

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Le pressiomètre MENARD: un instrument de mesure utile pour la reconnaissance du schiste pyriteux toarcien à risque de gonflement.

The MENARD Pressuremeter: a Useful Tool to Investigate Toarcian Pyritic Black Shales able to Induce Swell.

R. Heintz
Eurasol s.a., Luxembourg

V. Heintz
RWTH Aachen, Germany

J.-F. Wagner
Lehrstuhl für Geologie, Universität Trier, Treves, Germany

RESUME : Depuis les années 1930 de nombreux sinistres sont connus de constructions fondées sur le schiste pyriteux toarcien potentiellement gonflant, affleurant au Sud du Luxembourg et dans les régions transfrontalières belges et françaises. En conséquence, les géotechniciens avertis prévoient la réalisation de forages pressiométriques carottés, utilisant les carottes pour évaluer le risque de gonflement pyriteux par analyses géochimiques et minéralogiques et les essais pressiométriques pour les études traditionnelles de fondation et de tenue des fouilles. Les données résultant de 50 ans de pratique pressiométrique au Luxembourg dans les schistes pyriteux ont permis d'établir une corrélation statistique entre les résultats de laboratoire et les résultats pressiométriques, caractérisant les schistes pyriteux fermes ou de compacité plus importante encore, $p_L \geq 1,2$ MPa, comme sols à risque de gonflement élevé. Elles ont permis de mettre en évidence un gonflement potentiel de déchargement différent du gonflement pyriteux. Il en résulte que le pressiomètre MENARD est un instrument de mesure utile pour la reconnaissance des sols pyriteux à risque de gonflement et qu'il pourrait trouver son application dans l'investigation de faciès semblables, connus stratigraphiquement depuis l'ère Primaire et présents dans le monde entier.

ABSTRACT : Since the 1930s many cases of damage are known of constructions founded on the swellable Toarcian pyritic shale, outcropping in the south of Luxembourg and the Belgian and French border regions. As a result, alerted geotechnicians provide the implementation of pressuremeter tests in pre-cored boreholes, using the cores to assess the risk of pyritic swelling by geochemical and mineralogical analyses and pressuremeter test results for traditional studies on foundations and stability of excavations. Data from 50 years of practice on pressuremeter testing in Luxembourg in pyritic shales have established a statistical correlation between laboratory and pressuremeter results identifying hard pyritic shales characterised by a limit pressure $p_{LM} > 1,2$ MPa, as soils with a high risk of swelling. The gathered data enable us to point out the difference between pyritic swell and the heave caused by decreasing stress. Consequently we can say that the Ménard pressuremeter is a useful tool for the investigation of pyritic black shales able to induce swell. Further more it could be applied to investigate similar facies known stratigraphically since the Paleozoic era upward which can be found all over the world.

MOTS-CLES : schiste pyriteux, gonflement pyriteux, gonflement de déchargement, pressiomètre Ménard

KEYWORDS : pyritic black shale, pyritic swell, heave caused by decreasing stress, Ménard pressuremeter

1 LE MILIEU ANOXIQUE: CONDITIONS AYANT FAVORISE LA FORMATION DU SCHISTE PYRITEUX

A la fin du Jurassique inférieur, dans la mer épicontinentale toarcienne recouvrant l'aire de subsidence du Bassin de Paris, de fines couches de minéraux argileux se sont accumulées sur des fonds calmes et peu oxygénés.

Cet environnement marin euxinique fut caractérisé par une forte sédimentation de matières organiques qui se sont oxydées, créant un milieu réducteur qui a favorisé la précipitation de minéraux sulfurés, la pyrite en étant le minéral le plus abondant.

