

Webinaire « Terres excavées »

Comportement des terres pyriteuses excavées

Myriam DUC



**Université
Gustave Eiffel**

Laboratoire GERS - SRO

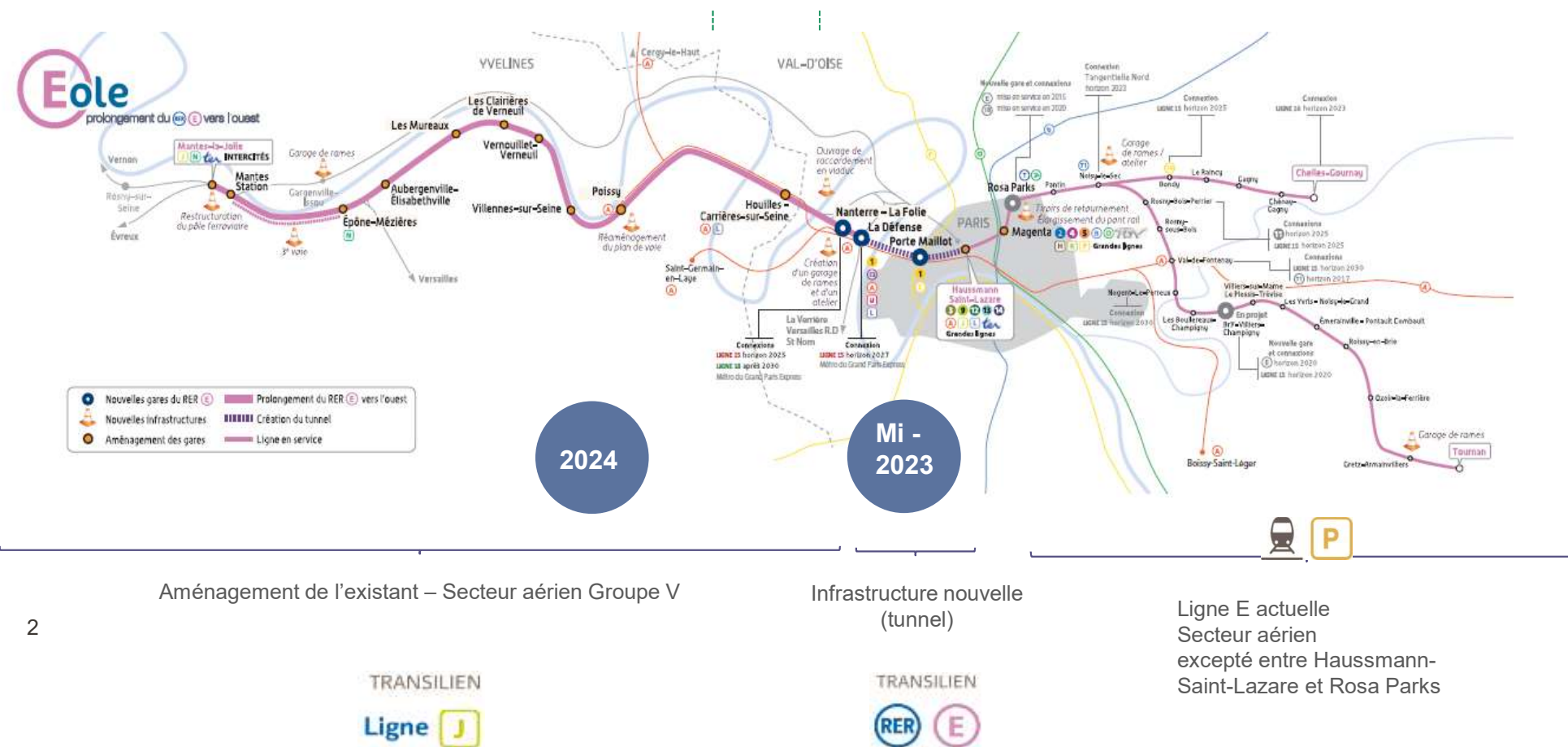
(Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques)

Contexte : creusement au tunnelier du PROJET EOLE

Prolongement du RER E à l'ouest avec:

- réaménagement de la ligne existante entre Mantes-la-Jolie et Nanterre, sur une longueur de 47 kilomètres
- 3 nouvelles gares (à la Porte Maillot, à La Défense-CNIT et à Nanterre)
- Percée d'un **nouveau tunnel d'environ 8 km entre Nanterre et Haussmann Saint-Lazare**

+

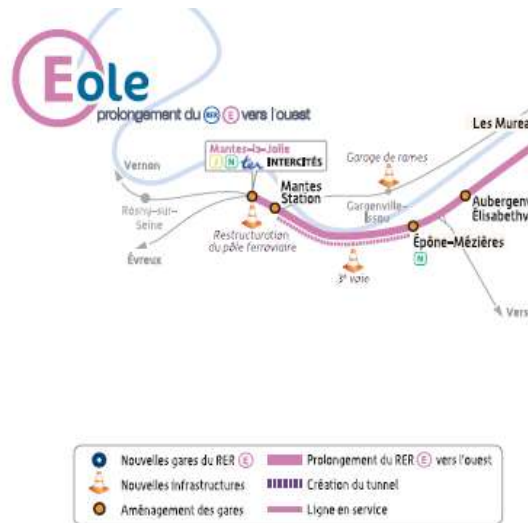


Contexte : creusement au tunnelier du PROJET EOLE

Prolongement du RER E à l'ouest avec:

- réaménagement de la ligne existante entre Mantes-la-Jolie et Nanterre, sur une longueur de 47 kilomètres
- 3 nouvelles gares (à la Porte Maillot, à La Défense-CNIT et à Nanterre)
- Percée d'un **nouveau tunnel d'environ 8 km entre Nanterre et Haussmann Saint-Lazare**

