

# Liaison Esch-Micheville (et autres exemples) Illustration d'un cas particulier de roche altérée et évolutive: les argilites marneuses du Toarcien

Ir Steve GRUSLIN



Géologie  
Géotechnique  
Hydrogéologie  
Environnement

# Plan de l'exposé

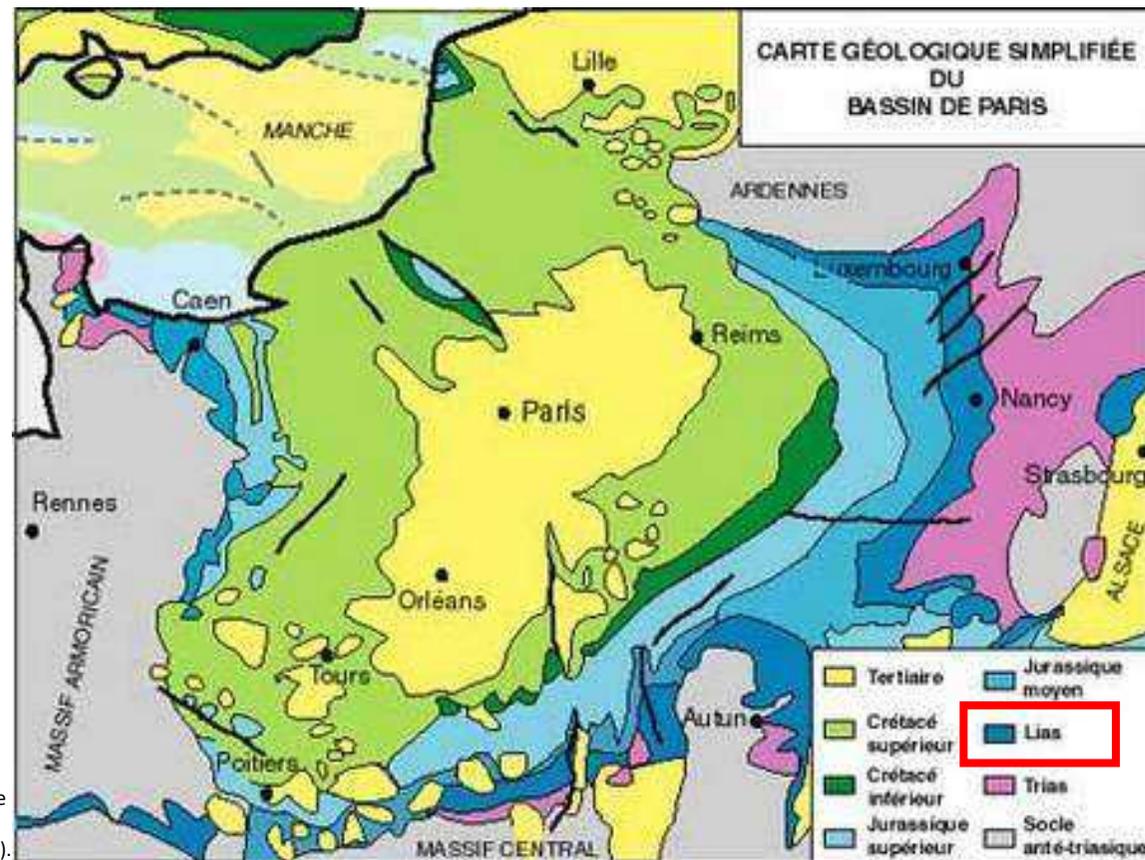
- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- Précautions
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- Précautions
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Contexte géologique

- Bassin de Paris
- Toarcien (Lias supérieur, Jurassique)



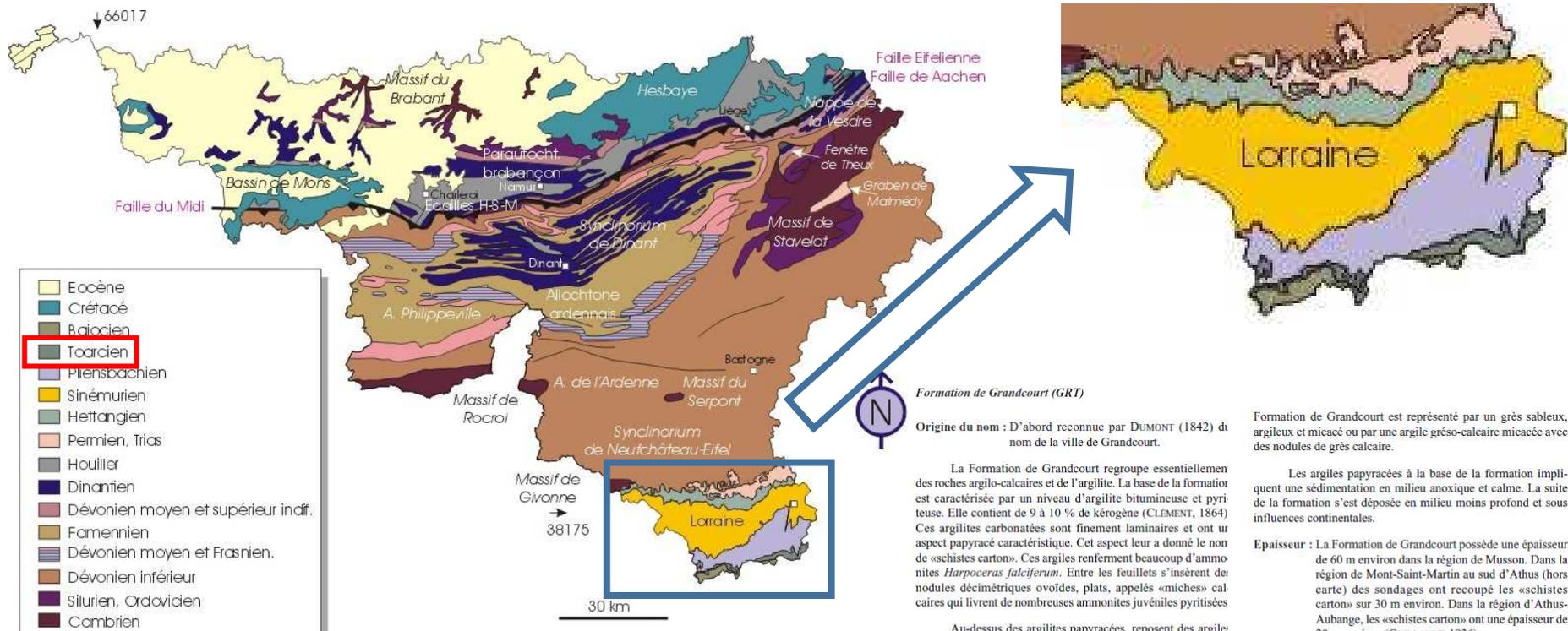
D'après la synthèse géologique du Bassin de Paris (1980) et la carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (6ème éd., 1996).