Pendant l'enfouissement, qui atteignait 1000 mètres de profondeur environ au sud du Luxembourg, les couches d'argiles pyriteuses ont été fortement compactées jusqu'à atteindre 1/8ième de leur puissance originelle (Hanzo 1979) et se sont transformées en argilites plus ou moins marnueuses, stratifiées subhorizontalement et très finement litées, d'où leur nom de 'schiste carton'. Au cours de cette diagenèse, la matière organique disséminée a été transformée en kérogène noirâtre, produit résultant d'un début de pyrolyse qui aboutirait à son terme à la formation d'hydrocarbures, ce qui a conféré aussi les noms de 'schiste noir' (black shales, Schwarzpelite) et de 'schiste bitumineux' aux argilites toarciennes (Bintz 1984).

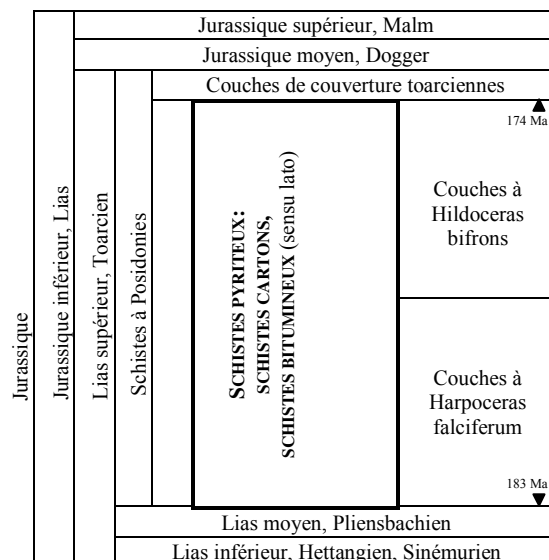


Figure 1: Stratigraphie du Toarcien inférieur du point de vue géotechnique dont l'intérêt est attiré par la teneur des couches en pyrite.

2 L'AFFLEUREMENT REGIONAL DU SCHISTE PYRITEUX TOARCIEN

3 L'OXYDATION: CONDITION FAVORISANT LE GONFLEMENT PYRITEUX

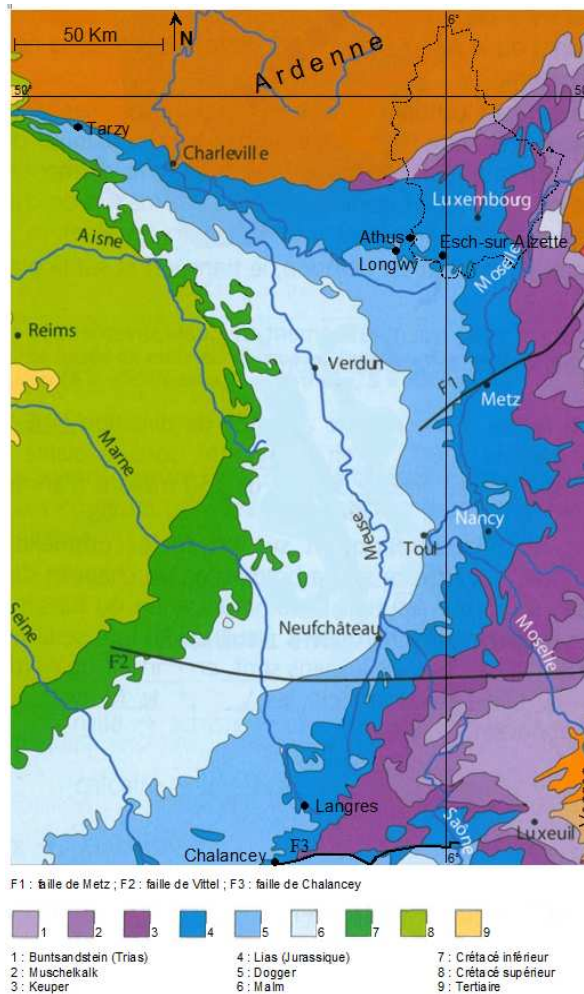


Figure 2. Affleurement des couches du Lias dans l'auréole bordière orientale du Bassin de Paris, constitué de schistes pyriteux toarciens dans la partie supérieure (cf. figure 1) (Lexa-Chomard et Pautrot 2006), carte modifiée