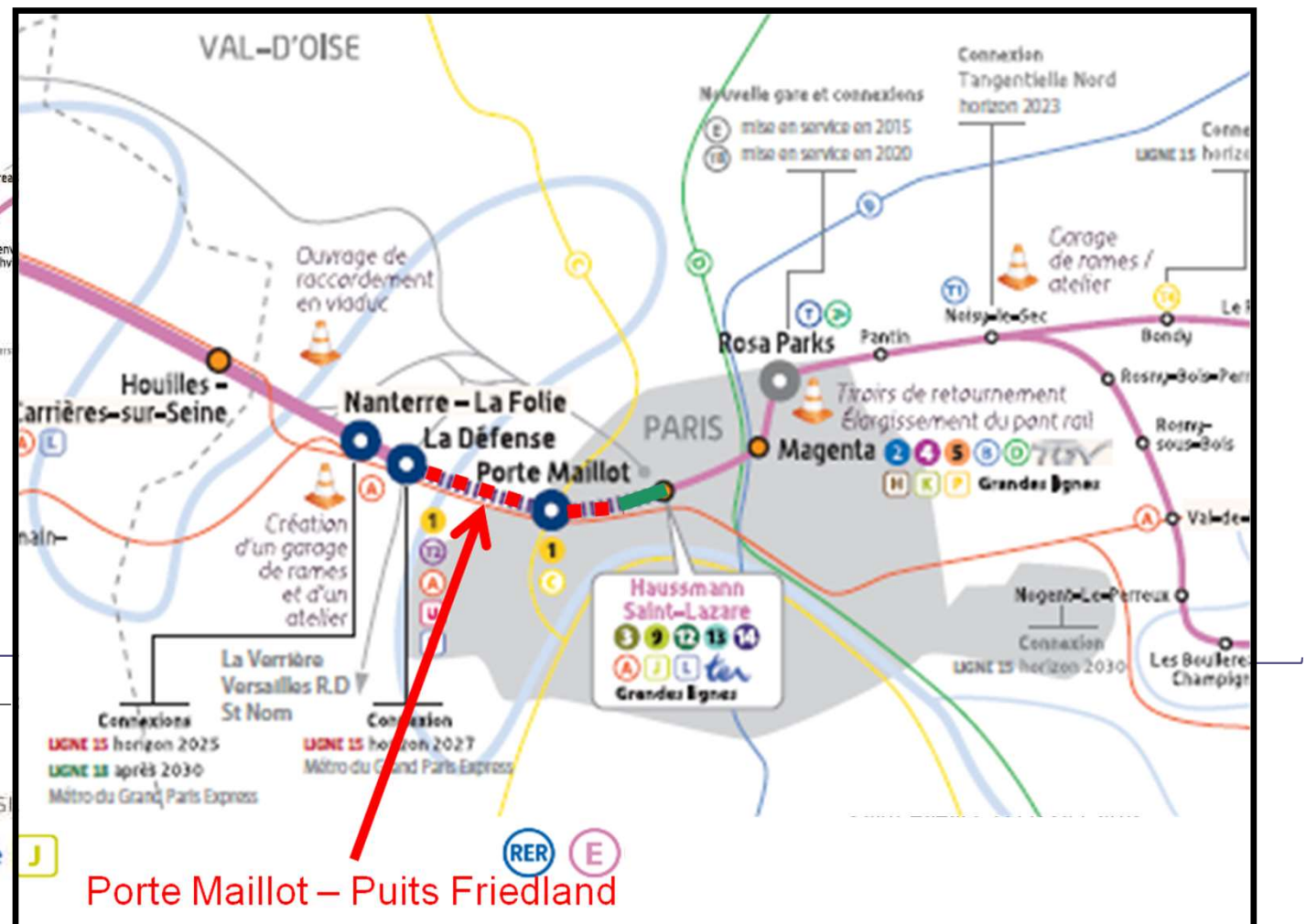
+



Aménagement de l'existant

3

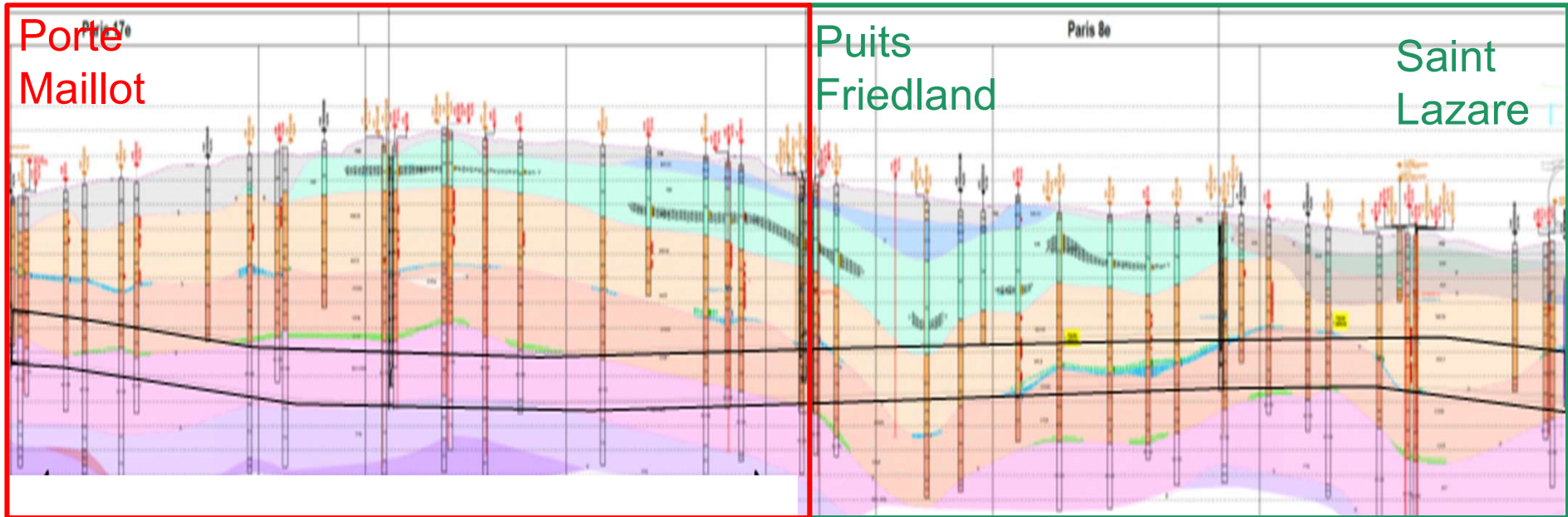
TRANS
Ligne J



Géologie et terrains traversés par le tunnelier : creusement dans les couches de l'Yprésien

Sables de Cuise, sable supérieur,
Fausses Glaises

Marnes et caillasses, Calcaire
grossier (et calcaire glauconieux),
sable de Beauchamp



Déblais contenant de la pyrite
(environ 1% Fausses Glaises, 69% Sables
Supérieurs, 30% Calcaire Grossier)

Mélange des matériaux réalisé
par le tunnelier de boue

Matériaux excavés : base Seine (sortie des terres)



Transport par barge vers les sites de stockage

Matériaux excavés : base Seine (sortie des terres)

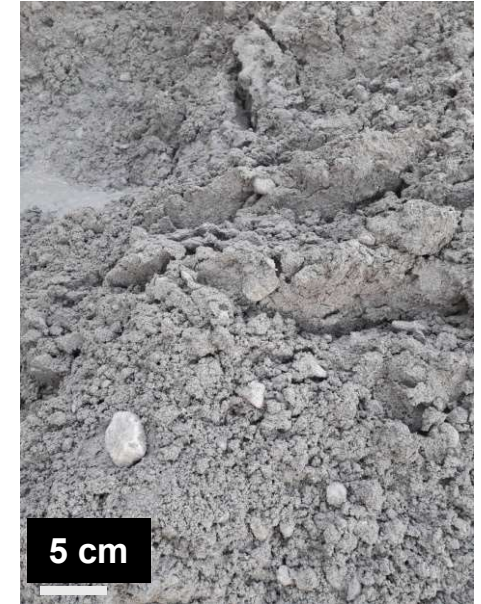
Deux types de matériaux

Sables et Graviers

Galettes

(éléments fins compressés
via filtre presse)

1 barge = 2500 t
= 1 mesure environnementale
= test de lixiviation du pack ISDI



Des sables



Des fines en galettes pressées



Evolution des matériaux pyriteux dans le temps sur site de stockage ou dans les remblais/couche de chaussées

Des impacts environnementaux:

- une coloration ocre/rouge du sol
- possibles odeurs d'œuf pourri (H_2S)
- écoulement d'eau à pH acide (pH2)
- augmentation des sulfates dans les eaux lixiviées

Pyrites



Des impacts géotechniques

- Possible réaction entre les matériaux cimentaires (traitement de sol) et les sulfates >> gonflement

Zone de stockage située à Saint-Martin-la-Garenne,
près de Mantes-la-Jolie, dans les Yvelines



<https://www.lefigaro.fr/flash-eco/pollution-evacuation-en-banlieue-parisienne-de-240-000-tonnes-de-deblais-20211103>