Géologie  
Géotechnique  
Hydrogéologie  
Environnement

**GEO**  
CONSEILS

# Contexte géologique

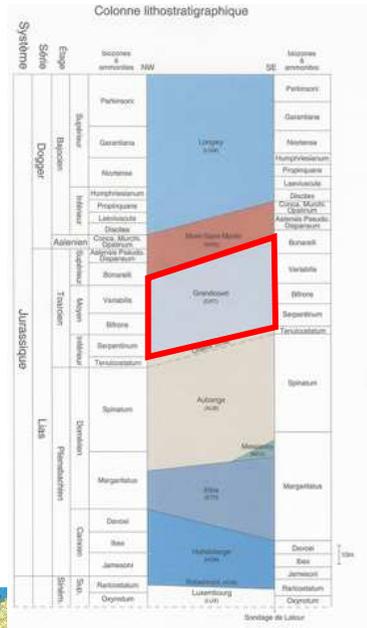
- Belgique: formation de Grandcourt (Jurassique, Toarcien)



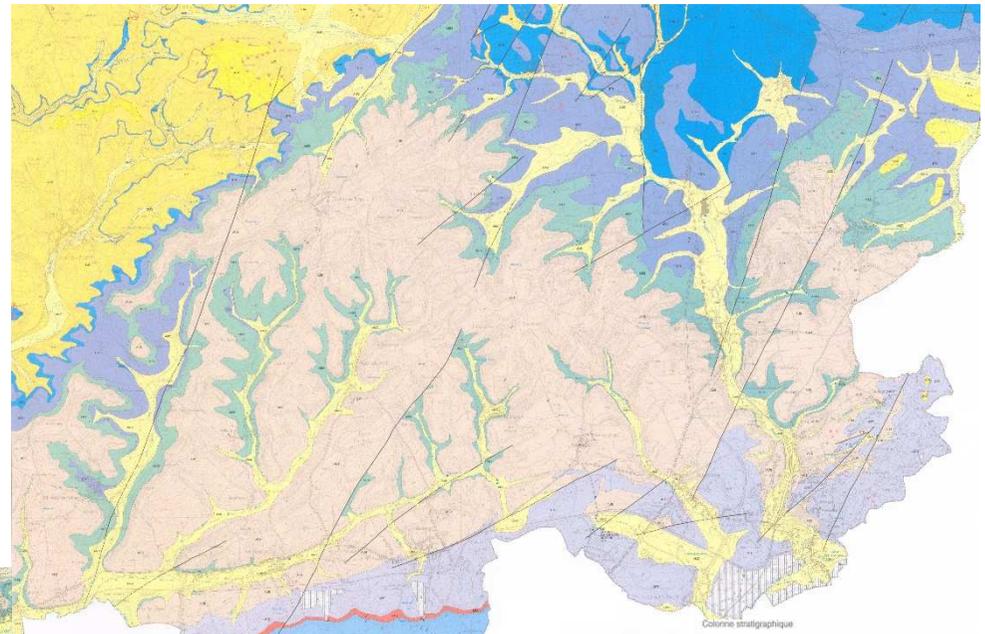
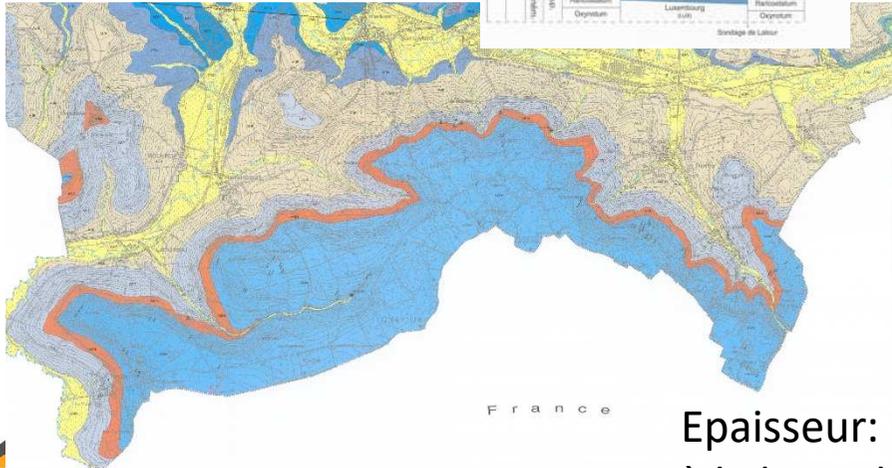
Carte géologique d'après Boulvain