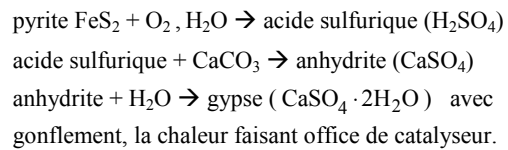
A la fin du Jurassique, les bords du Bassin de Paris se sont soulevés et ont été soumis à l'érosion, faisant affleurer le schiste carton pyriteux au sud du Luxembourg dans la région d'Esch-sur-Alzette et dans les régions transfrontalières (Delsate 1997); vers l'ouest son affleurement passe par Longwy, le sud du Luxembourg belge et jusque dans la région de Charleville-Mézières; les dernières reliques distales de transgression ont été repérées près de Tarzy (cartes géologiques de France 1:50.000, feuilles Hirzon et Rozoy-sur-Serre); vers le sud son affleurement passe par Metz et Nancy jusque dans la région du plateau de Langres; il y disparaît avec l'effondrement des compartiments tectoniques à la limite nord du fossé bressan, marqué par la faille de Chalancy et son prolongement vers l'est (cartes géologiques de France 1:50.000, feuilles Is-sur-Tille et Aigney-le-Duc) (cf. figure 2).

Ainsi la pyrite, originaire d'un milieu anoxique, devient instable dans le manteau d'altération décomprimé exposé à l'air et s'oxyde, déclenchant un enchaînement de réactions géochimiques qui la transforment finalement en gypse, produisant une augmentation de volume de plus de 100%:

Ce processus de gonflement naturel risque d'être mis en route artificiellement, chaque fois qu'une construction est fondée sous le manteau d'altération gypsifère d'épaisseurs variables où le schiste pyriteux est toujours présent ainsi que dans des déblais pyriteux.

A l'instar des néoformations de gypse observées dans les affleurements (Lucius 1948, Lexa-Chomard et Pautrot 2006), le gonflement peut se manifester dans les caisses de carottes de schiste pyriteux qui se déforment pendant le stockage.

Une version simplifiée des réactions géochimiques en cause est donnée ci-dessous:



L'oxydation de la pyrite est une réaction exothermique qui dégage de la chaleur, si bien que les déblais de schiste pyriteux, offrant des surfaces spécifiques élevées à l'attaque oxygénique, peuvent s'enflammer en masse.

4 INVESTIGATION CLASSIQUE DU RISQUE DE GONFLEMENT PYRITEUX PAR ESSAIS DE LABORATOIRE

Depuis les années 30 du siècle passé (Joly et Ninck 1935), de nombreux sinistres de constructions fondées sur le schiste pyriteux toarcien potentiellement gonflant, affleurant au Sud du Luxembourg (Wagner 2004) et dans les régions limitrophes, sont connus. Ces sinistres ne sont en aucun point négligeables étant donné que, dans les années 90 encore, un immeuble de bureaux R+1 sur sous-sol a été démolé après avoir été déclaré menaçant ruine 7 ans après sa construction.

En conséquence, les géotechniciens avertis prévoient la réalisation de forages pressiométriques carottés (Heintz 2005), utilisant les caractéristiques pressiométriques pour les études traditionnelles de fondation et de tenue des fouilles et les carottes pour évaluer le risque de gonflement pyriteux par analyses géochimiques (analyses du soufre) et minéralogiques (analyses de diffractions de rayons X).

En général, les résultats d'investigation font apparaître 4 horizons se superposant depuis la surface dans l'ordre suivant:

- couches fortement altérées sans gypse, ni pyrite, absence de litage,
- couches moyennement altérées, fortement gypsifères, à très faible teneur en pyrite, litage partiellement discontinu,
- la zone de réaction constituée de couches pyriteuses et gypsifères faiblement altérées, litage continu,
- couches intactes, fortement pyriteuses, à caractère rocheux.