Gonflements en Septembre 1998
+ 1 mois

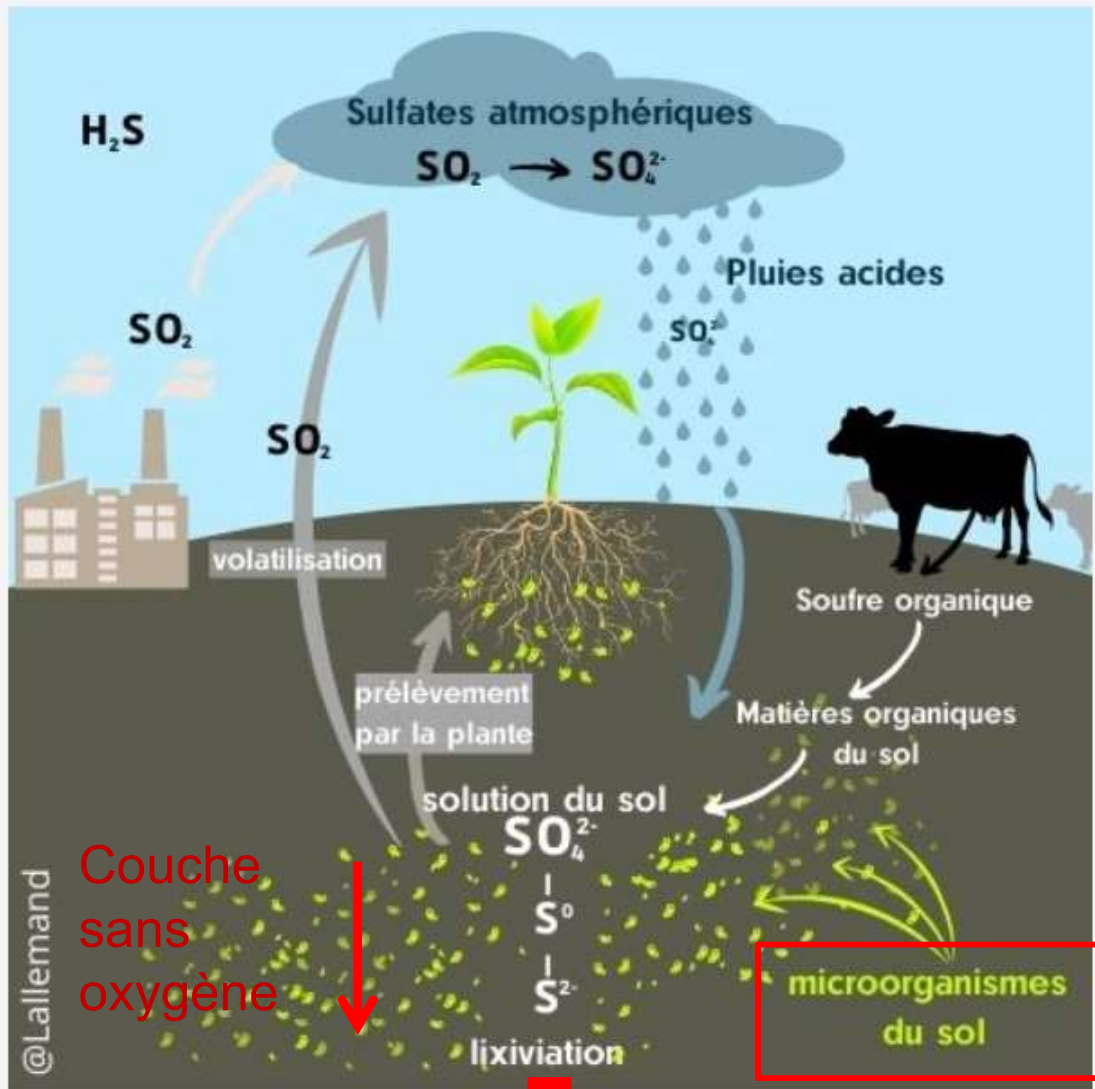


Gonflements en Mars 1999
+ 7 mois

Pyrite, matière organique et traitement de sol font mauvais ménage
sur l'A28 (Y. Boussafir, M. Boussafir)

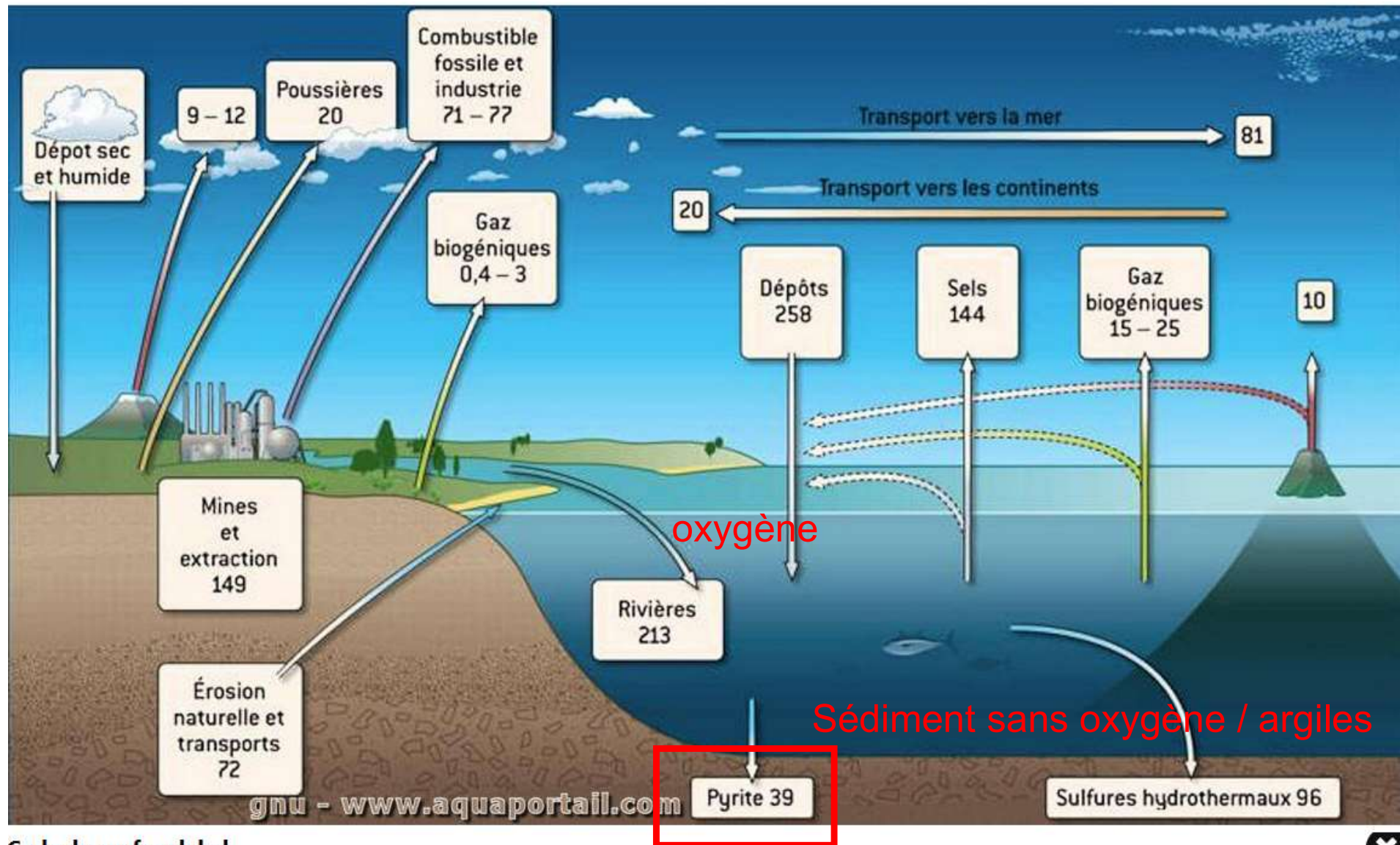
<https://www.cfmr-roches.org/default/files/jngg>

Origine de la pyrite: cycle du soufre



Respiration anaérobie des bactéries
(dégradation de la matière organique)

Origine de la pyrite: cycle du soufre lors de formation des couches géologiques



Cycle du soufre global

Reconnaitre la présence de pyrite



Fausses
glaises de
l'Yprésien
(bassin de
Paris)

Date de la photo = 2014 (état initial humide lors de l'extraction)



Observation
des pyrites

Date de la photo = 2021 (état après séchage au bout de 7 ans)

Figure 6. Carotte du sondage SC 4610 entre 56.5 et 58.5 m de profondeur.