Bélangier et al., 2002

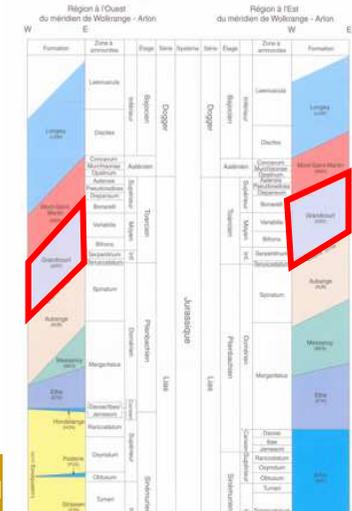
# Contexte géologique



Carte géologique de Wallonie « Lamorteau Ruelle », 71/5-6



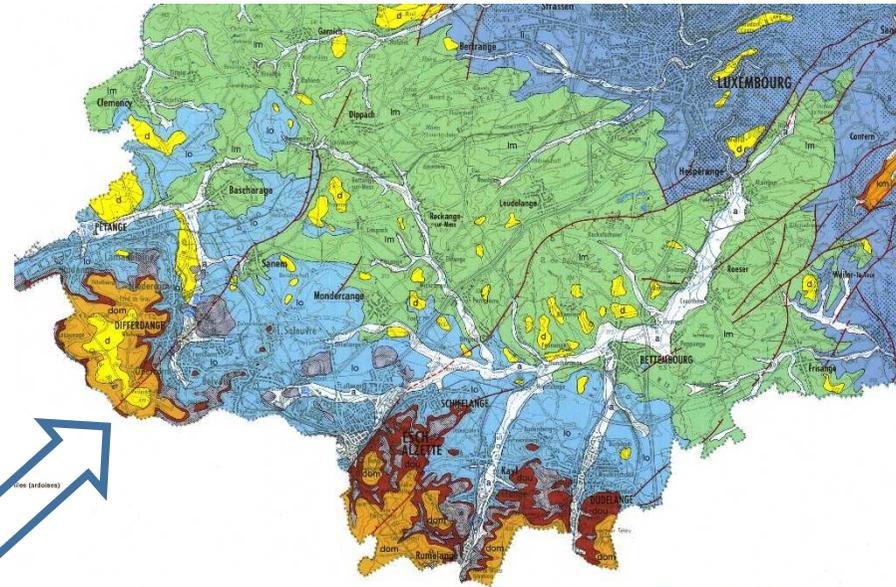
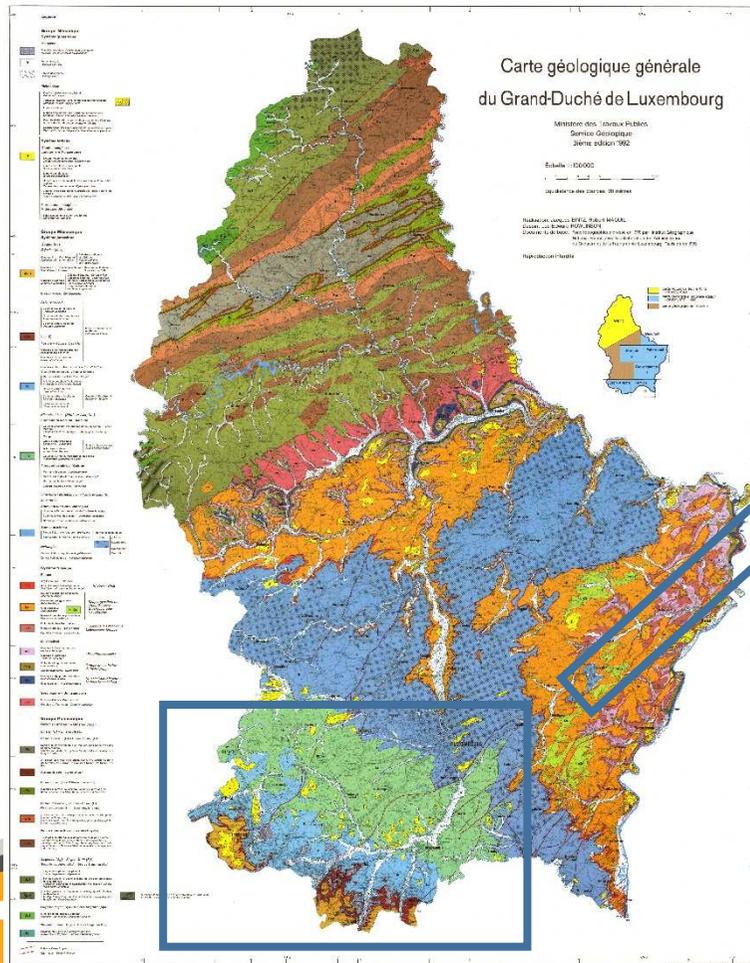
Carte géologique de Wallonie « St-Léger – Messancy – Musson – Le Fay – Houwald », 71/3-4, 71/7-8, 72/1



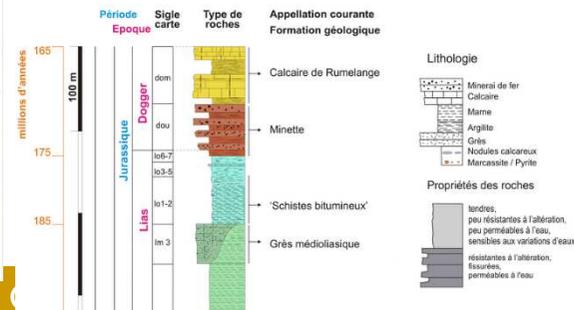
Epaisseur: 20-30 m pour les argilites à la base de la formation

# Contexte géologique

## ■ Luxembourg: lo<sub>1</sub> et lo<sub>2</sub>



Légende stratigraphique et log lithologique



Couches à Harp. fallaciosum – Fallaciosus-Schichten

Grès à Harp. striatulum – Striatulus-Sandstein

Marnes à Astarte voltzi – Voltzi-Mergel

A la base couche à Coel. crassum

An der Basis die Crassus-Schicht

lo

Couches à Hild. bifrons  
Bifrons-Schichten

Couches à Harp. falciferum  
Falciferen-Schichten

(Schistes bitumineux)  
(Bituminöse Schiefer)