Les échantillons sont récupérés systématiquement à ≤ 2 m d'interdistance dans 2 forages pressiométriques carottés au moins afin de pouvoir reconnaître le toit de la zone de réaction permettant, le cas échéant, de mettre en œuvre des mesures constructives adéquates s'opposant au gonflement, faute de quoi des désordres vont encore s'ajouter à la liste des sinistres relatifs au gonflement pyriteux.

La sinistralité liée au gonflement pyriteux impose et justifie cette démarche, pourtant non négligeable en termes de coût et de temps.

5 UTILISATION DES VALEURS PRESSIOMETRIQUES DANS LA RECONNAISSANCE DU SCHISTE PYRITEUX A RISQUE DE GONFLEMENT

5.1 Classification du potentiel de gonflement en fonction des pressions limites pressiométriques

5.1.1 Logique de la démarche

La teneur en pyrite du massif schisteux dépend de sa perméabilité à l'air influencée par les variations des niveaux d'eau installés dans les diaclases généralement subverticales et par la décompression qui se manifeste par le litage fin, généralement subhorizontal et millimétrique. Le degré de décompression, qui nous intéresse ici diminue en profondeur et est inversement proportionnel à la compacité.

Il s'agit de vérifier si le toit de la zone de réaction, et plus particulièrement le potentiel du gonflement du schiste pyriteux, peuvent être corrélés avec certaines compacités, exprimées en termes de pressions limites pressiométriques « p_1 », afin de pouvoir piloter la prise d'échantillons de laboratoire et d'en limiter le nombre.

5.1.2 Sélection des données

La pratique géotechnique de 50 ans dans le schiste pyriteux toarcien nous a permis de sélectionner les données de 29 sites au Sud du Luxembourg, investigués depuis la mise en vigueur de la norme NF P94-110 en 1991 et son homologue européenne EN-ISO 22476-4, procédure A avec consignation manuelle des données.

Tous les essais pressiométriques ont été réalisés dans des forages pressiométriques carottés (Heintz 2005) à l'aide de pressiomètres MENARD haut de gamme du type GA (Ménard 1961).

Les essais considérés ont été effectués dans le sol en place, les essais effectués dans les remblais pyriteux étant écartés.

Les carottes des forages ont été mises à profit à la récupération des échantillons analysés au laboratoire.

Toutes les analyses minéralogiques et géochimiques (diffraction de rayons X, détermination du soufre par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge) ont été réalisées avec les mêmes appareillages et suivant les mêmes méthodologies.

5.1.3 Présentation des données

Dans la logique des raisonnements de type qualitatif, développés ci-dessus

- décompression du massif d'argilites pyriteuse toarciennes affleurant,
- dégradation de sa compacité exprimée en termes de pressions limites pressiométriques,
- augmentation de sa perméabilité à l'air,
- diminution de la teneur en pyrite par oxydation avec gonflement,

L'histogramme (figure 3) permet de quantifier statistiquement les phénomènes en fonction des résultats pressiométriques.