Reconnaitre la présence de pyrite

Pyrite macro (millimétrique) visible
à l'œil nu (couleur forme)

Fausses
glaises /
lignite
(carbone
organique)



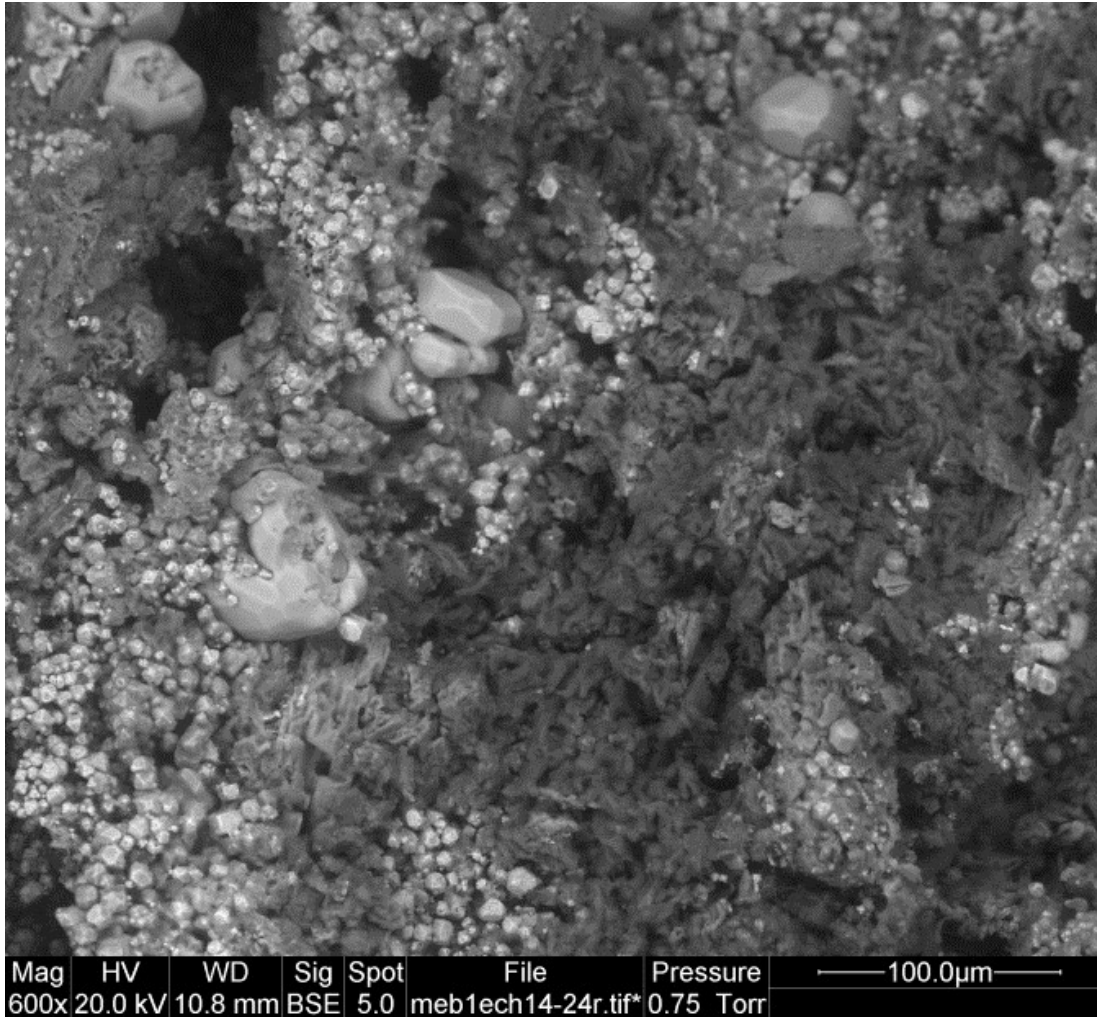
Efflorescence blanche = pas du gypse mais
Rozénite (sel FeSO_4)



Reconnaitre la présence de pyrite

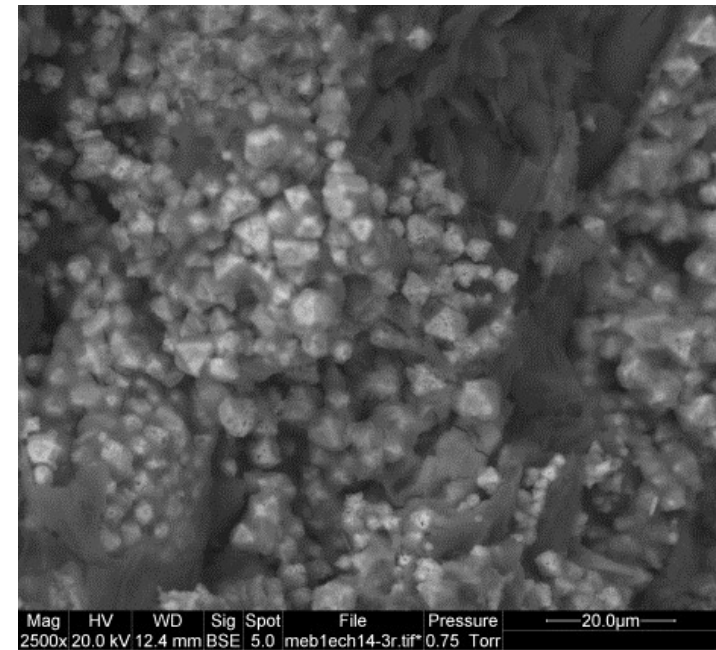
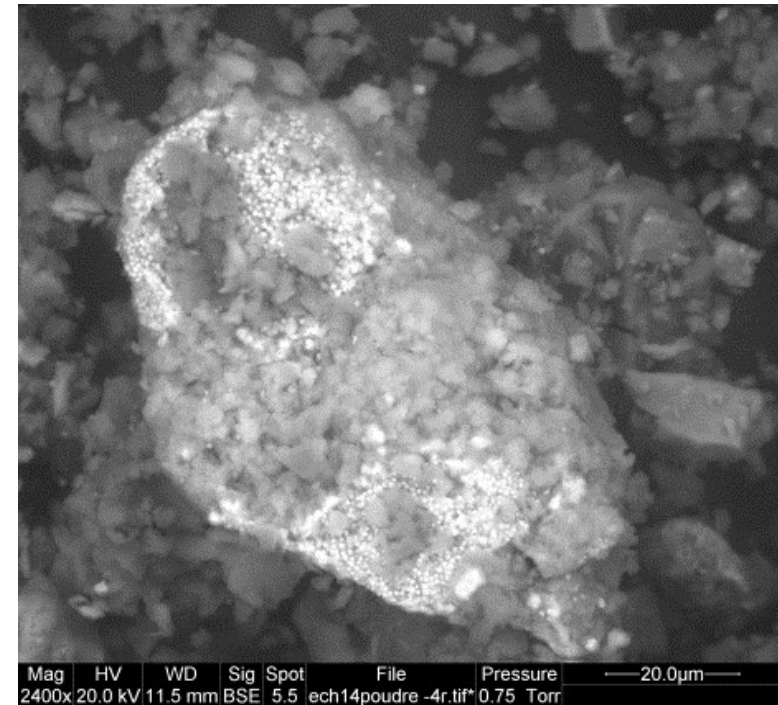
Pyrites framboïdales

Pyrite micro (1 μm) au MEB



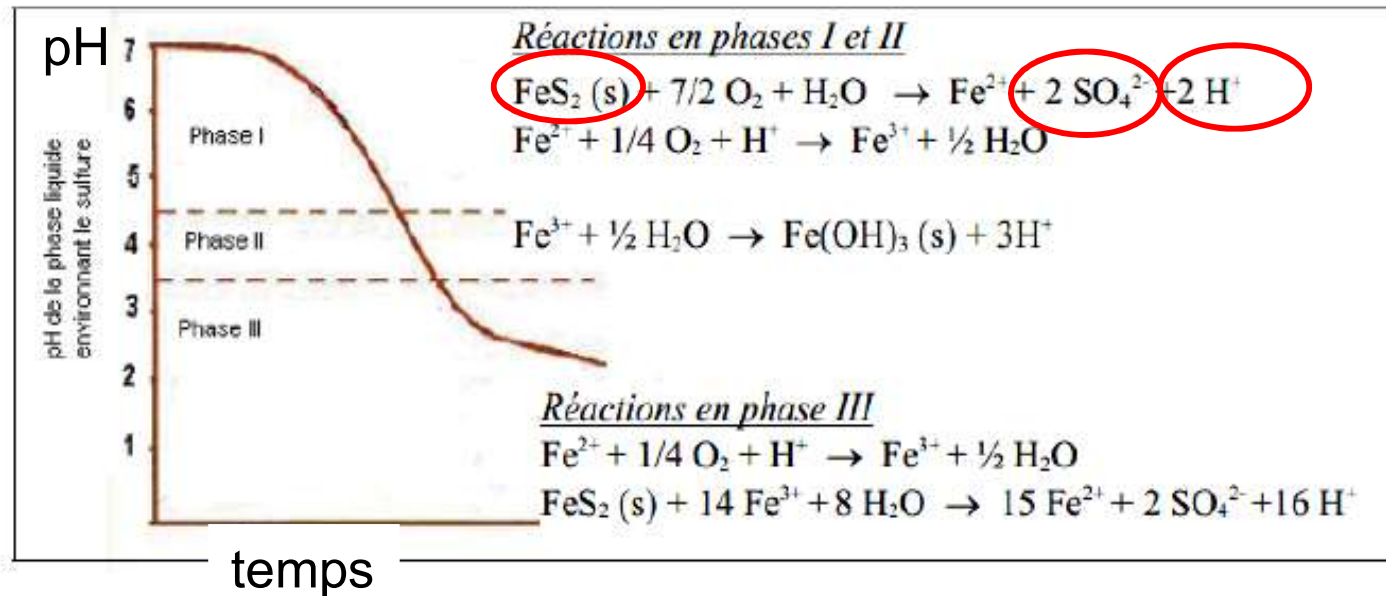
Soufre natif (S^0) possible = points jaunes en surface des éprouvettes sèches et visibles à l'œil nu