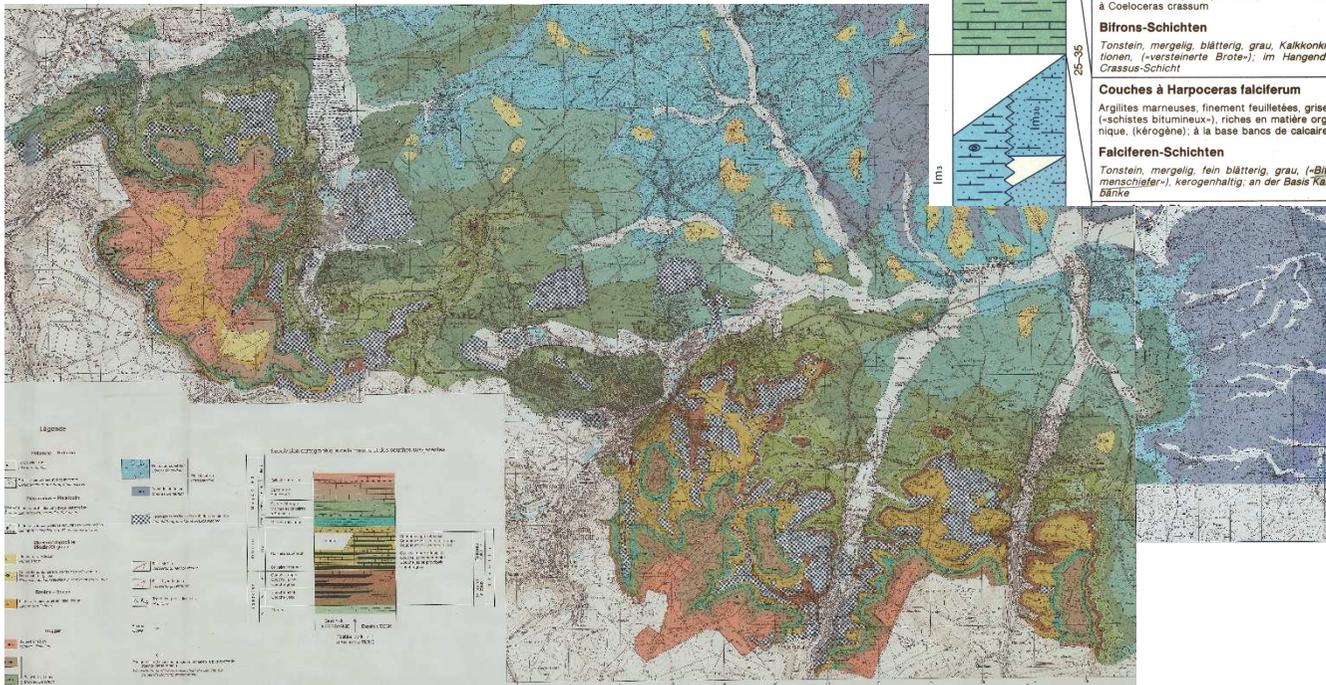
Couches à Pos. bronni  
Posidonien-Schiefer



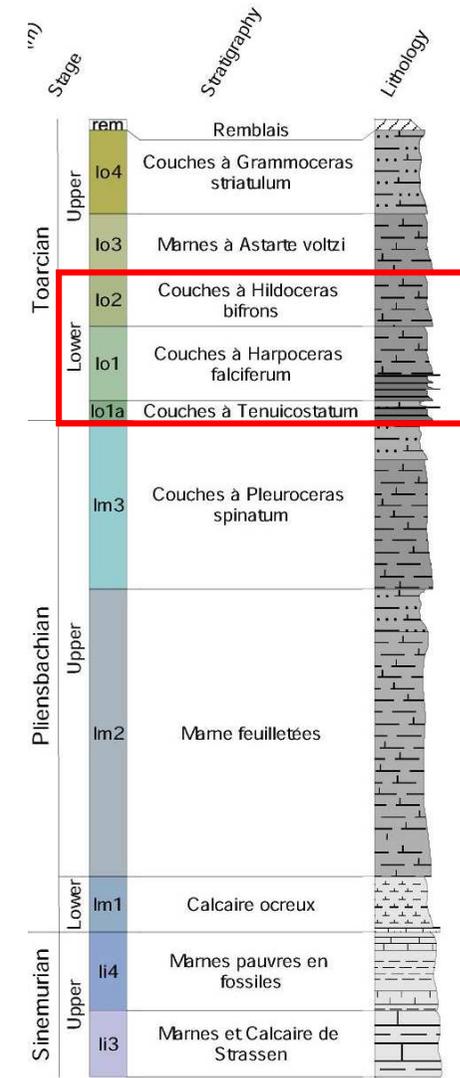
canique des Roches

# Contexte géologique

- Luxembourg: lo<sub>1</sub> et lo<sub>2</sub>



Cartes géologiques du Luxembourg n°12 « Esch/Alzette » et n°13 « Remich »



Legend

- landfill and alluvium
- laminated shale
- marls
- calcareous marls
- sandy marls
- marls and interbedded limestone
- marls and limestone
- limestone
- fossiliferous limestone

Log stratigraphique fourni par le SGL



Epaisseur: ≈ 45-60 m



# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- Précautions
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Quelques caractéristiques

- « Schistes bitumineux », « schistes à posidonies »: argilites marneuses foncées, feuilletées à finement litées, avec quelques intercalations de fins lits calcaires + nodules et concrétions calcaires (« pains pétrifiés »)



Talus fouille, chantier liaison Esch-Micheville



Fossiles de Posidonia bronni



Affleurement naturel, ruisseau Wosweiler, Guerlange-Athus



"pains pétrifiés" (photos GBL-T)

# Quelques caractéristiques

- Composition de la roche saine:

- Minéraux argileux (kaolinite, illite, chlorites,...)
- $\text{CaCO}_3$
- Matière organique (kérogène): 5 – 15 %
- Pyrite: jusqu'à 5-6 %
- Quartz, feldspaths, dolomite, strontianite, ankérite, sidérite,...



- A l'altération, prend un aspect papyracé dû à l'empilement de minces feuillets (« schistes cartons »)



Talus à Bascharage (photo SGL)



Talus de fouille,  
chantier liaison Esch-Micheville

# Quelques caractéristiques

- Pendage max. = 5° vers SO ou SE (ondulations de grande amplitude)
- 2 familles de diaclases perpendiculaires entre elles et à la stratification
- Circulations d'eau via le système de fractures



(photo GBL-T)



chantier liaison Esch-Micheville



# Quelques caractéristiques

- Quelques caractéristiques mécaniques:

- Roche saine:

- Résistance à la compression uniaxiale:  $\sigma_u = 1,48 - 16,2 \text{ MN/m}^2$   
(Résistance « très faible » à « modérément faible », EN ISO 14689-1)
    - Caractéristiques pressiométriques moyennes:  $P_L^* > 2,5 \text{ MPa}$ ,  $E_M > 150 \text{ MPa}$

- Roche altérée:

- Résistance à la compression uniaxiale:  $\sigma_u = 0,49 - 0,74 \text{ MN/m}^2$   
(Résistance « extrêmement faible », EN ISO 14689-1)
    - Caractéristiques pressiométriques moyennes:  $P_L^* : 0,5 - 2,0 \text{ MPa}$ ,  $E_M : 15-100 \text{ MPa}$



# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- **Problématiques liées à l'altération**
- Précautions
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Problématiques liées à l'altération

- 3 stades d'altération: roche saine, roche altérée, argiles d'altération
- La roche saine présente de bonnes caractéristiques géotechniques, mais elle évolue très rapidement, sous l'effet des conditions atmosphériques (contact avec l'air et/ou l'eau)
- Altération = évolution des caractéristiques:
  - Physiques
  - Mécaniques
  - Chimiques