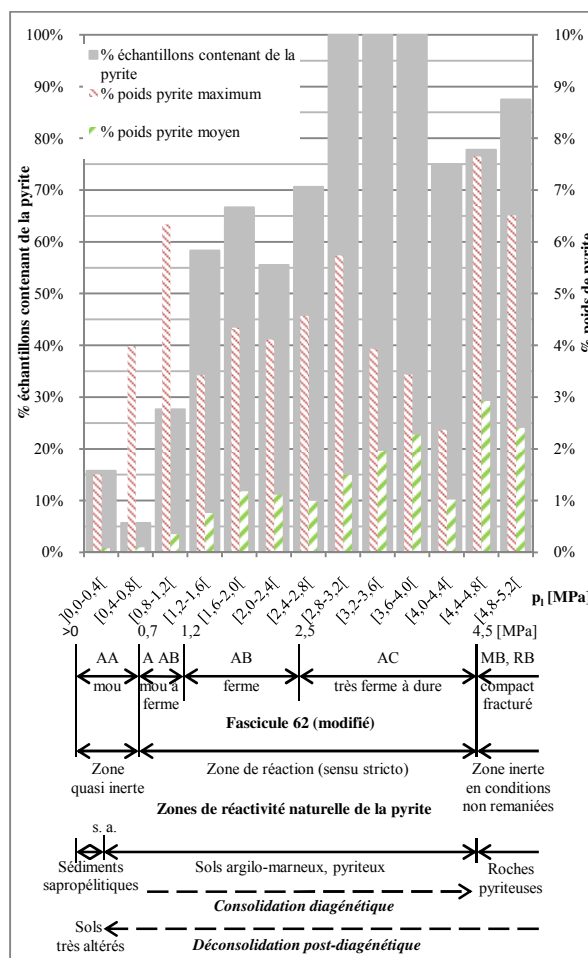


Figure 3: Evolution de la teneur en pyrite et de sa répartition et classifications des couches en fonction des pressions limites pressiométriques: pourcentage (%) d'échantillons de l'effectif de chaque classe contenant de la pyrite (rectangles pleins grisés), % moyen de pyrite en poids de ces échantillons (petits rectangles hachurés en vert) et % maximal de pyrite (grands rectangles hachurés en rouge); p_1 = pression limite pressiométrique; s.a. = seuil d'autoportance (Ménard 1975); dans notre cas: $0,25 \leq$ s.a. $< 0,4$ MPa.

5.1.4 Définition du potentiel de gonflement en fonction des pressions limites pressiométriques

Les données ci-dessus nous permettent d'évaluer le potentiel de gonflement des argilites pyriteuses (tableau 1) sachant que les indications concernant le pourcentage de pyrite nécessaire au déclenchement du gonflement sont très divergentes, la limite inférieure se situant à 0,1% (Penner, Eden, Gillot 1973). Cette faible valeur ne peut être dissociée de son contexte - gonflement catalysé par la chaleur - et ne peut être généralisée pour cette raison, sans pour autant vouloir tourner en bagatelles les leçons qu'elle nous apprend.

Dans ce contexte, il est rappelé que le présent document s'entend comme guide donnant des principes directeurs pour l'organisation des démarches d'investigation du schiste pyriteux, ce qui ne veut pas dire qu'il ne faut pas rester vigilant dans la recherche des phénomènes exceptionnels qui pourraient entraîner des désordres.

Parallel session ISP 6

Fascicule 62 (modifié) classe		p_1 [MPa]	pyrite %moyen	surface pyriteuse	potentiel de gonflement
molle	AA	<0,7	≤0,1	<20%	faible
molle à ferme	AA-B	0,7-<1,2	<0,4	<30%	moyen
ferme	AB	1,2-2,5	0,8-1,2	+/-60%	élevé
très ferme à dure	AC	>2,5-4,5	1,2-2,3	>75%	très élevé
compact	MB	>4,5	>2,3	>75%	très élevé

Tableau 1: Tableau d'évaluation du potentiel de gonflement des argiles et argilites pyriteuses en fonction des pressions limites pressiométriques sur la base des critères de teneur de pyrite et de sa répartition

5.2 Utilisation du tableau de classification des potentiels de gonflement des schistes pyriteux

5.2.1 Définition des couches intéressées par un projet

Le terrain de construction est investigué idéalement en réalisant des forages pressiométriques carottés.

Après le contrôle des courbes pressiométriques, exercice indispensable pour assurer la bonne qualité interne de la pratique pressiométrique, un diagramme pressio-géologique de chaque forage est établi, juxtaposant la lithostratigraphie, issue de l'analyse des carottes récupérées du forage pressiométrique carotté, et les valeurs pressiométriques corrigées.