Particules de forme
« double pyramide »



Phénomène d'oxydation des pyrites (FeS₂)

Terre fraîchement excavée mise au contact de l'air
= dégradation de la pyrite en présence d'eau ET d'oxygène



Evolution pendant la période de séchage ou d'humidification
pendant la période non saturée (au cours de cycles humides/secs)

Après un certain nombre de cycle : blocage du processus
par PASSIVATION de la surface de la pyrite

La cinétique d'évolution sur site de stockage du phénomène reste difficile à apprécier

Comment gérer les terres pyriteuses (1/3)

Lavage des terres (tri granulométrique pour concentrer les pyrites dans les fines)

Non efficace en présence d'argile peu dispersable et permettant aux fractions fines de rester coller aux fractions grossières

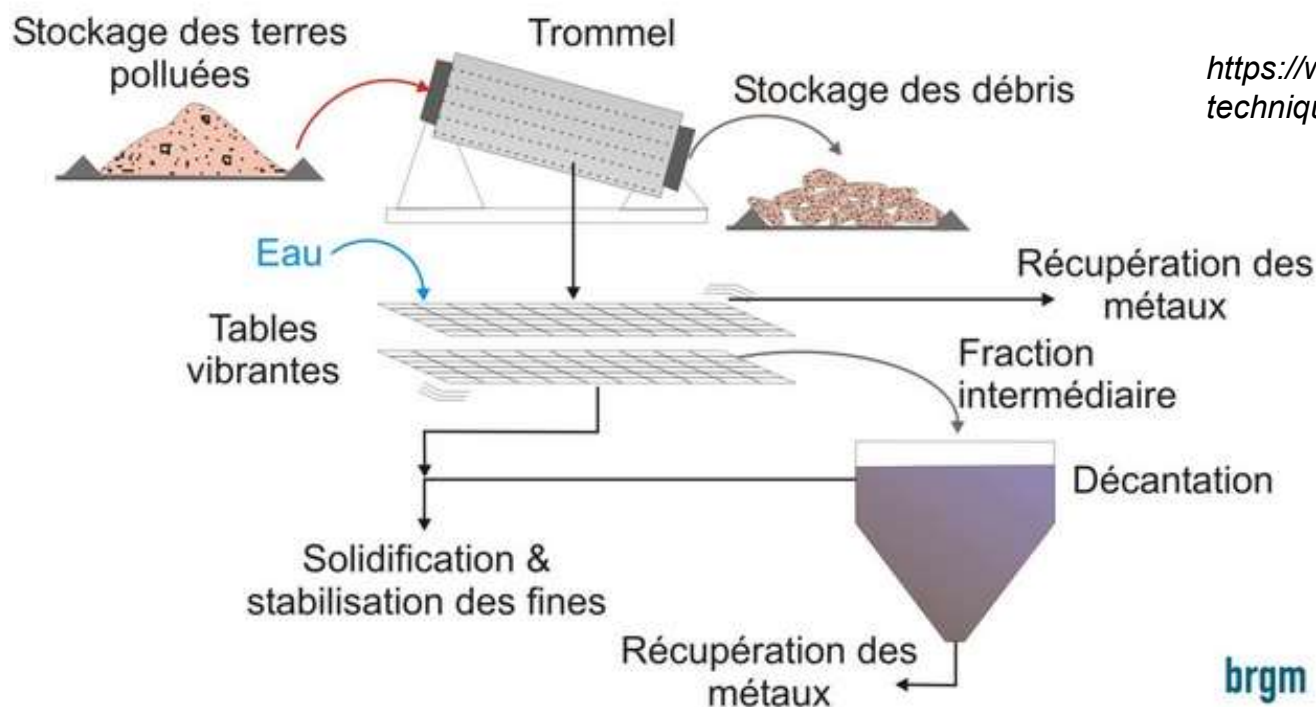


Figure 1 - Schéma de principe du tri granulométrique.

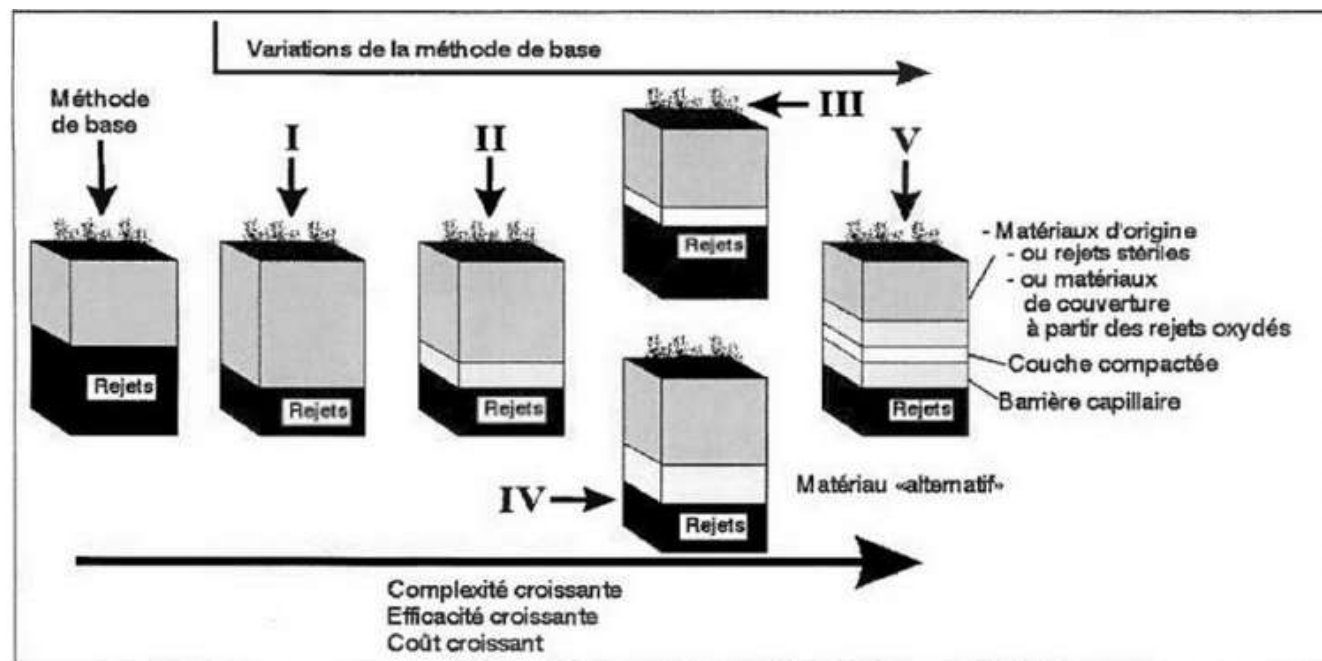
Traitement physico-chimique des terres en utilisant un module de désulfurisation :

Technique couteuse, très technique, longue à mettre en oeuvre

Comment gérer les terres pyriteuses (2/3)

Stockage sur site avec diminution de l'accès de l'O₂ aux pyrites et maintien de la saturation en eau des matériaux

- Immergé sous l'eau – ennoiment (O₂ se dissout peu dans l'eau – faible diffusion)
- Compactage pour conserver la saturation dans les terres (non imposé réglementairement sur les sites de stockage – pas de terrassement)
- Recouvrement par une couche de matière organique (ex copeau bois) agissant comme lit filtrant l'O₂



