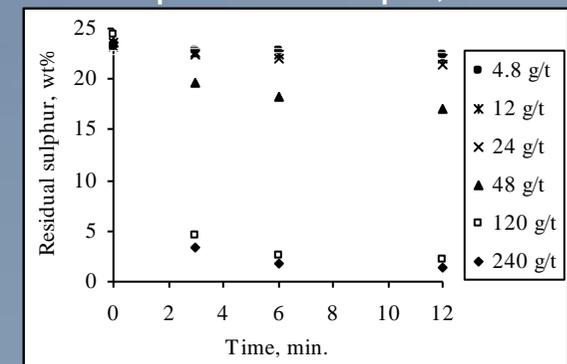
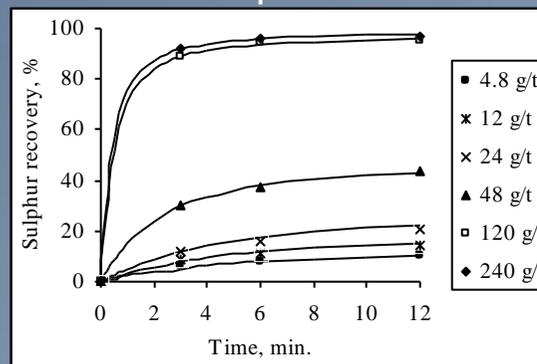


Désulfuration des résidus miniers

Désulfuration: Faisabilité technique et économique



- Importance du temps de flottation
- Importance de la concentration en collecteur
- Importance de conditions opératoires : pH, Eh



Gestion des rejets miniers

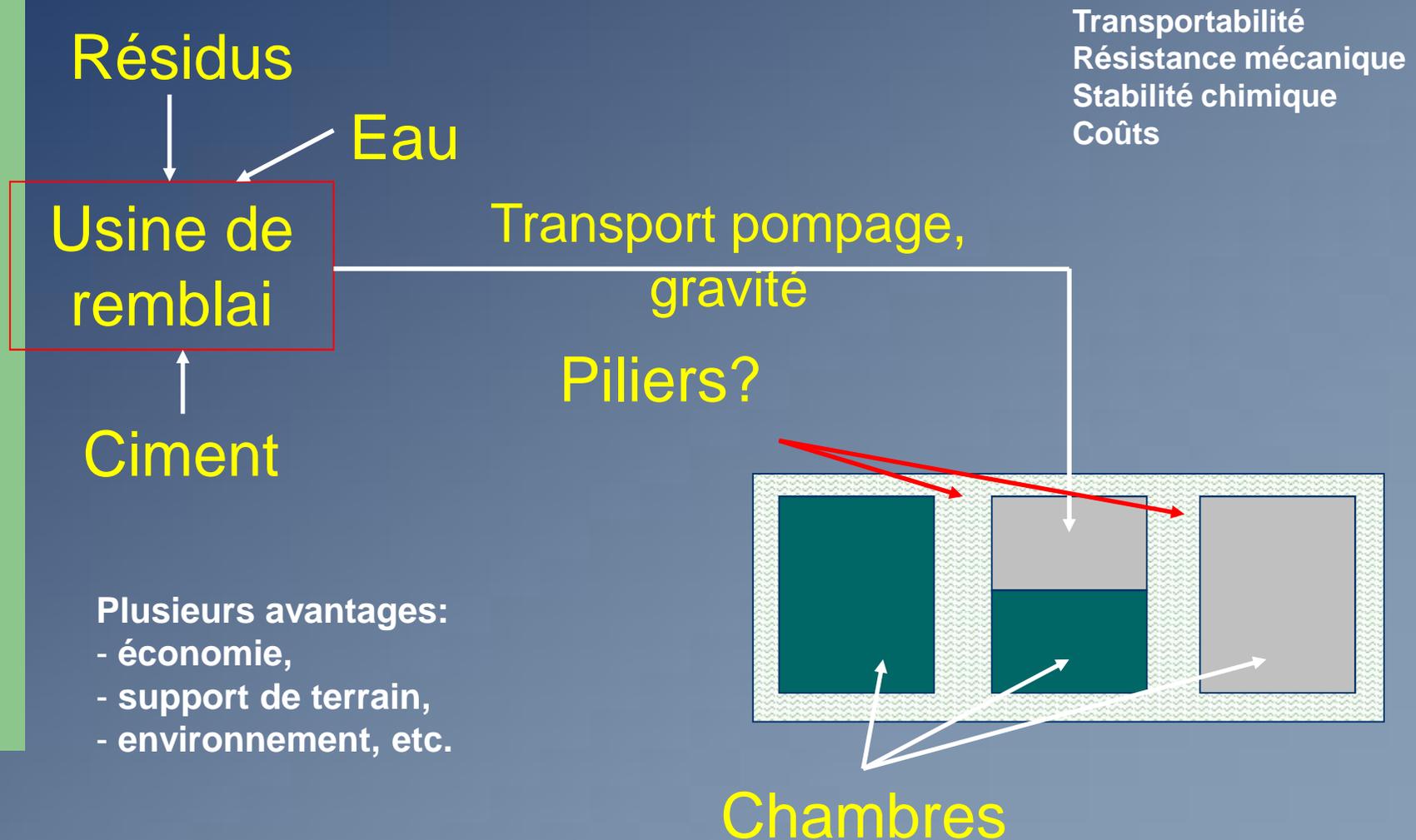
Remblayage minier



% Solide élevé



Résidus en remblai en pâte souterrain



Résidus en remblai en pâte de surface



Rejets épais Bulyanhulu
(Tanzanie)



Résidus en remblai en pâte de surface

Disposition en surface des rejets miniers sulfureux sous forme de pâte



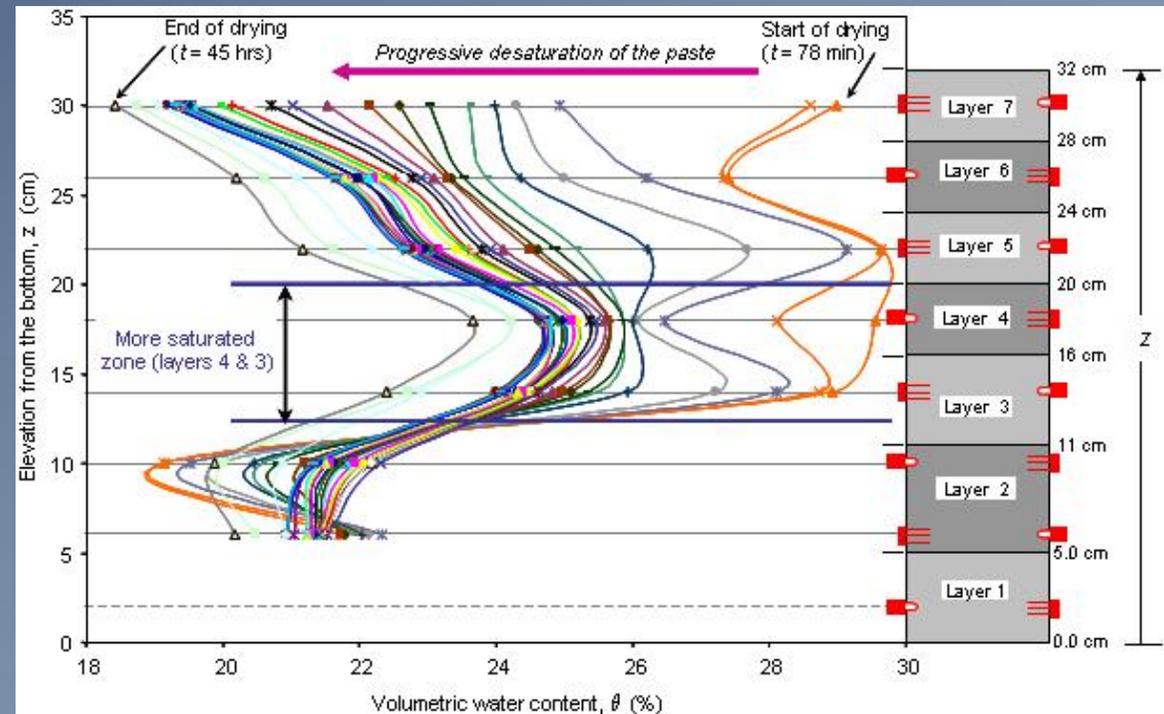
Site Buyanhulu (Tanzanie)