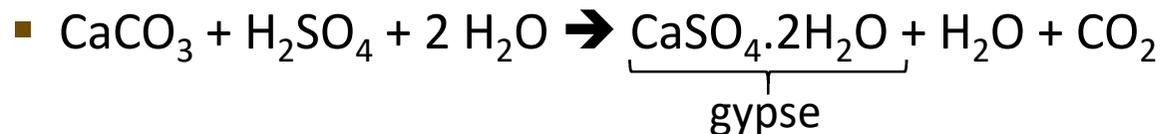
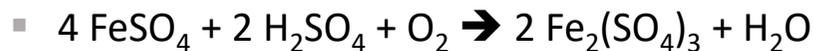
# Problématiques liées à l'altération

- Altération chimique: problème principal = gonflement
- Lié à l'oxydation de la pyrite disséminée entre les feuillets:

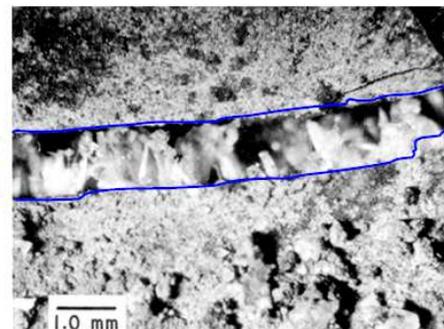


à partir de 30°C: réaction accélérée par bactérie Thiobacillus Ferrooxidans et nouvelles réactions (Romain Meyer, comm. pers.)

- Réactions secondaires:



(d'après Tietze, 1981)



(d'après Bohler, 2005)



Photo GBL-T

# Problématiques liées à l'altération

- Formation de gypse: augmentation de volume de 11 à 29 %
- Contraintes de l'ordre de 200-300 kPa
- Eaux souterraines agressives par rapport au béton
- Roche saine: pyrite uniquement
- Roche altérée: pyrite + gypse
- Argiles d'altération: gypse uniquement
- Répartition pyrite hétérogène → gonflement différentiel



# Problématiques liées à l'altération

- Conséquences du gonflement:
  - Maison unifamiliale à Esch-sur-Alzette



# Problématiques liées à l'altération

- Conséquences du gonflement: quelques exemples historiques
  - Belgique:
    - Athus: Athénée royal, 1976
      - Lors du creusement des fondations pour l'extension du bâtiment, soulèvement du parquet de la salle de gymnastique. Le soulèvement s'est formé sous le radier, entraînant les colonnes supportant le plancher et cisailant les poutres supportant le hourdis, qui s'est déchiré par endroits. Soulèvement du sol jusqu'à 16 cm. (Stoffel, 1983).
    - Monjoie et Schroeder, 2007:
      - Etude relative au comportement des argilites marneuses présentes sous un hall industriel dans le sud de la Belgique affecté par un soulèvement de la dalle de 38 à 78 mm en 14 mois. Les pieds de colonnes, le four et les machines lourdes n'ont pas bougé. La production de l'usine entraîne de fortes productions périodiques de chaleur accompagnant des coulées de matière en fusion au départ des fours (env. 1500 °C)
  - France:
    - Nancy: Magasins réunis
      - Soulèvement de la dalle du sous-sol: 1,3 à 1,6 m entre 1927 et 1956. Entre 1956 et 1969, soulèvement continu de 6 à 8 cm par an. Pas de gonflement sous les fondations (contrainte appliquée par les semelles de l'ordre de 400 kPa) (Causero, 1969)
  - Allemagne (Baden-Württemberg)

# Problématiques liées à l'altération

- Conséquences du gonflement: quelques exemples historiques
  - Luxembourg:
    - Bascharage: magasin d'ameublement
      - Soulèvement et fissuration du dallage



# Problématiques liées à l'altération

- Conséquences du gonflement: quelques exemples historiques
  - Luxembourg:
    - Usine Galvalange (ZI Wolser, Dudelange)
      - Usine de galvanisation (alu)
      - Début des travaux: 1983, mise en service: 1984
      - Nappe à 3-4 m sous fondations
      - 1<sup>er</sup> mouvements constatés en 1989/1990 au droit d'une cave de 6 m de profondeur
      - Le processus de production entraîne des températures de 60°C dans la cave (30°C dans le hall de production)
      - Températures mesurées dans le sol de fondation: 35-40°C
      - Les mouvements ont entraîné un soulèvement et des fissures dans les dalles de la halle de production
      - Gonflement jusqu'à 60 cm
    - Usine Luxguard (ZI Wolser, Dudelange)
      - Nappe à 3-4 m sous fondations
      - Halle de production entourée par un drainage périphérique
      - Début de la production en 1988
      - 1<sup>er</sup> mouvements constatés 3-4 ans après le début de la production
      - Le processus de production entraîne des températures > 1400-1500 °C (30-60°C dans la halle de production)
      - Températures mesurées dans le sol de fondation: 40°C sous la ligne de production
      - Taux de gonflement max. de 4,1 mm/mois
      - Gonflement max. de 32 cm
      - Dans un 1<sup>er</sup> temps: boulonnage
      - A partir d'un certain moment, insuffisant pour contrer la pression de gonflement → nouvelle fondation sur pieux

(Brack, 2000; Bohler, 2005)

# Problématiques liées à l'altération

- Conséquences du gonflement: quelques exemples historiques
  - Luxembourg:
    - Bascharage: Halle TDK
      - Soulèvement du plancher
    - Sanem: Halles WSA
      - Dégâts constatés en 1984
    - Bettembourg: Trefil-Arbed
      - Soulèvements jusqu'à 30 cm localement
    - Bettembourg: Halles WSA
      - Soulèvements dans 2 halles et dans le bâtiment administratif
    - Dudelange: usine Eurofoil
      - Soulèvements dans la halle de production et sous le chemin de roulement de la grue

# Problématiques liées à l'altération

- Autre risque géotechnique lié à l'altération:
  - Les argiles d'altération appartiennent à la catégorie des argiles plastiques à fortement plastiques
    - Essais Atterberg:
      - $I_p$  : 27,04 – 43,4 %

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

- Elles sont donc fortement influencées par:
  - les conditions climatiques (ramollissement)
  - les phénomènes de retrait-gonflement