Les diagrammes pressio-géologiques permettent une classification optimale des couches du terrain investigué suivant les recommandations du Fascicule 62 ainsi que la définition des classes des sols concernées par le projet faisant appel à l'analyse de leur teneur en pyrite.

5.2.2 Echantillonnage des carottes du forage pressiométrique carotté en fonction du potentiel de gonflement

Les carottes des forages pressiométriques carottés sont mises à profit pour la récupération d'échantillons permettant d'analyser la concentration des éléments de la chaîne de réaction géochimique produisant le gonflement (cf. paragraphe 3).

Afin d'éviter une altération de la teneur en pyrite en milieu oxydant, il est conseillé de limiter le temps entre l'extraction des carottes et l'échantillonnage et de conserver les carottes à l'abri de la chaleur en vue d'un échantillonnage additionnel éventuel.

Fascicule 62 (mod.) classe/ p_1 (MPa)	Potentiel de gonflement	Echantillonnage		Parade anti-gonflement prévisionnelle
		densité	objectif prévisionnel	
AA; <0,7	faible	faible	à titre de confirmation	prévision incertaine
AA-B; 0,7-<1,2	moyen	forte	pour étude approfondie	
AB; 1,2-2,5	élevé	faible	à titre de confirmation	oui
AC; >2,5-4,5	très élevé			
MB; >4,5	très élevé			

Tableau 2: Guide pour l'échantillonnage dans le schiste pyriteux suivant le potentiel de gonflement des couches, défini en fonction des pressions limites pressiométriques

Les pressions limites pressiométriques permettent d'orienter la prise d'échantillons destinés aux analyses géochimiques et minéralogiques à partir d'une pression limite de 1,2 MPa qui sépare

- les sols à potentiel de gonflement élevé et très élevé ($p_1 \geq 1,2$ MPa)

- des sols à potentiel de gonflement moyen et faible ($p_1 < 1,2$ MPa).

Comme indiqué dans le tableau précédent (tableau 2), les sols à potentiel de gonflement élevé à très élevé font appel à la mise en place de parades anti-gonflement, d'où une prise d'échantillon en nombre réduit, confirmant les fortes teneurs en pyrite.

A l'autre extrême, pour les sols mous ($p_1 < 0,7$ MPa), qui dans la majorité des cas ne contiennent plus de pyrite, un échantillonnage réduit ciblé sur les endroits critiques - aires de génération de chaleur, structures sensibles aux tassements - est acceptable. L'attention n'en est pas moins orientée vers les couches fortement gypsifères.

La classe des couches molles à fermes (0,7 - < 1,2 MPa), à potentiel de gonflement moyen, constitue un cas intermédiaire. L'échantillonnage y est conséquent et des études approfondies sont nécessaires afin de pouvoir mettre en œuvre des parades adaptées, définies par l'ensemble des mesures évitant une augmentation de la perméabilité à l'air des sols pyriteux en place.

5.2.3 Observations

Le potentiel de gonflement, qu'il soit faible ou très élevé, est inoffensif.

Il ne peut déployer son énergie destructive que s'il est transformé en énergie cinétique, matérialisée finalement par la cristallisation de gypse, accompagnée du gonflement du sol pyriteux - ce qu'il faut éviter.

En conséquence, les résultats d'analyses géochimiques et minéralogiques des échantillonnages doivent être conçus comme faisant partie intégrante d'un ensemble de paramètres de premier ordre - conditions d'apport de chaleur et d'oxydation, conditions hydrogéologiques - qui s'introduisent à la base des études des parades, neutralisant le gonflement potentiel - autre volet spécial relatif aux sols pyriteux pouvant bénéficier de la mise à profit des valeurs pressiométriques.

L'évaluation des fortes teneurs maximales en pyrite, observées occasionnellement (cf. figure 3), fait partie intégrante de ces études qui ne devraient pas perdre de vue le fait que la genèse de la pyrite a été intimement liée à la décomposition des matières organiques sur le fond marin liasique (Faber 1947) et qu'en conséquence les hétérogénéités relatives à sa concentration et sa répartition étaient préprogrammées à la base (Faber et Lucius 1956).