Résidus en remblai en pâte de surface

Disposition en surface des rejets miniers sulfureux sous forme de pâte

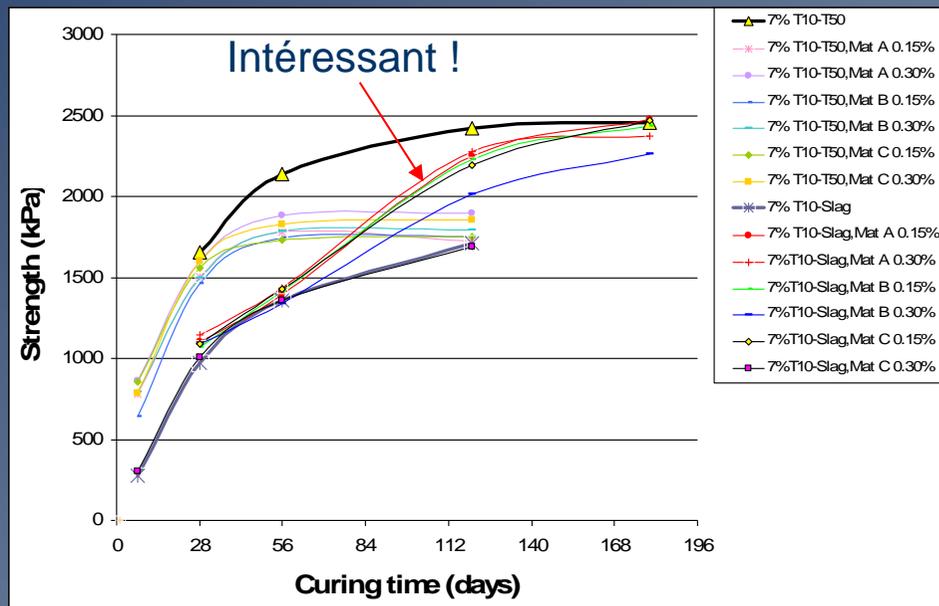
Rejets demeurent saturés en profondeur ...

Possibilité d'ajout de ciments



Gestion des boues dans les remblais

Potentiel d'inclusion des boues de traitement (HDS, rouges) dans les RMPC



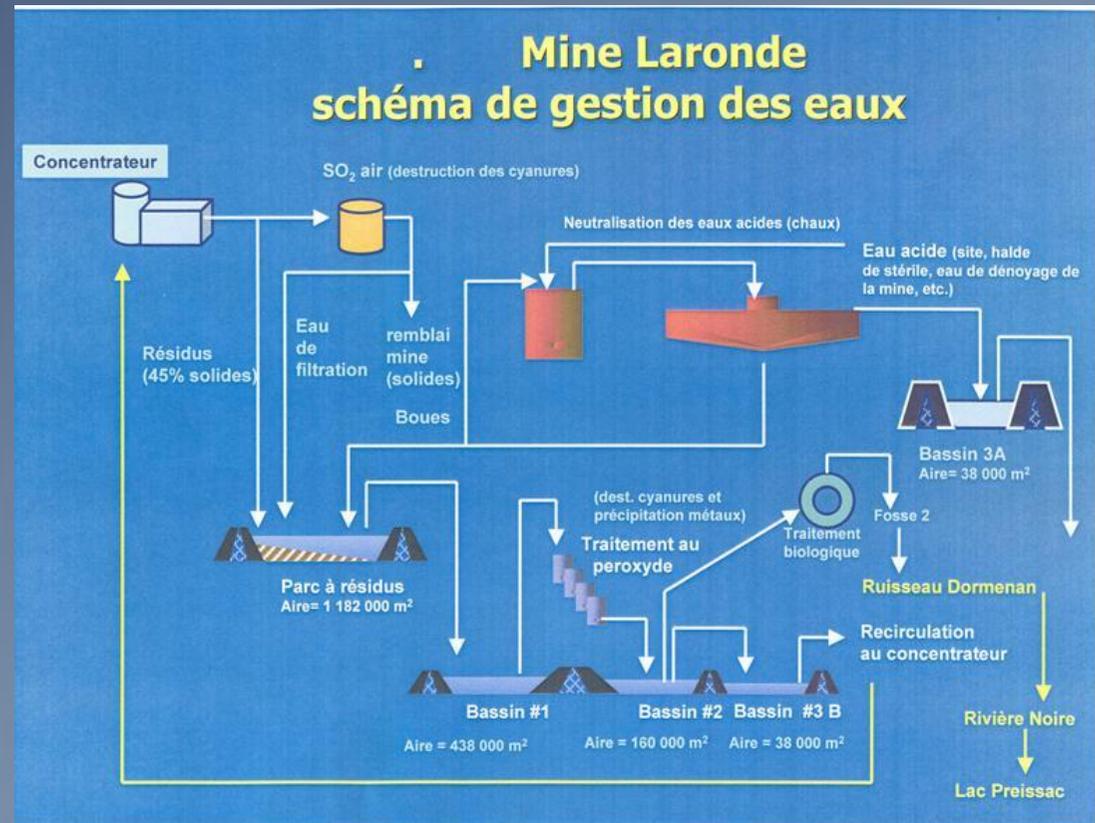
Résistance mécanique

Mélange	Zn (mg/L)
Résidus	0.991
PC10-50 2%	0.037
PC10-50 5%	0.015
PC10-50 7%	0.010
PC10-laitier 2%	< 0.02
PC10-laitier 5%	< 0.02
PC10-laitier 7%	< 0.02

Lixiviation

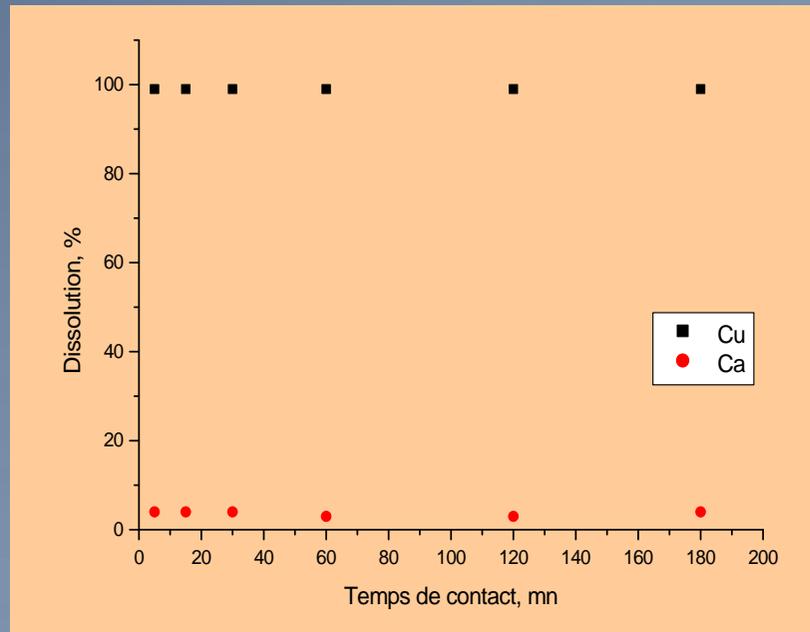
Valorisation des boues de traitement

Potentiel de recyclage de certains métaux comme le cuivre dans les boues de traitement (Degussa)



Valorisation des boues de traitement

- Bonne sélectivité de mise en solution par l'acide sulfurique du cuivre par rapport au calcium.
- La cinétique de mise en solution est totale et rapide,
- Le solide résiduel = gypse, avec de très faibles teneurs en métaux lourds.
- Le cuivre passé en solution peut être extrait soit par diverses méthodes



Résidus + stériles = co-disposition

■ Trois façons de faire (Bussièrre, 2005):

- 1- Les rejets de concentrateur et les stériles miniers sont préalablement mélangés puis déposés
- 2- Les rejets de concentrateur sont déposés en couche intercalant les stériles miniers
- 3- Les stériles miniers sont déposés dans les pacs à résidus.