# Problématiques liées à l'altération

- Autre risque géotechnique lié à l'altération: retrait-gonflement des argiles d'altération



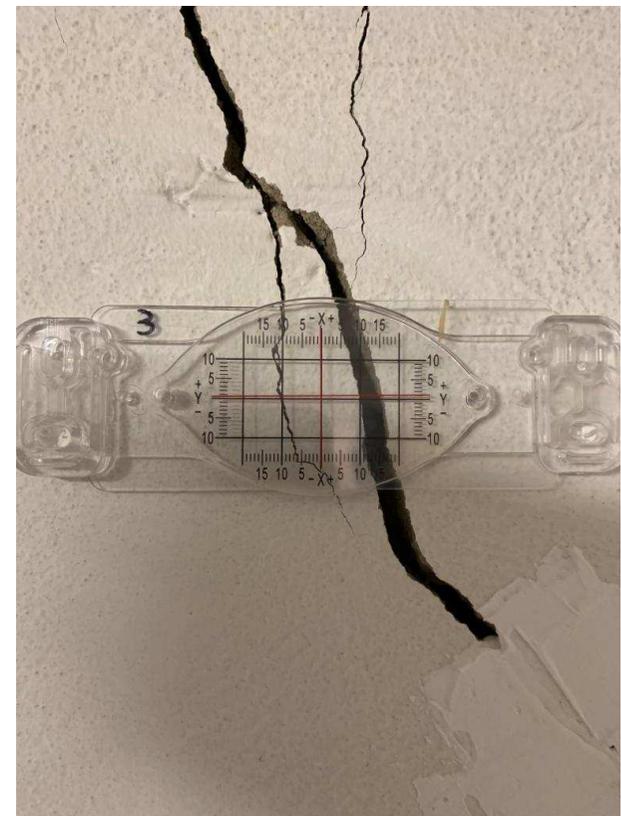
Maison unifamiliale Esch/Alzette

# Problématiques liées à l'altération

- Autre risque géotechnique lié à l'altération: retrait-gonflement des argiles d'altération



Maison unifamiliale Esch/Alzette



# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- **Précautions**
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Précautions

- Si possible: fondation au-dessus de la couche à risque
- Protection du fond de fouille contre l'assèchement dans la foulée du terrassement (film plastique, béton maigre), terrassement par phases
- Eviter les variations de teneur en eau, éviter le rabattement, éviter les drainages (cuvelage étanche)
- Eviter toute production de chaleur à proximité du sol de fondation
- Prévoir un béton spécial (eaux agressives)
- Surchargement pour contrer les pressions de gonflement (taux de chargement > 300 kPa)
- Fondations sur pieux (éventuellement avec manchons permettant le gonflement dans la couche à risque) pour reporter la charge + bas
- Proscrire l'utilisation de concassé HF
- Eviter la réutilisation des schistes bitumineux en tant que remblai

# Précautions

- Eventuellement, prévoir la purge des argilites marneuses jusqu'à la couche géologique sous-jacente (formation d'Aubange /  $Im_3$ )



Halle usine Aubange

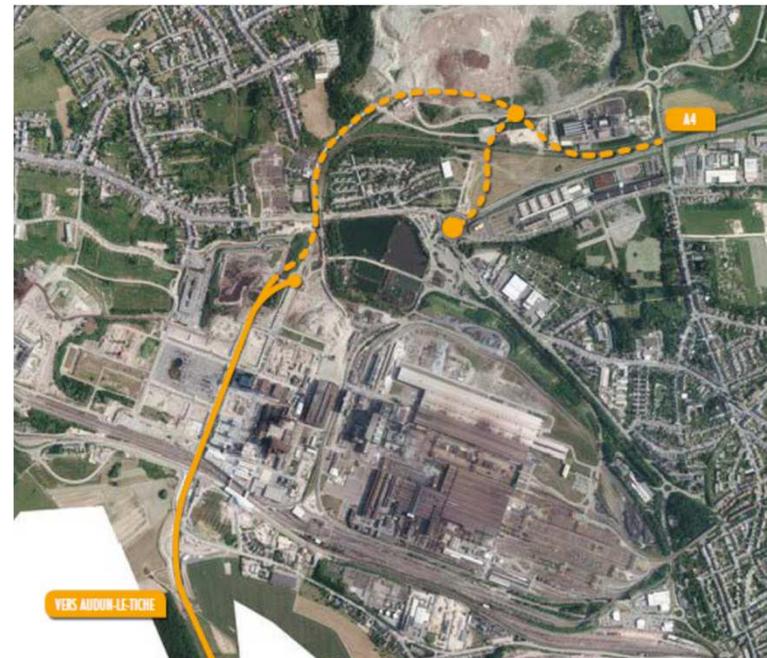
- Dans tous les cas: attention particulière lors des terrassements (création de fissures favorisant l'oxydation, conditions climatiques, ...).  
Idéalement, le fond de fouille devrait être contrôlé par une personne qualifiée

# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- Précautions
- **Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville**
- Conclusions

# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- M.O.: Administration des Ponts & Chaussées
- Entre Esch-Belval (Lux.) et Micheville (F.) au travers de friches industrielles
- Longueur du tracé étudié: 3300 m
- 2 x 2 voies
- Construction de plusieurs O.A.  
(viaducs, passage sous voies CFL par ripage,...)
- Tunnel « Central Gate » de 735 m







# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate » (tranchée ouverte)
- Etude géotechnique:
  - Forages carottés (espacement env. 100 m le long du tracé)
  - Diagraphies en forage (gamma-ray, densité, conductivité,...)
  - Essais géotechniques en laboratoire (compression uniaxiale, teneur en eau, Atterberg, granulométrie, proctor)
  - Analyses minéralogiques et essais de gonflement
  - Piézomètres et essais de pompage