Thèse Bouzahzah 2013

Figure 7: Systèmes de recouvrement des plus simples (monocouches) vers les plus complexes

Comment gérer les terres pyriteuses (3/3)

Neutralisation avec ajout de carbonates

Correction de l'acidité générée par les pyrites

Privilégier les calcaires/craie à réaction rapide alors que les dolomies (magnésiennes) sont à réaction plus lente

Mélange INTIME d'une fraction fine (de type filler) et de minéralogie contrôlée (Ca, Mg) + compactage adéquat

Phases avec un potentiel neutralisant

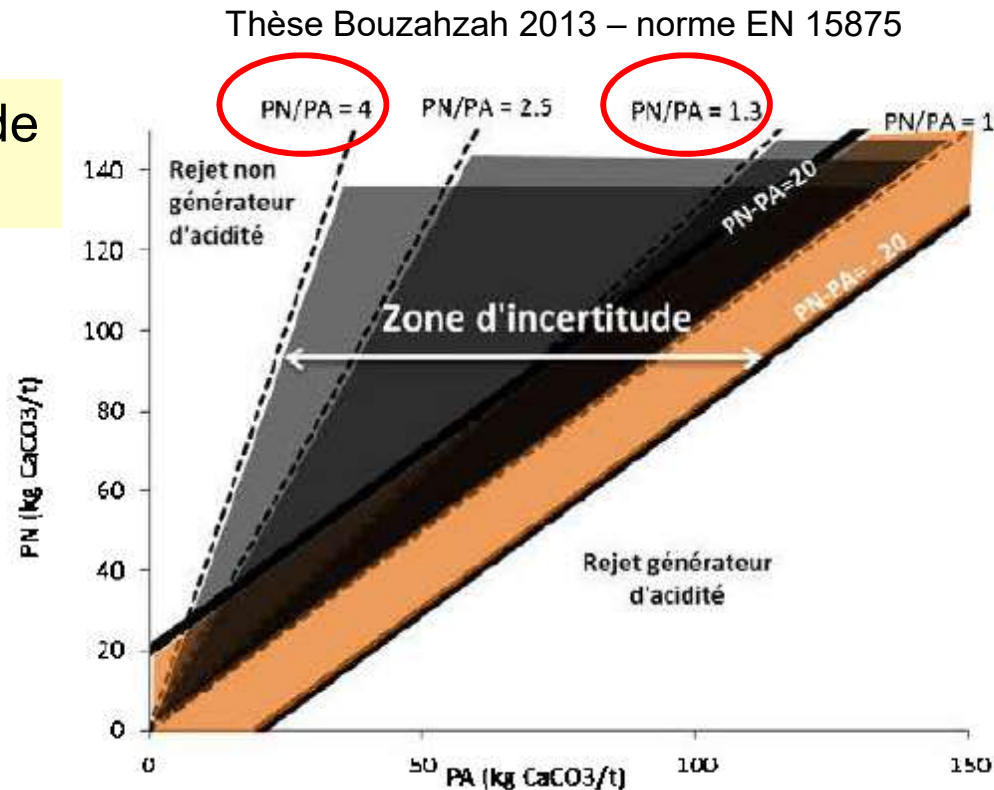
Carbonates	Calcite	CaCO_3
	Aragonite	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Magnésite	MgCO_3
	Ankérite	$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$
	Kutnohorite	$\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$
	Sidérite	FeCO_3
	Smithsonite	ZnCO_3
	Cérusite	PbCO_3
Hydroxydes	Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$
	Manganite	MnOOH
	Goethite	FeOOH
	Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Silicates	Chlorite	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Orthose	KAlSi_3O_8
	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
	Anorthite	$\text{CaNaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
	Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Biotite	$\text{K}(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Neutralisation de l'acide mais les sulfates sont toujours relargués
(teneur en sulfates dans l'eau de site limitée
à 15000-17000 mg SO_4/kg = solubilité du gypse)

Prévoir un site avec un fond géologique adapté (site TN)

Reconnaitre une terre pyriteuse à problème : calcul du rapport NP/AP = potentiel de neutralisation / potentiel d'acidification

NP : quantité de carbonate



Seuil de NP/AP

AP : quantité de pyrite

: définition des zones de génération et de consommation d'acide, et d'incertitude.

Réglementation France : **déchets miniers (DMA)** ≠ **terres excavées** ≠ **carrière**

Circulaire du 22/08/11 relative à la définition des déchets inertes pour l'industrie des carrières

0.1 à 1% en sulfure >> traitement de neutralisation

Il n'est donné aucune indication et aucune justification de l'origine du seuil de 0,1%.

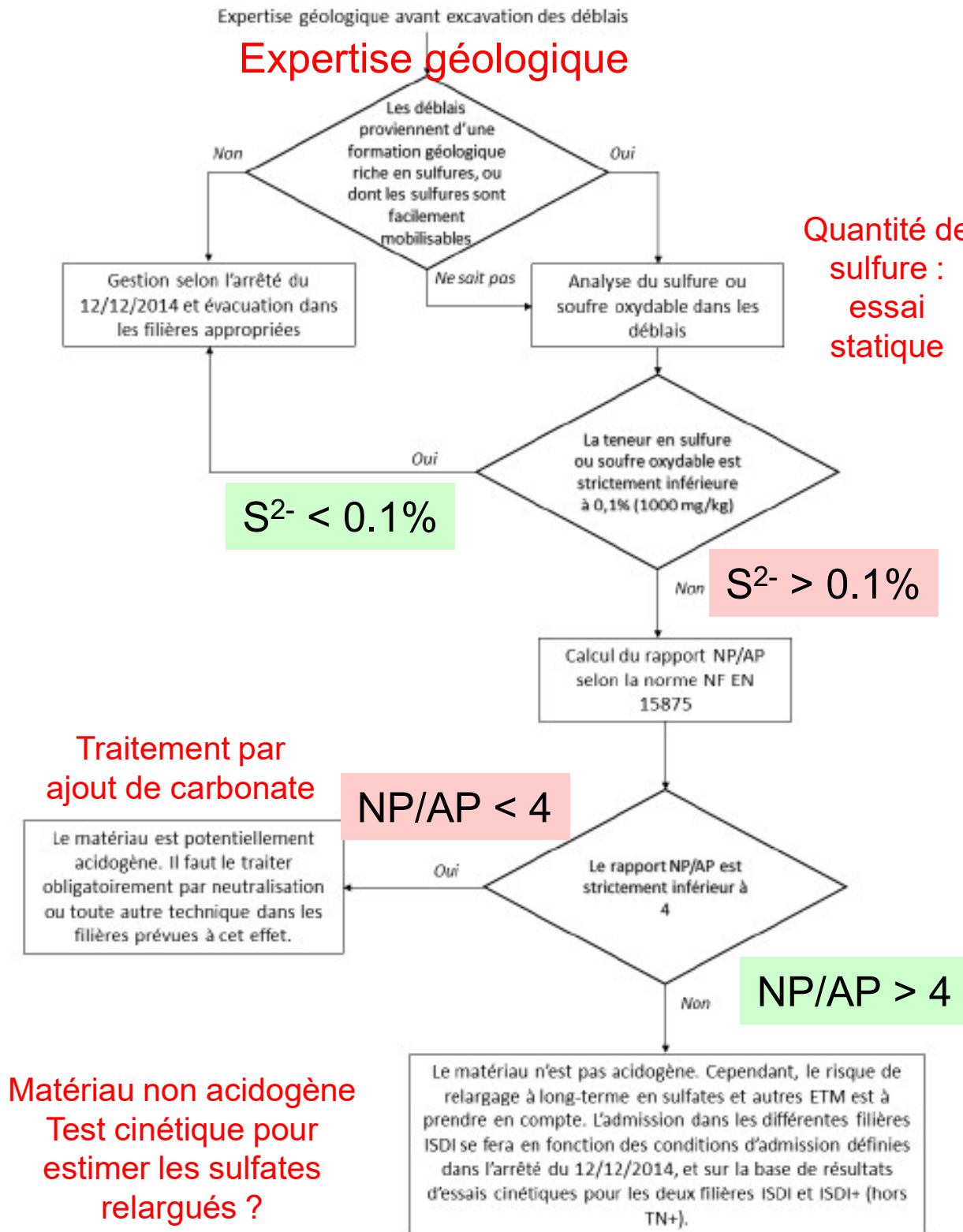
Il semble que ce seuil soit un retour d'expérience de l'industrie extractive.