Différentes méthodes de restauration



Restauration et fermeture de sites

Objectif : remettre le site dans un « état satisfaisant »

1. Éliminer les risques et assurer la sécurité
2. Limiter la production et la propagation de substances polluantes (DMA).
3. Remettre le site dans un état visuellement acceptable et même réutilisable.

Restauration et fermeture de sites

Techniques éprouvées pour la prévention de la production du DMA?

Doivent: éliminer, ou du moins de réduire à niveaux très faibles la disponibilité :

- eau
- sulfures
- air (ou de l'oxygène)
- bactéries ?

Restauration et fermeture de sites

CONDITIONNEMENT DES REJETS	EXCLUSION DE L'EAU	EXCLUSION DE L'OXYGÈNE	NEUTRALISATION	ÉLIMINATION DE L'ACTION DES BACTÉRIES
- Séparation des sulfures	- Couvertures étanches (géomembranes, GCL, etc.)	- Recouvrement aqueux (cours d'eau, bassins artificiels, excavations)	- Agents chimiques (chaux, carbonates, etc.)	- Bactéricides
- Récupération biologique	- Scellants et enduits (polymères, bitume, cires, gels, etc.)	- Recouvrements multicouches	- Agrégats alcalins (épandage, mélange ou tranches)	- Phosphate minéral
- Enrobage	- Sols imperméables (argile compactée)	- Consommation de O ₂ (matière organique)	- Boues alcalines	- Autres
- Autres	- Mélanges (bentonite, ciment, pouzzolanes, etc.)	- Couvertures étanches	- Cendres	
	- Rejets divers	- Autres	- Autres	
	- Autres			

Figure 6.1 Principales mesures de contrôle de la production de DMA (Aubertin et al. 2002)

Approprié en climats (semi) arides

Approprié en climats humides

Restauration et fermeture de sites

Barrières de recouvrements

Fonction principale:

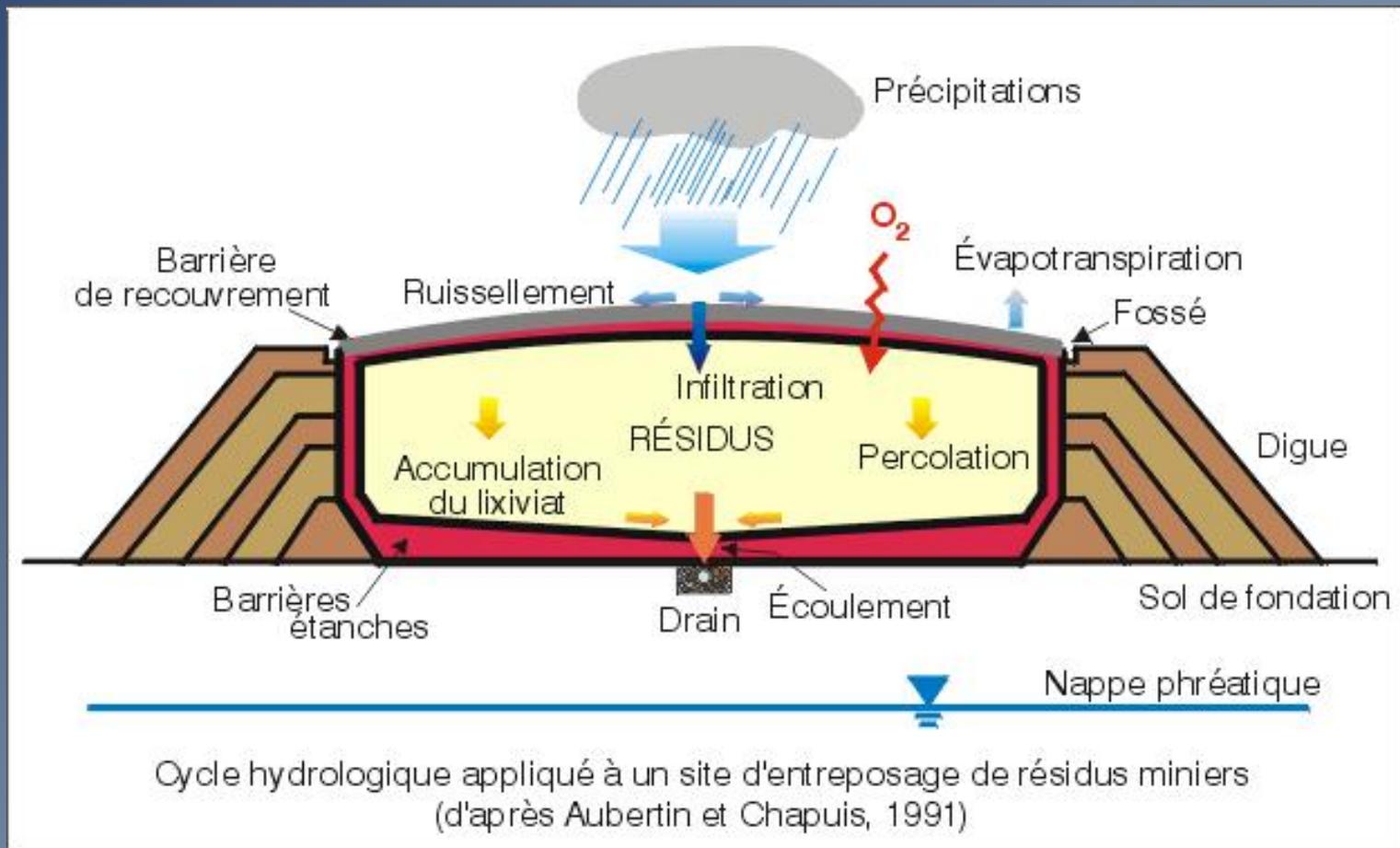
- empêcher les échanges entre les rejets et l'extérieur;
- réduire les infiltrations d'eau;
- contrôler la migration des gaz.

Doit satisfaire diverses exigences, notamment :