# Liaison autoroutière Esch-Micheville

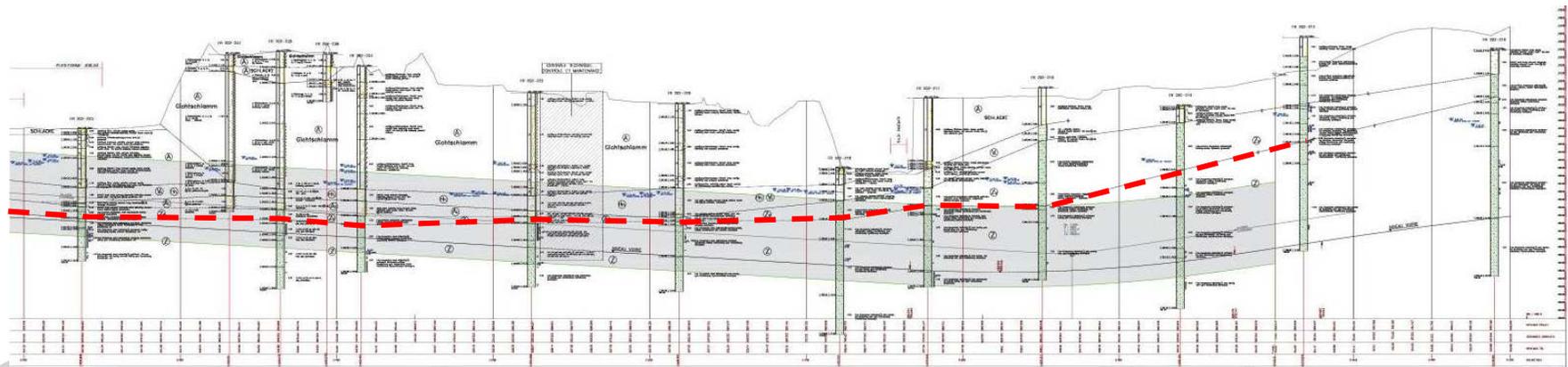
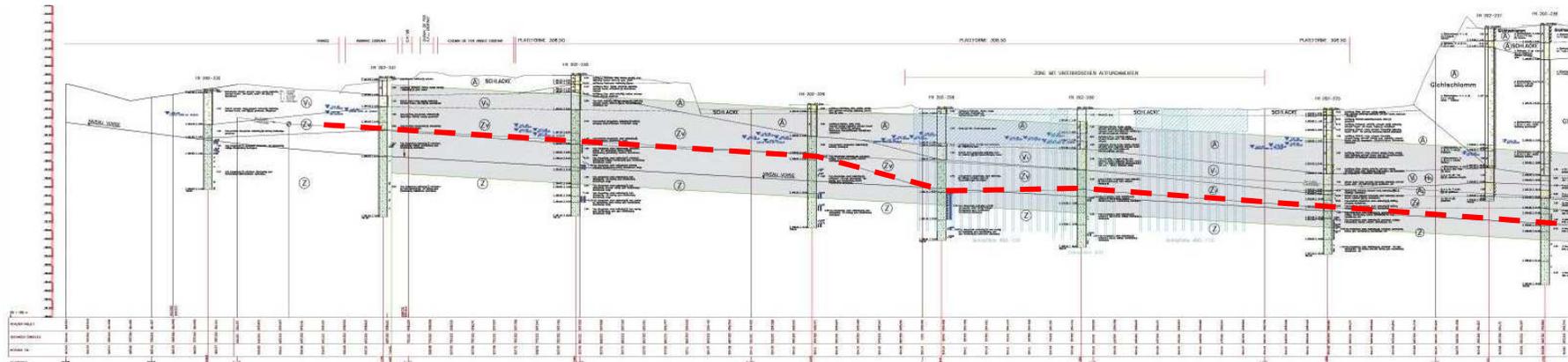
- Principaux résultats de l'étude géotechnique:
  - Fondations au niveau du substratum rocheux (argilites marneuses)



- Résistance à la compression uniaxiale: 5,0 – 16,2 MN/m<sup>2</sup>
- Analyses minéralogiques:
  - Pyrite: 1 – 5 % masse
  - Gypse: 0 – 8 % masse