Expertise géologique

Logigramme proposé par le BRGM pour les terres excavées issues des grands chantiers (dec. 2021)

Quantité de sulfure :
essai statique

Rapport disponible en ligne



Essais de caractérisation

Essai statique - Norme NF EN 15875

une procédure avec plusieurs méthodes analytiques possibles (surtout pour le dosage des neutralisants)
= pas la même sensibilité suivant les techniques
= mesures variables à comparer à des seuils.

FA151039

ISSN 0335-3931

norme européenne

NF EN 15875

Décembre 2011

norme française

Indice de classement : X 30-478

ICS : 13.030.10

Caractérisation des déchets

**Essai statique pour la détermination
du potentiel de génération d'acide
et du potentiel de neutralisation
des déchets sulfurés**

E : Characterization of waste — Static test for determination of acid potential and neutralisation potential of sulfidic waste

D : Charakterisierung von Abfällen — Statische Prüfung zur Bestimmung des Säurebildungspotenzials und des Neutralisationspotenzials von sulfidhaltigen Abfällen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 23 novembre 2011 pour prendre effet le 23 décembre 2011.

Essai cinétique - **CEN/TR 16363**

une procédure non normée (sur 4-5 mois)

>> procédure simplifiée avec certains paramètres non fixés = des résultats potentiellement variables en termes de cinétique de relargage des sulfates et de la passivation des pyrites

normalisation
française

FD CEN/TR 16363

6 Février 2013

Indice de classement : X 30-487

ICS : 13.030.01

**Caractérisation des déchets —
Essais cinétiques pour la détermination
du potentiel de génération d'acide des déchets
sulfurés des industries extractives**

E : Characterization of waste — Kinetic testing for assessing acid generation potential of sulfidic waste from extractive industries

D : Charakterisierung von Abfällen — Kinetische Prüfungen zur Bestimmung des Säurebildungspotenzials von sulfidhaltigen Abfällen der mineralgewinnenden Industrie

Fascicule de documentation

publié par AFNOR.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement le Rapport technique CEN/TR 16363:2012.

Mesure S_{tot} , SO_4 , sulfures, carbonates, NP/AP: **Essai statique**

Méthode UGE – SRO : utilisation d'un analyseur C/S

Calcimètre ou ATD/ATG

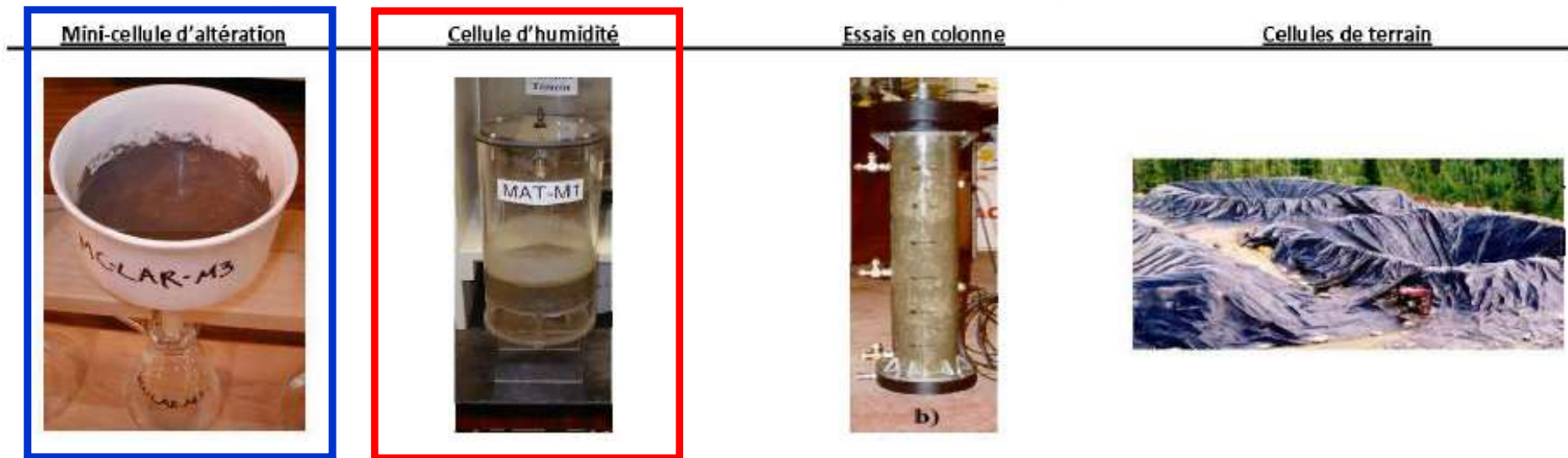
Analyseur C/S
(analyse avant et après attaque
acide à chaud)

Analyseur C/S
avant/après extraction des
sulfates solubles à l'acide à
chaud
(idem NF P 1744-1)

Norme NF EN 15875

Exemple							Calcul mathématique non représentatif de ce qui se passe réellement sur site
Anneau	CaCO ₃ %	S ²⁻ %	NP	AP	NP/AP	Potentiel Generation Sufate mg/kg	
Ech1	29,2	0,17	5,84	0,10625	55	5100	ISDI 1000 ISDI + 3000 TN / TN+ jusqu'à 22000
Ech2	31,9	0,21	6,38	0,13125	49	6300	
Ech3	36,7	0,35	7,34	0,21875	34	10500	
Ech4	38,3	0,31	7,66	0,19375	40	9300	
Ech5	32,4	0,33	6,48	0,20625	31	9900	
Ech6	34,3	0,21	6,86	0,13125	52	6300	
Ech7	36,9	0,12	7,38	0,075	98	3600	
Ech8	35,4	0,1	7,08	0,0625	113	3000	
Ech9	40,7	0,19	8,14	0,11875	69	5700	
Ech10	39,2	0,32	7,84	0,2	39	9600	
valeur moyenne	35,5	0,23	7	0	58	6930	

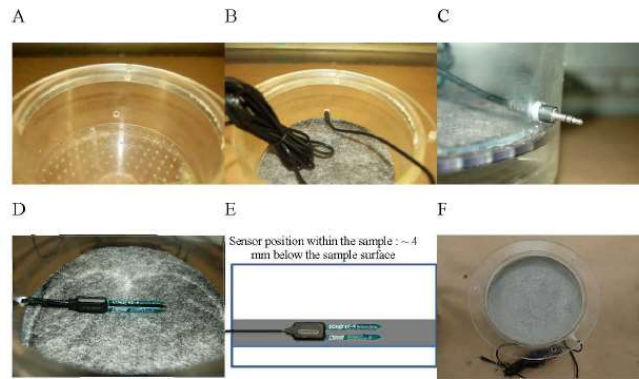
Cinétique de relargage, taux de conversion S^{2-}/SO_4 : Essai cinétique



Test cinétique (CEN/TR 16363)

test en cellule humide (20 sem. au min)

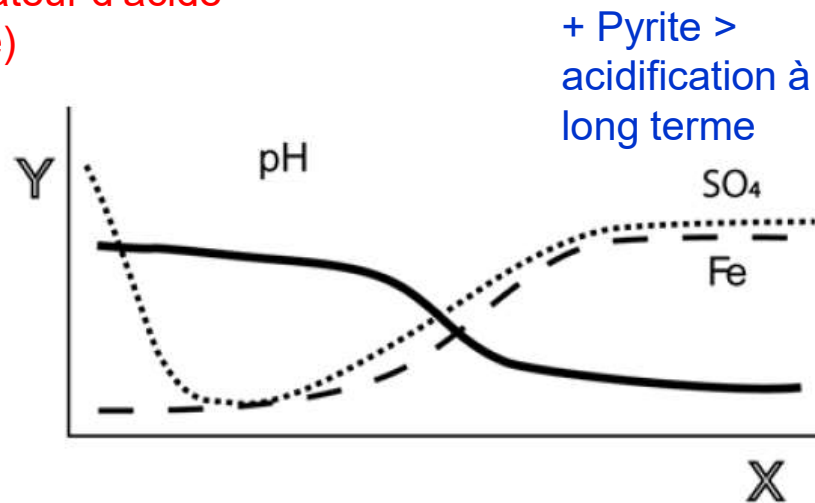
- test en colonne
- test simplifié en mini cellule d'altération (RH% et T°C non contrôlée)