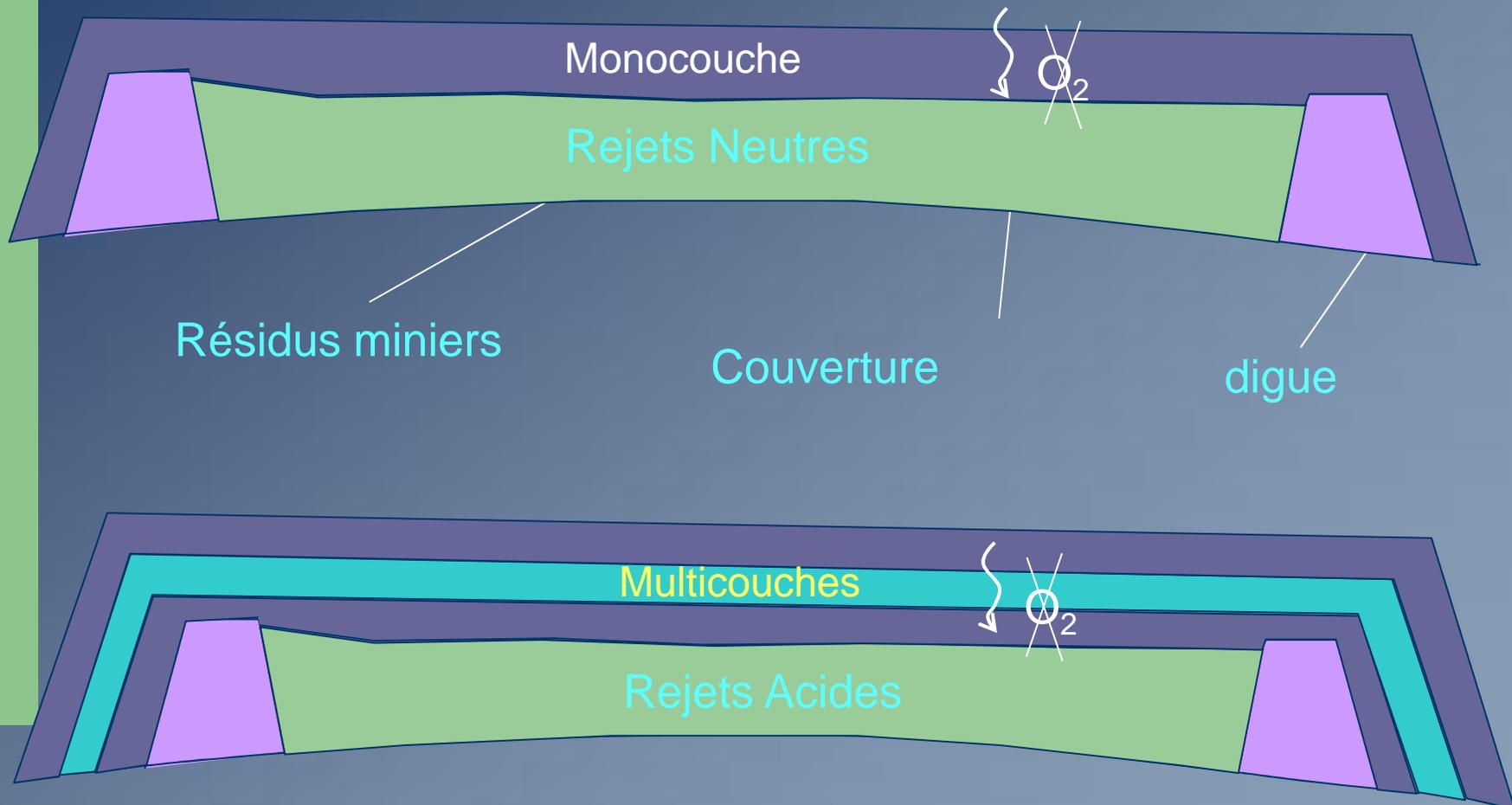
- résister aux phénomènes d'érosion ;
- assurer un ruissellement contrôlé ;
- stabiliser les surfaces ;
- éviter les accumulations d'eau ;
- rétablir l'esthétique du site ;
- faciliter toute utilisation future du terrain.

Restauration et fermeture de sites

Barrières hydrogéologiques et entreposage des rejets



Couvertures sèches



Restauration et fermeture de sites

Restauration par recouvrement en eau

Options possibles:

- **Dépôt subaquatique:** Construire les infrastructures étanches avant la mise en opération et déposer les résidus frais directement dans l'eau (ex. Louvicourt).
 - Utiliser des ouvertures souterraines (chantiers et galeries de mines souterraines) ou ouvertures en surface (mines à ciel ouvert) comme réservoir.
- **Inondation de résidus:** couverture aqueuse est érigée après la vie de la mine (ex. : Solbec-Cupra); possibilité que les résidus miniers aient déjà commencé à s'oxyder; peut nuire à l'efficacité de la couverture.

Restauration et fermeture de sites

Dépôt subaquatique

- Ennoisement à Louvicourt (96 ha)
- 1m d'eau par-dessus les rejets
- 2.5 km de digues



(Courtesy of Air Resources)

11. Aerial View of Active Louvicourt Engineered or Man-Made Tailings Impoundment.

Restauration et fermeture de sites

Inondation de résidus



a)



b)

Plate 9. Quirke Tailings Impoundment

a) Before Flooding b) After Flooding. (Courtesy of Rio Algom)



Restauration et fermeture de sites

Revégétation des sites

- ❑ Tous les terrains ayant connu une activité minière doivent être remis en végétation.
- ❑ La mise en végétation vise à contrôler l'érosion (eau et air) et à redonner au site minier son aspect naturel.
- ❑ Les caractéristiques de la végétation mise en place doivent se rapprocher de celles que présente la végétation du milieu environnant à l'exception de la végétation de départ, c'est-à-dire qui permet d'établir le substrat organique.

Restauration et fermeture de sites



Restauration et fermeture de sites

Site Lorraine; restauré avec recouvrement CEBC



Restauration et fermeture de sites

Site minier Capelton restauré avec résidus de désencrage et revégété



Notion de gestion intégrée des rejets miniers



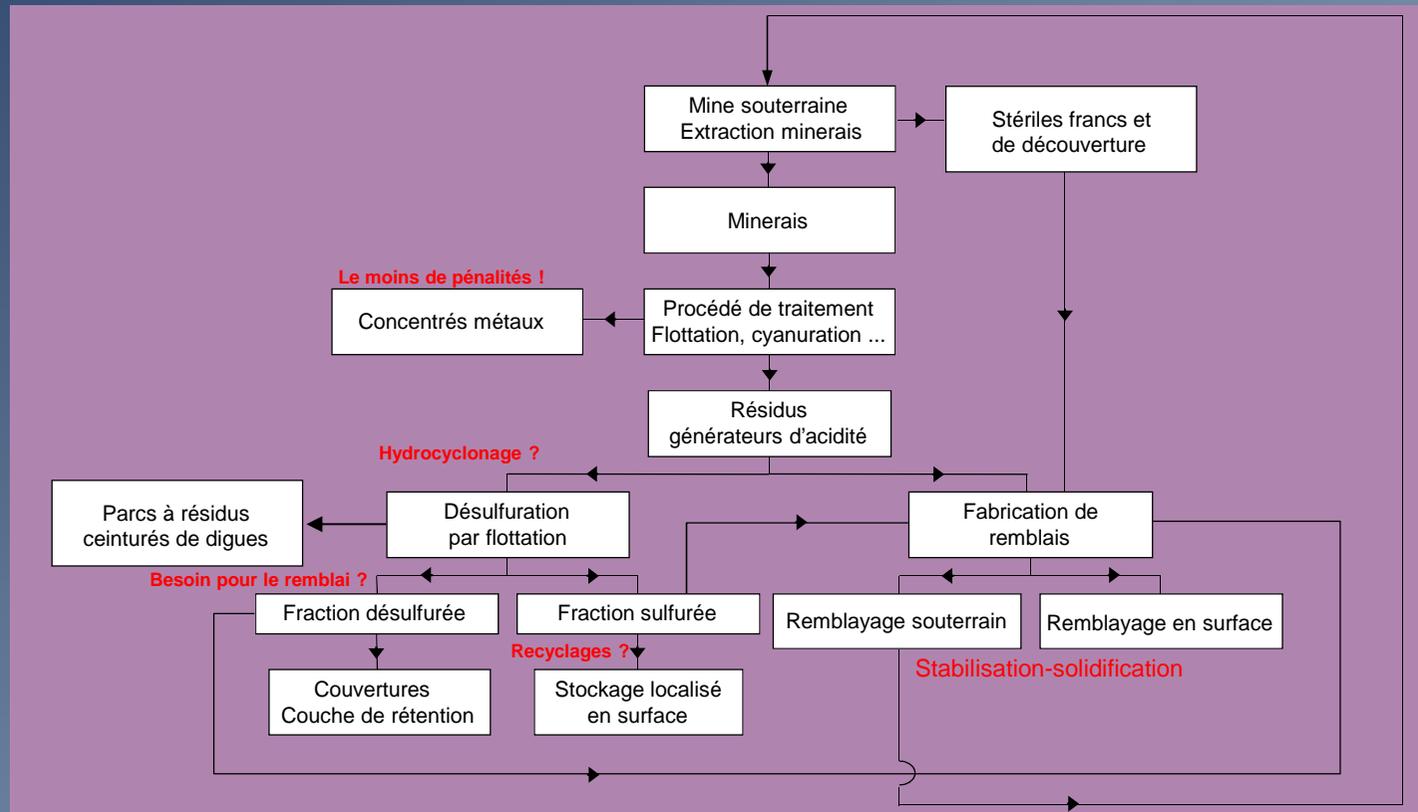
Chaire de recherche du Canada
Gestion intégrée des rejets miniers

Gestion intégrée : objectifs

- Avoir **le moins de rejets** problématiques en surface
- **Réutiliser le plus de rejets** sous forme de remblais ou dans des couvertures
- **Réutiliser le plus d'eau** dans le procédé et traiter au mieux l'effluent final
- **Valoriser le plus possible des rejets** dotés de valeurs