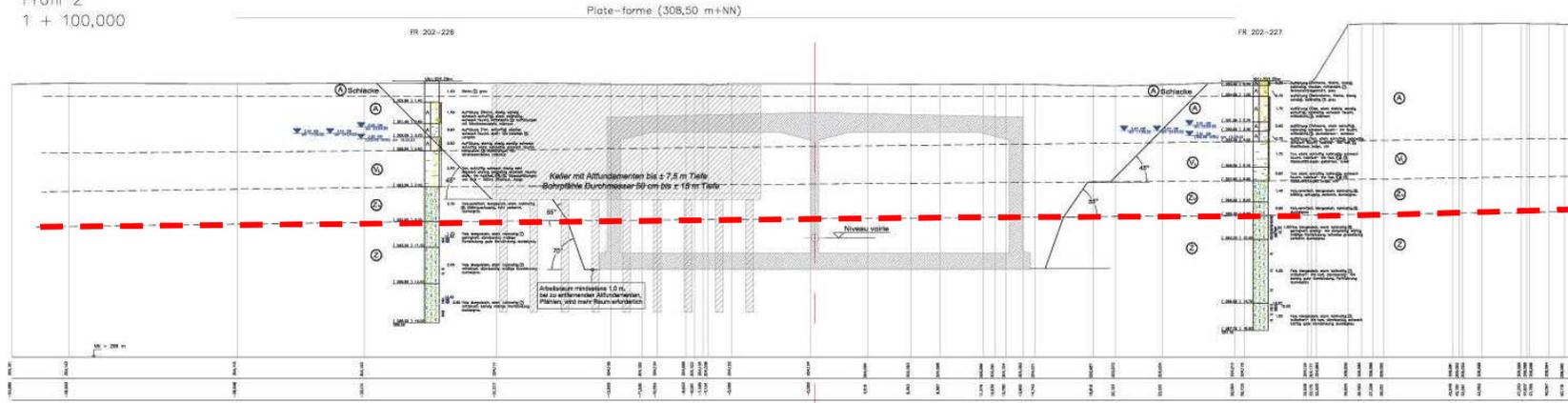
# Liaison autoroutière Esch-Micheville

## ■ Tunnel « Central Gate »

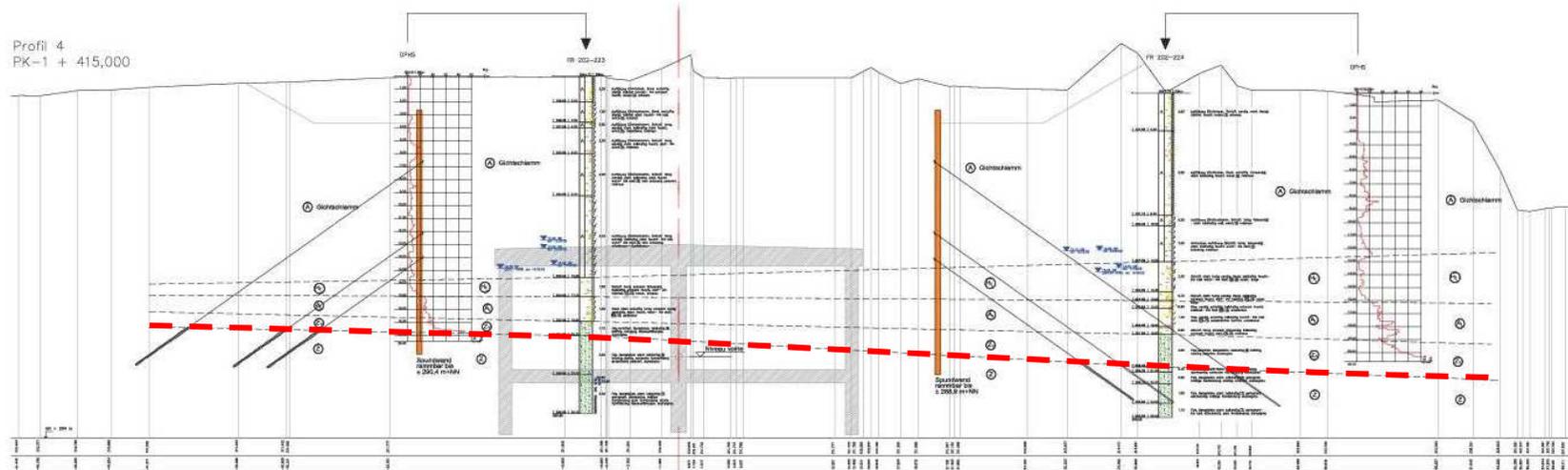


# Liaison autoroutière Esch-Micheville

Profil 2  
1 + 100,000

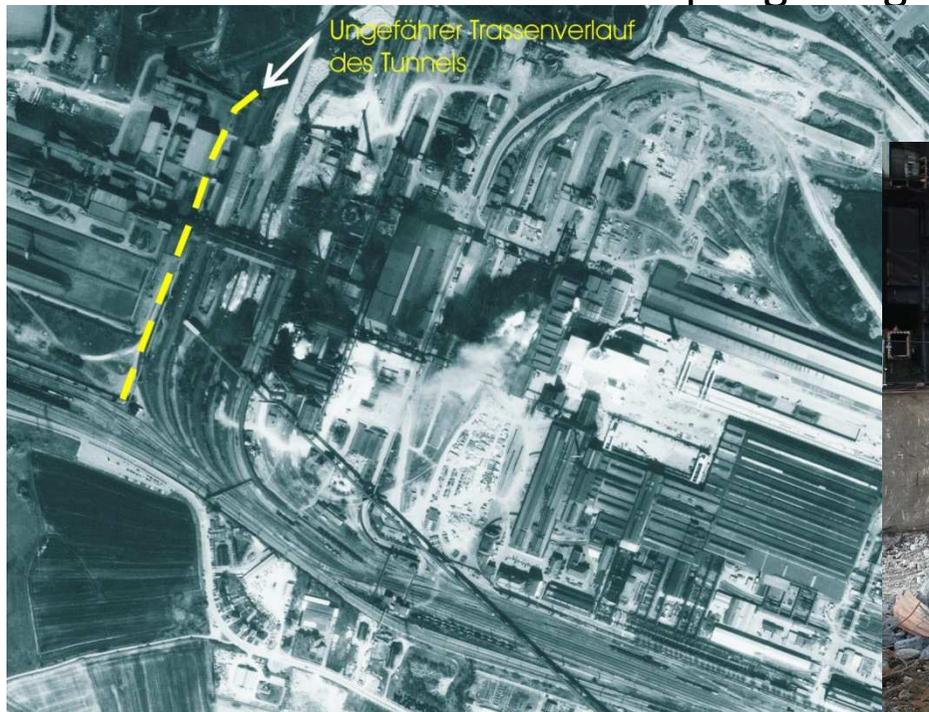


Profil 4  
PK-1 + 415,000



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate »
  - Problèmes autres que géologiques:



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate »



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate »: accès nord



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central gate »: trémie sud



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate »: trémie sud



# Liaison autoroutière

- Tunnel « Central Gate »: trém



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Tunnel « Central Gate »: trémie sud



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Il restait encore une dernière surprise...



# Liaison autoroutière Esch-Micheville

- Pour rappel:

- La réaction d'oxydation de la pyrite est exothermique:



- Les argilites marneuses contiennent du kérogène
- Sous l'effet combiné de la chaleur produite par l'oxydation de la pyrite, de la chaleur extérieure et des conditions de stockage en grandes quantités, le kérogène présent dans les argilites mis en tas de déblais s'est enflammé (phénomène « d'auto-combustion », cfr terrils houillers)

# e Esch-Micheville



IMG\_0738



Ingénieur et de Mécanique des Roches



IMG\_0738

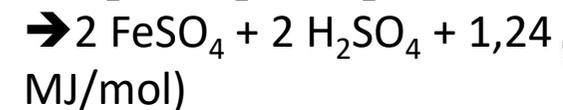
## Esch-Micheville



IMG\_0723

Apport d'eau!

Or,  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{O}_2$  sont indispensables à la réaction chimique d'oxydation de la pyrite





Solution: éviter tout apport en  $O_2$   
et  $H_2O$  → couvrir!



Géologie  
Géotechnique  
Hydrogéologie  
Environnement

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de Mécanique des Roches

# Plan de l'exposé

- Contexte géologique
- Quelques caractéristiques des argilites marneuses
- Problématiques liées à l'altération
- Précautions
- Illustration: la liaison autoroutière Esch-Micheville
- Conclusions

# Conclusions

- Argilite marneuse = matériau évolutif
- La roche saine présente de bonnes caractéristiques géotechniques mais celles-ci évoluent très vite en fonction de l'altération
- Le risque de gonflement est lié à l'oxydation de la pyrite (oxygène ou eau de surface oxygénée), toujours au-dessus du niveau stable de la nappe
- La réalisation de projets est évidemment possible, moyennant des précautions particulières

# Merci de votre attention!

(merci à Robert Colbach et Romain Meyer du Service Géologique de Luxembourg pour leur aide!)