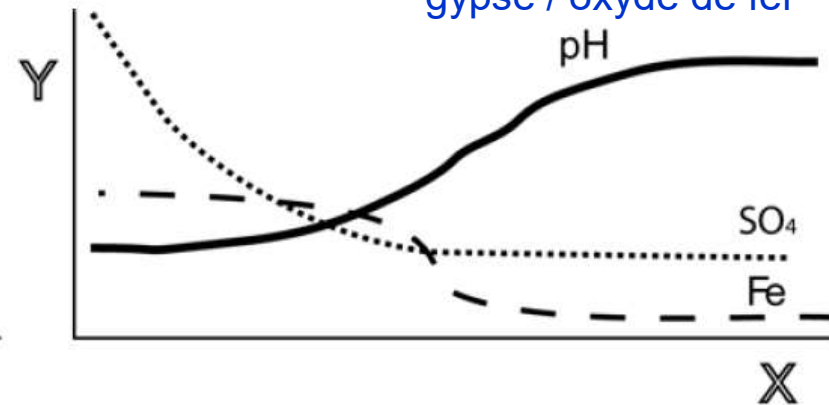
Test d'humidité de cellule

Résultats des essais cinétiques : une variété de comportement

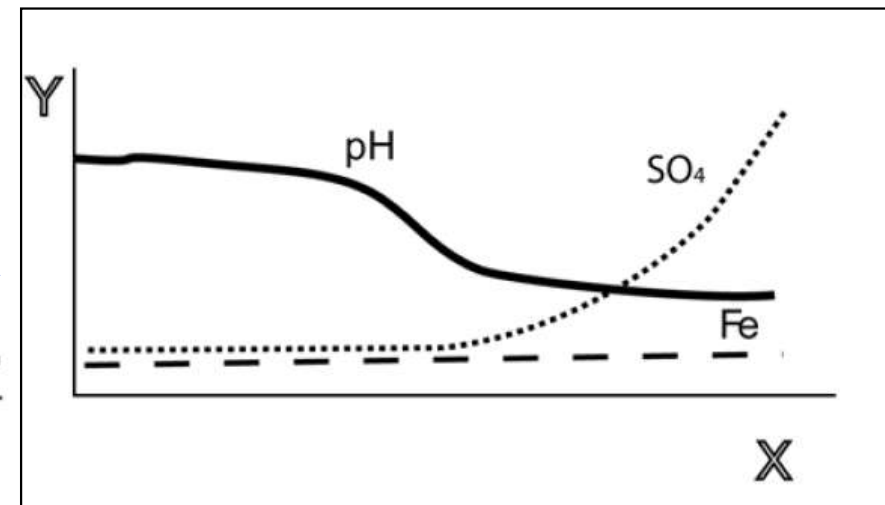
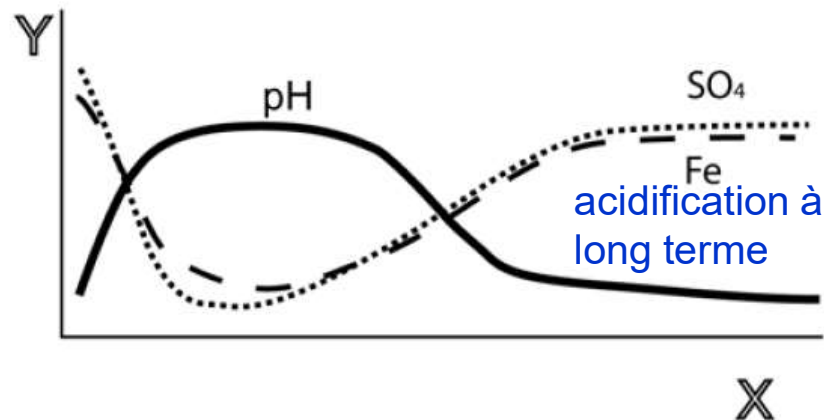
Sulfate soluble et
générateur d'acide
(Gypse)



Pyrite avec neutralisation
lente avec précipitation de
gypse / oxyde de fer



Sulfate soluble et générateur d'acide
(jarosite - $K+Fe^{3+}+3(OH^-)+6(SO_4^{2-})_2$)



Légende

Y Concentration
X Temps

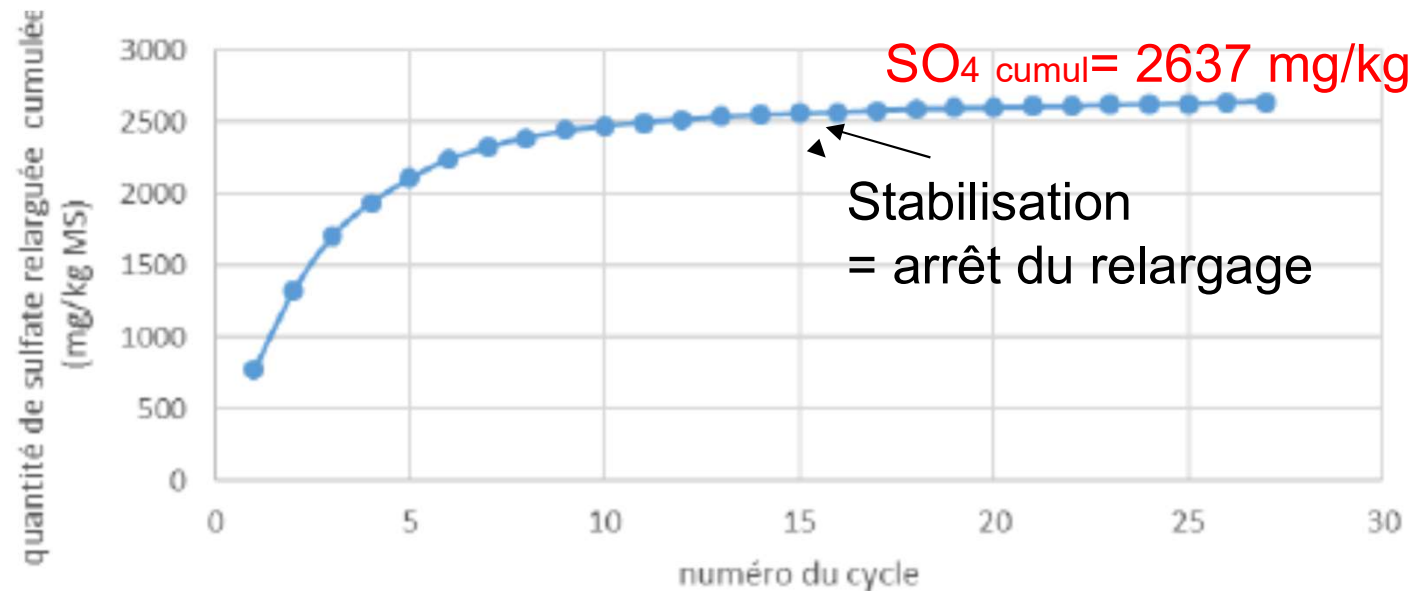
Pyrite sans gypse avec
précipités secondaires à
base de Fe

Exemple d'un essai cinétique en mini-cellule : taux de conversion des sulfures en SO_4 ou « sulfures mobilisables »

50 ml d'eau tous les 2/3 jours puis séchage à l'air

Cumul concentration en sulfates à chaque lixiviation

Mini-cellule d'altération



SO_4 relargable au max = 3800 mg/kg

Calcul mathématique à partir des sulfures totaux mesurés

Conclusion : seulement 23% des sulfures présents s'oxydent au cours de l'essai jusqu'au blocage de la réaction

Taux de conversion $\neq$ 100%
Taux de conversion variable selon la composition/granulométrie de la terre et les conditions d'essai

Merci de votre attention