En d'autres termes, il faut viser des mines propres (Clean mines)

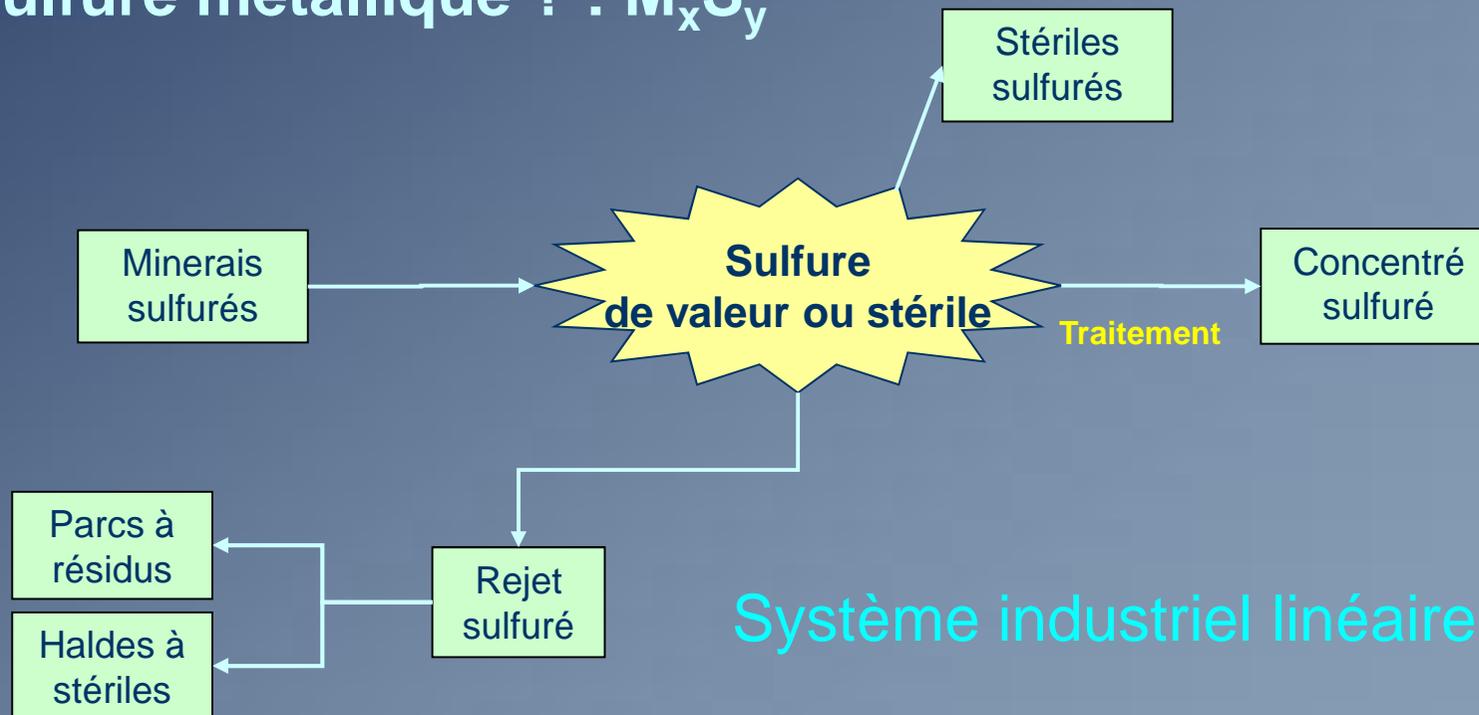
Gestion intégrée des rejets miniers



Drainage minier acide (DMA)

- Aspects environnementaux très variés
- Pour les rejets solides : DMA

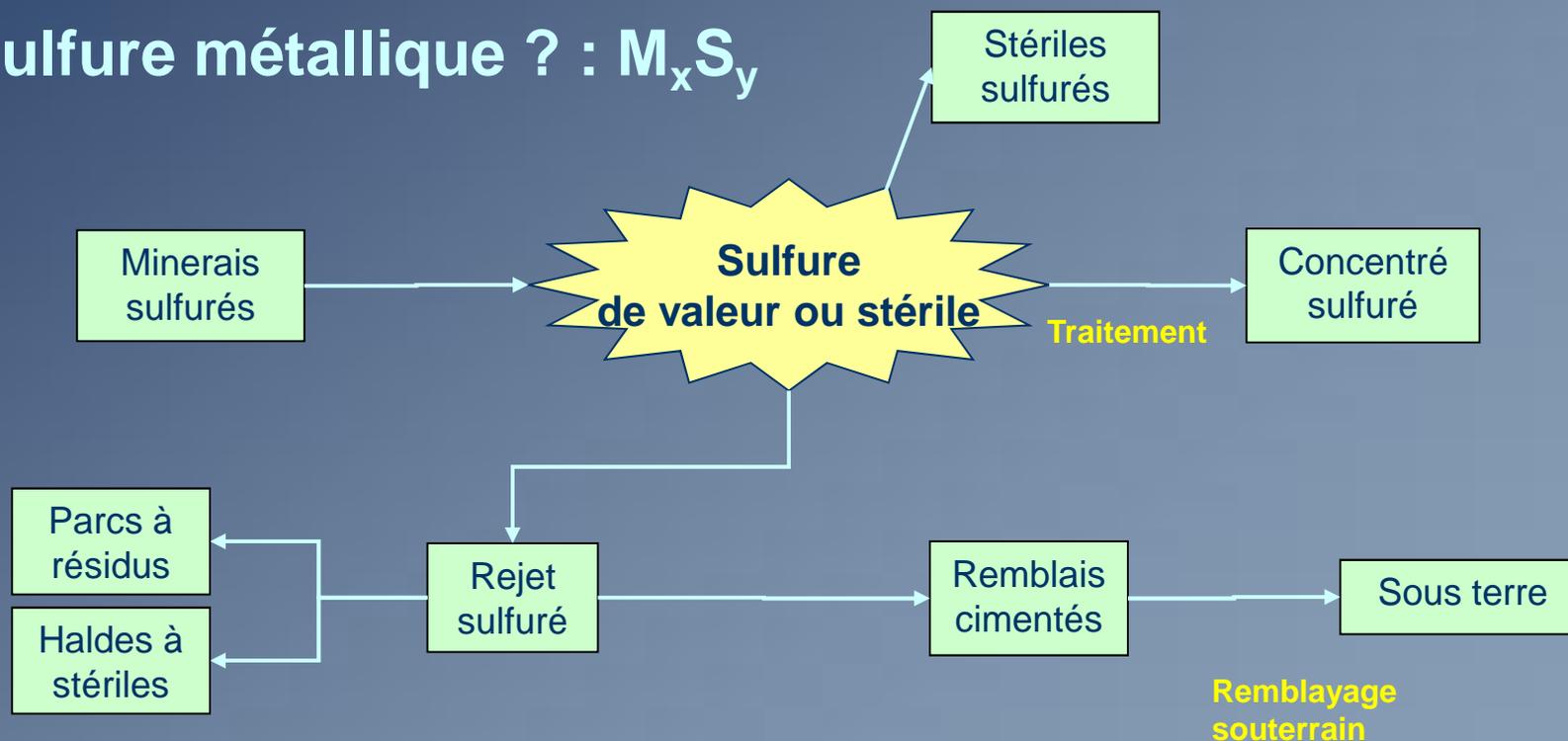
Sulfure métallique ? : M_xS_y



Drainage minier acide (DMA)

- Aspects environnementaux très variés
- Pour les rejets solides : DMA

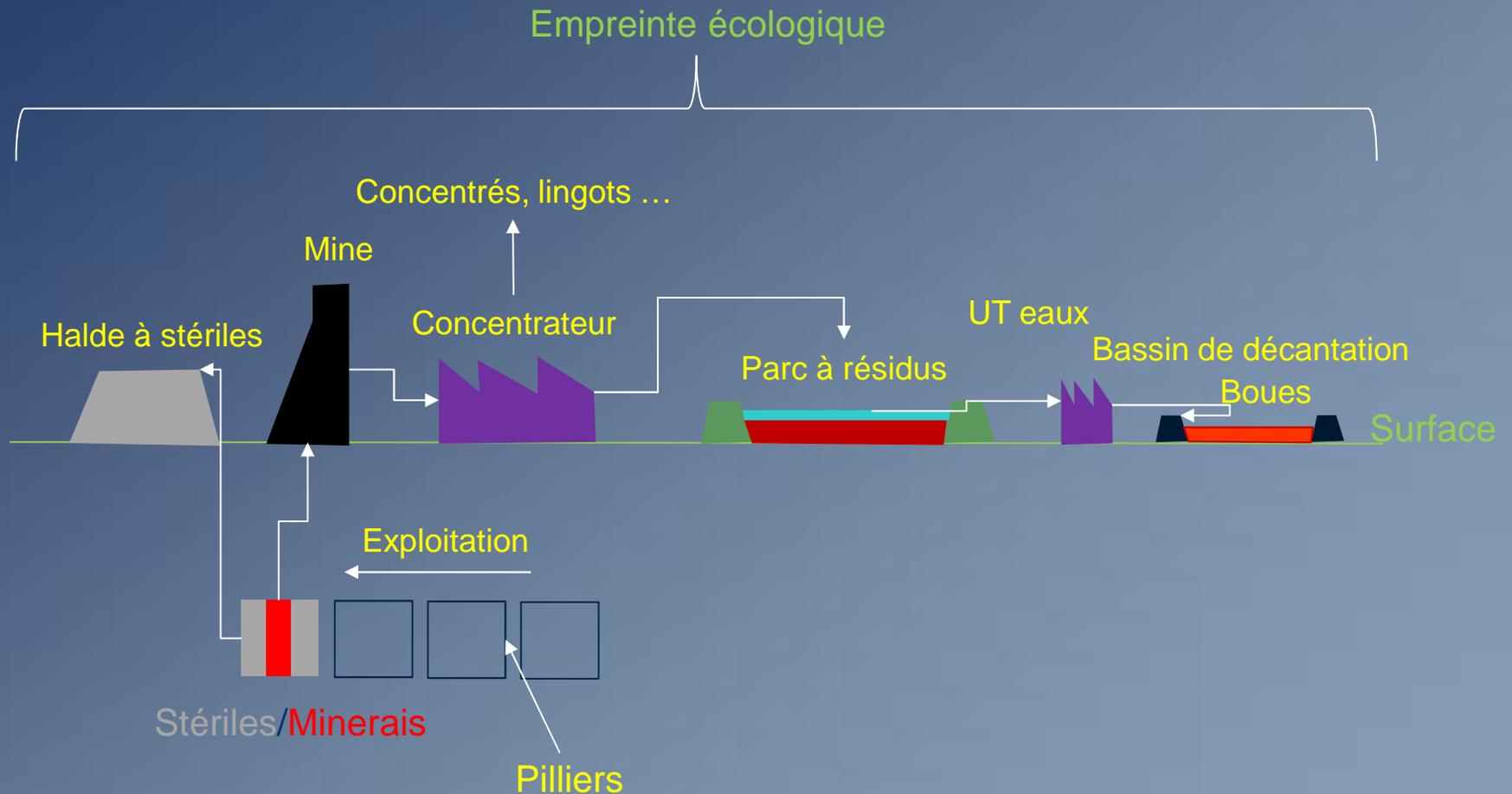
Sulfure métallique ? : M_xS_y



Système industriel circulaire

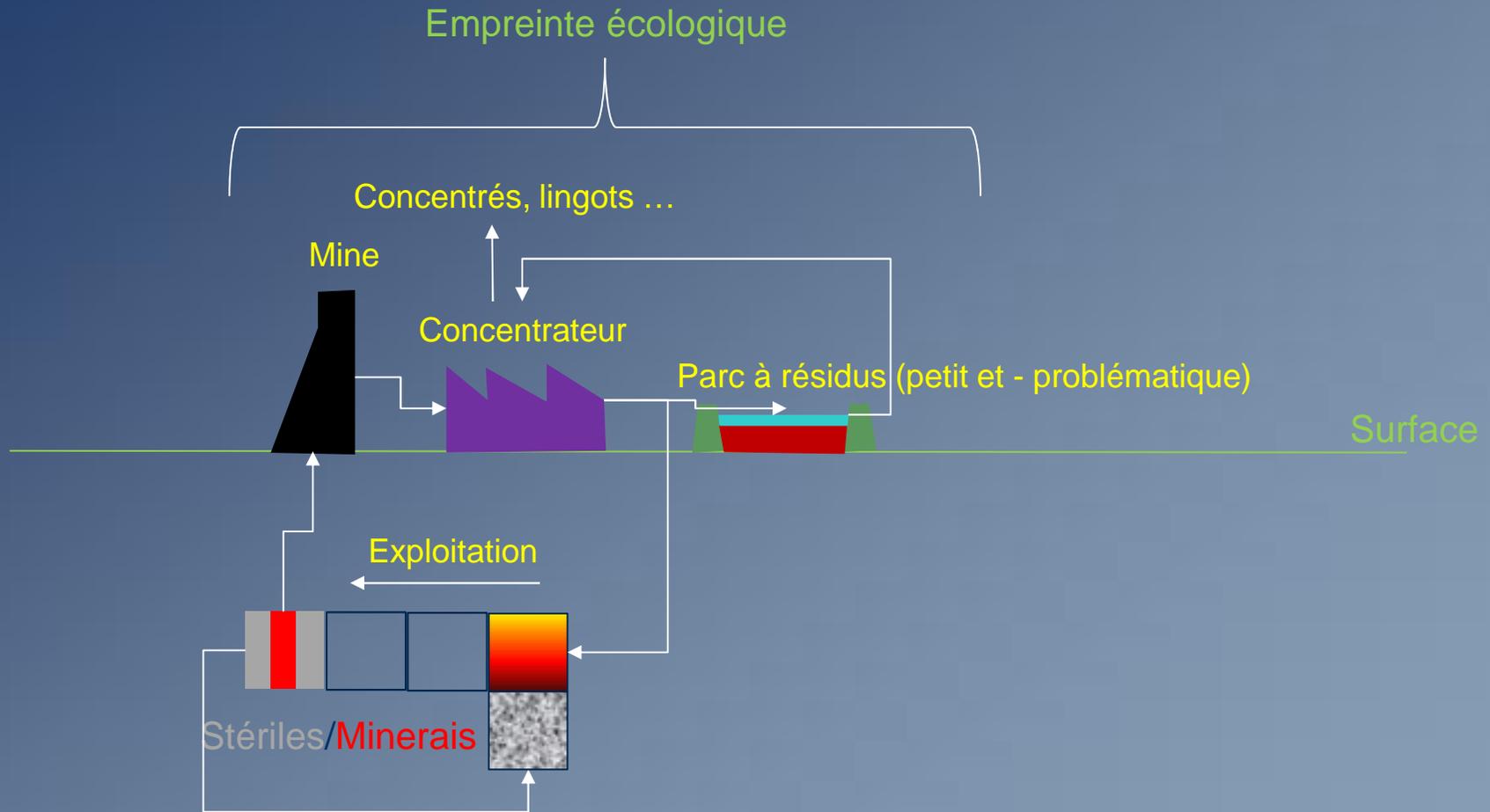
INNOVATION!

Introduction: origine des rejets



Gestion conventionnelle des rejets

Introduction: origine des rejets



Gestion intégrée des rejets

Avantages et inconvénients

Gestion intégrée en amont	Gestion conventionnelle
Facteurs Techniques	
Séparation de la fraction polluante par désulfuration	La totalité des résidus sont problématiques
Meilleur support souterrain grâce au remblai	Support de terrain amoindri à cause des vides
Pas de DMA à traiter	DMA à traiter si les rejets sont réactifs
Possibilité de produire <i>in-situ</i> du matériel pour une couverture	Faut s'approvisionner du matériel pour une couverture
Facteurs économiques	
Parc de moindre superficie	Grande superficie du parc
Moins de digues	Plus de digues souvent hautes et dangereuses
Dépenses de restauration lors de l'opération	Dépenses de restauration essentiellement post-opération
Meilleure exploitation du gisement sous terre	Exploitation incomplète du gisement et surtout des piliers
Facteurs Environnementaux	
Faible superficie perturbée	Grande superficie perturbée
Production de drainage minier quasi absente	Risque de génération de drainage minier
Moins de risque à cause de la stabilité des digues	Risque de rupture de digues en cas de mauvais design
Meilleure gestion de l'eau	Plus de consommation d'eau fraîche sur le site
Recyclage et valorisation possible des boues de traitement	Gestion des boues de traitement nécessaire
Stabilisation de rejets sous terre par les ciments	Eaux d'exhaure à traiter

Exemple fictif



Mine polymétallique: Gestion/restauration

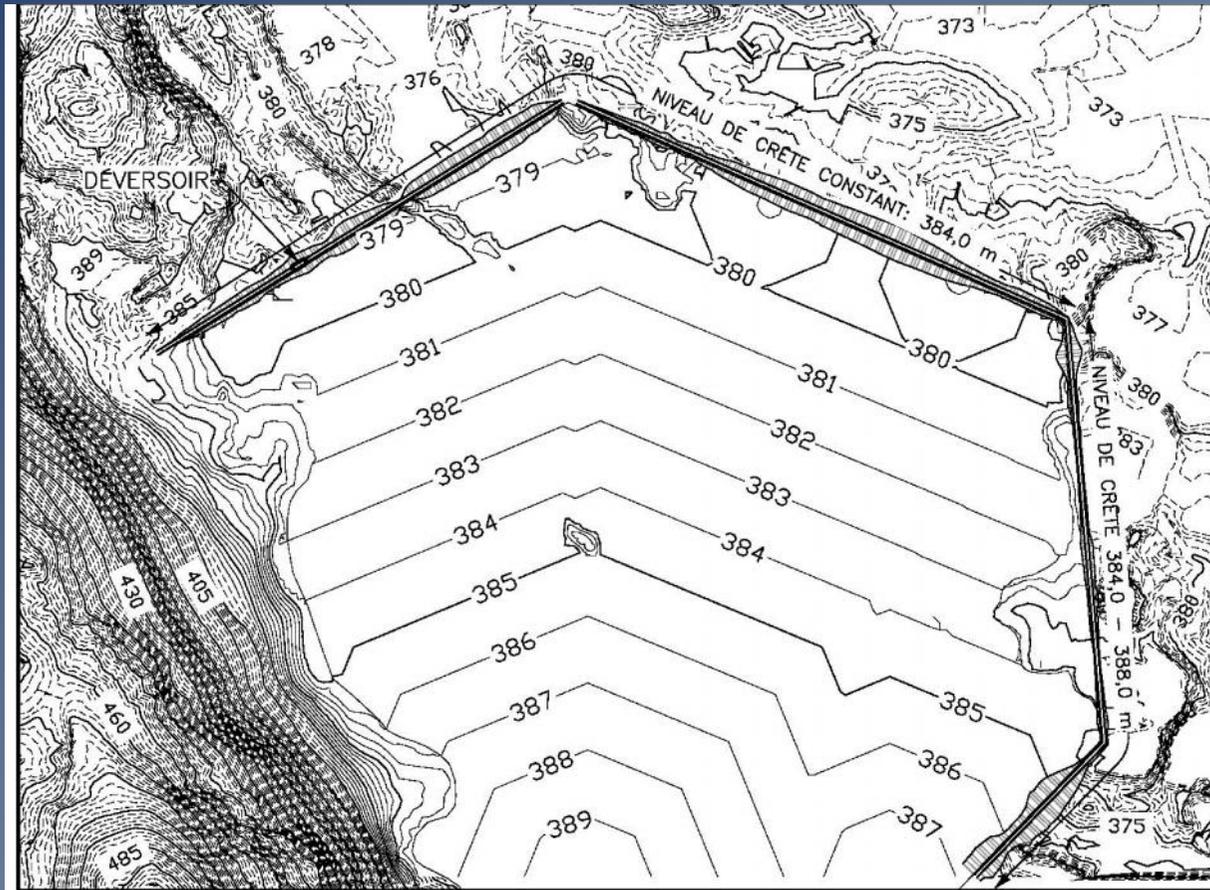
- Objectif : Comparer différents scénarios de gestion/restauration d'un site minier
- Méthodologie : Évaluation des couts de gestion des résidus (\$/m³) pour **une nouvelle mine où le PGA est prouvé**. Quatre scénarios ont été étudiés:
 - Inondation
 - Couverture sèche
 - Désulfuration de la totalité des résidus miniers
 - Désulfuration d'une partie des résidus miniers

Mine polymétallique: Gestion/restauration

Caractéristiques de la mine fictive choisie pour l'étude comparative de différents scénarios de gestion/restauration

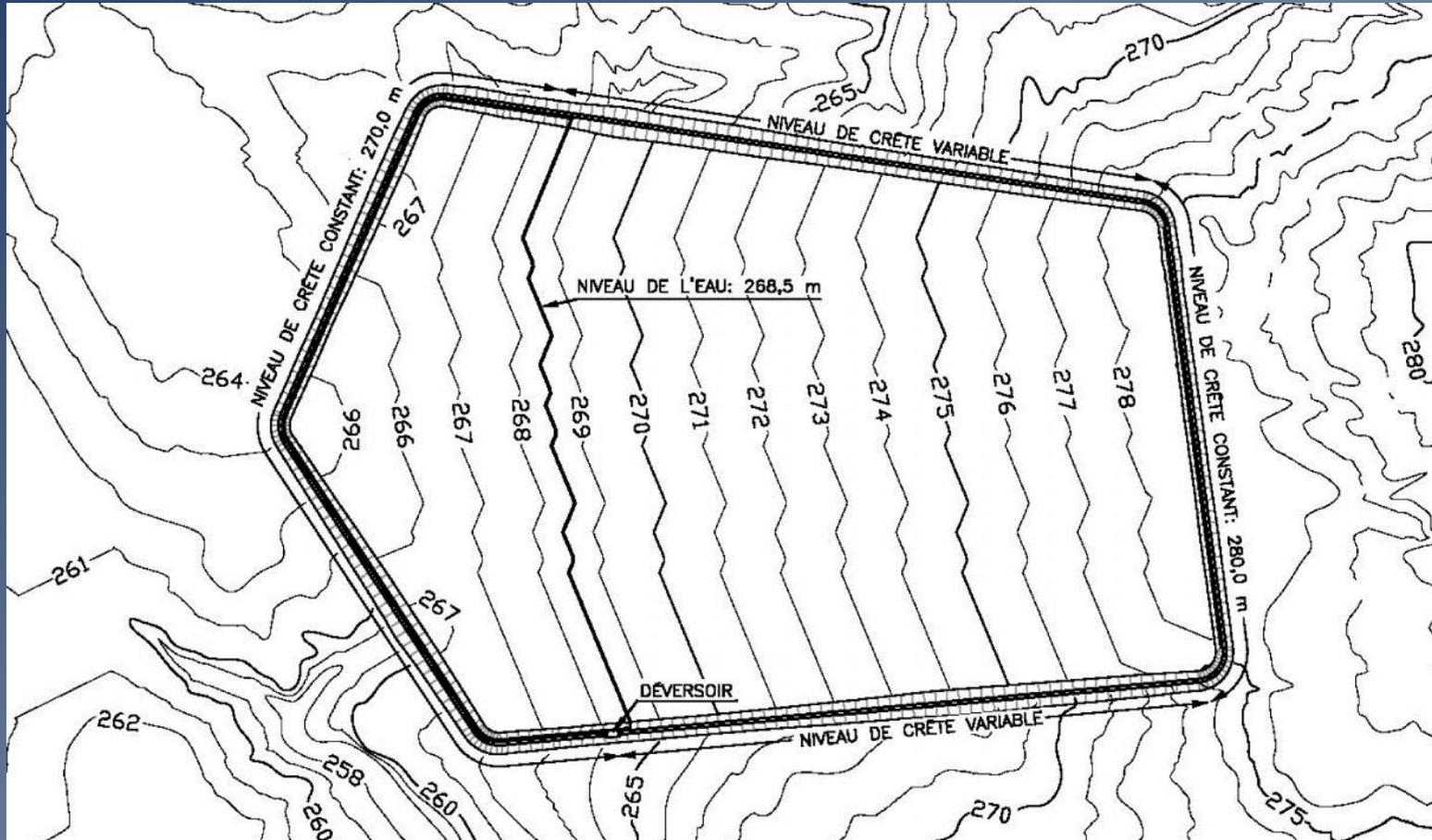
Ore reserves	25 M m.t.
Ore Grades	3,5% Cu (chalcopyrite) 2,5% Zn (sphalerite) 1 g/t Au
Tailings Sulphide content	24 % before desulphurisation
Neutralisation potential	40, 90 and 140 kg CaCO ₃ /t (3 scenarios)
Mill capacity	6 000 m.t./day
Mining method	Underground mine, backfilled stopes
Backfill	50% of total tailings used as paste backfill

Mine polymétallique: Gestion/restauration



Site 1 – Site près d'une vallée

Mine polymétallique: Gestion/restauration

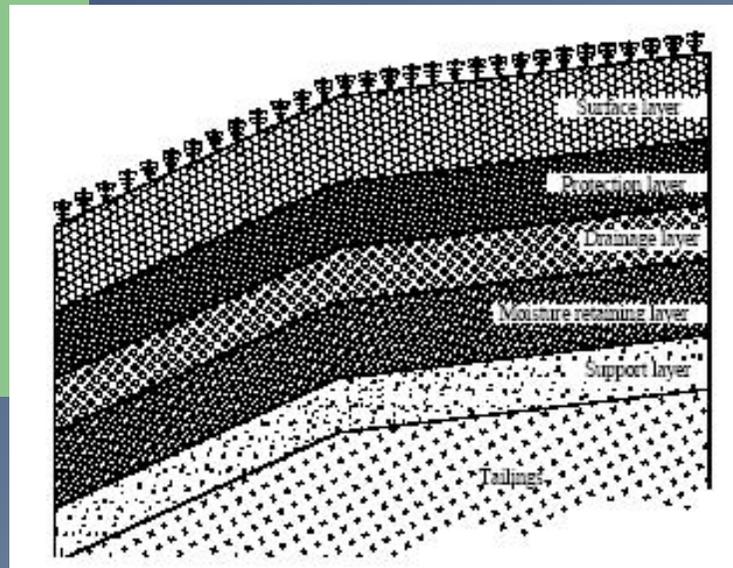


Site 2 – Site à topographie plate

Mine polymétallique: Gestion/restauration

Couverture sèche (CEBC)

- Épaisseur de la couverture variant entre 1,1 à 1,5 m.
- Matériaux de construction viennent d'une carrière située entre 1,5 et 7 km du site.



Mine polymétallique: Gestion/restauration

Couverture d'eau

- Stockage des rejets sous eau pour prévenir l'oxydation des sulfures
- L'épaisseur de la couverture d'eau varie entre 0,8 et 1,2 m.



Mine polymétallique: Gestion/restauration

Désulfuration des rejets miniers

- Séparation des sulfures à partir des rejets totaux utilisant la flottation afin de produire un rejets désulfuré non PGA.
- Le concentré sulfureux peut être utilisé dans le remblais en pâte.
- Différents potentiels de neutralisation sont simulés: NP variant de 40 à 140 kg CaCO₃/t.

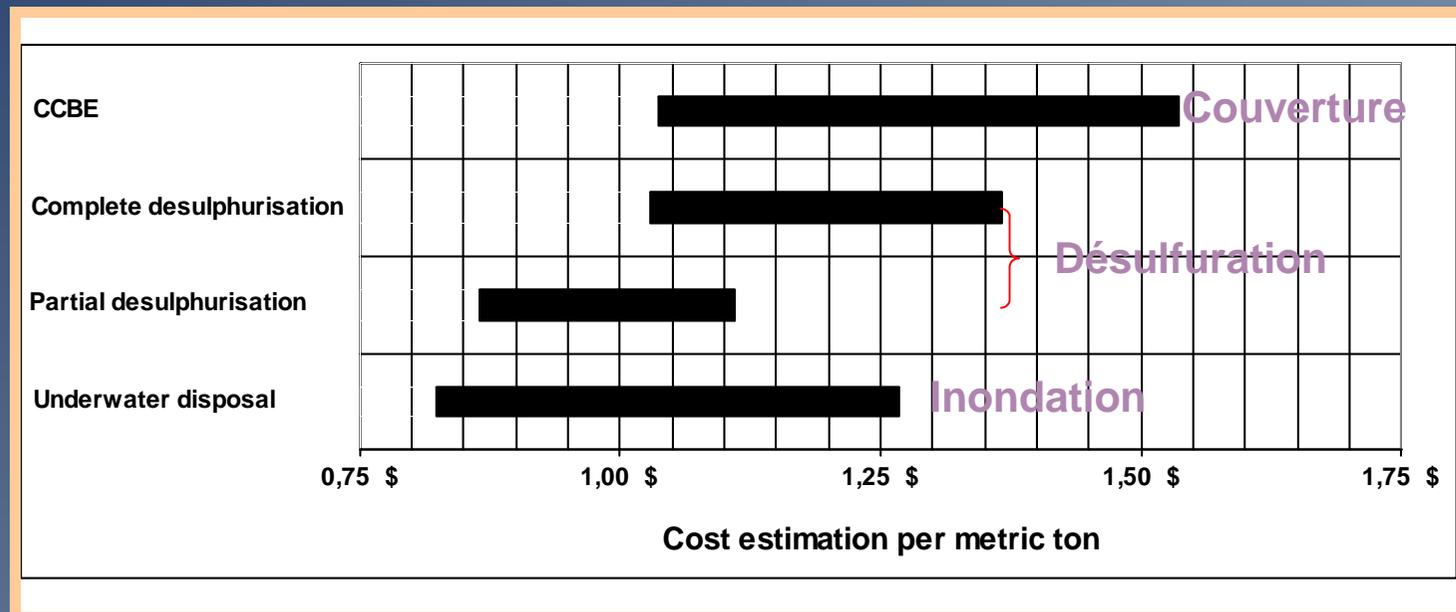
Mine polymétallique: Gestion/restauration

Désulfuration d'une partie des rejets miniers

- Les rejets sont désulfurés uniquement durant les dernières années de l'opération, pour produire un couvert sec non PGA. La couverture est sensée maintenir une nappe phréatique surélevée, qui maintiendra les rejets du bas (PGA) toujours saturés.
- Comme la précédente option, quelques investissements en capital sont nécessaires mais des coûts d'opération bas.

Mine polymétallique: Gestion/restauration

Intérêt de la désulfuration comme technique économique et environnementale



1. L'inondation et la désulfuration partielle sont les plus économiques.
2. La désulfuration totale est viable quand la construction de digues est chère.
3. Il existe un large champs où les différentes techniques sont comparables d'un point de vue économique, donc l'avantage environnemental permettra de les départager.

Conclusion : Avantages d'une gestion intégrée des rejets miniers



Conclusion

- Le vieux dicton : « ***Vaut mieux prévenir que guérir*** », est vrai aussi pour l'exploitation minière !
- Toute exploitation doit envisager une meilleure gestion et un meilleur contrôle des impacts environnementaux durant l'opération !
- Cette façon de faire facilitera la fermeture de site, et surtout économiquement, elle peut être très avantageuse !

Fin : questions et discussions

- Unité de recherche et de service en technologie minérale – **UQAT**



Université du Québec en
Abitibi-Témiscamingue



- Chaire de recherche du Canada en Gestion intégrée des rejets miniers sulfureux par remblayage – **UQAT**



Chaire de recherche du Canada
Gestion intégrée des rejets
miniers sulfureux par remblayage

- Chaire industrielle CRNSG **Poly-UQAT** en Environnement et gestion des rejets miniers