Ces études doivent s'inscrire dans le long terme, étant donné que le potentiel de gonflement persiste pendant toute la vie de l'ouvrage, contrairement au potentiel de tassement p. ex. qui, sur base d'une étude géotechnique bien faite, se consume lors de la consolidation.

5.3 Reconnaissance de la surconsolidation du massif argileux pyriteux toarcién à l'aide du pressiomètre MENARD

5.3.1 Gonflement de déchargement naturel et de déchargements occasionnés par des travaux de terrassements

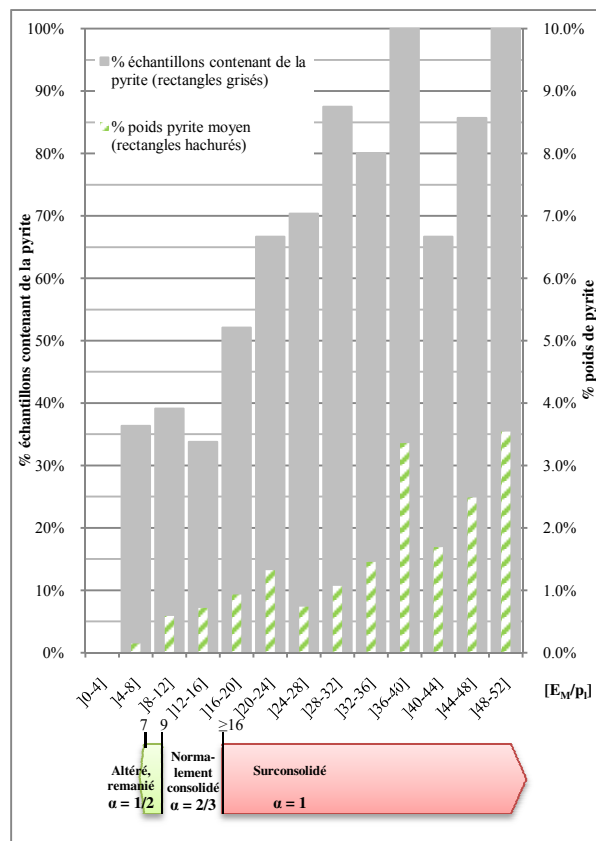


Figure 4: Evolution de la teneur en pyrite en fonction de l'état de consolidation du massif de schiste pyriteux, exprimé par le rapport E_M/p_i ; p_i = pression limite pressiométrique
 E_M = module pressiométrique vierge obtenu à partir d'un essai pressiométrique standard sans cycles
 α = coefficient de structure, introduit dans les formules de tassements T0 à T5 (Gambin 1963, 1990, Ménard 1975), variable selon la nature (argiles dans le cas présent) et l'état de consolidation des sols et des roches.

$$\alpha = (E_M/E_a)^{1/2} \quad (1)$$

avec E_a = module de déchargement obtenu à partir d'un essai pressiométrique cyclique (Ménard et Rousseau 1962, Baud et Gambin 2013, Baud, Gambin, Heintz 2013)

Des surlongueurs occasionnelles de carotte dans un forage pressiométrique carotté ainsi que le rapport E_M/p_i (figure 4) font apparaître la présence de couches surconsolidées dans le massif des schistes pyriteux ce qui s'accorde avec l'histoire géologique relatée en introduction de l'article: sur son chemin post-diagénétique (cf. figure 3) dans le cycle des roches (Baud et Gambin, 2013), le massif d'argilites a sauvegardé les conditions de sa genèse en milieu anoxique et celles de sa surconsolidation sous une colonne de couches sédimentaires de l'ordre de 1000 mètres.

Lors de son ascendance qui est toujours en cours, l'érosion crée un déchargement naturel. En conséquence, les plans de stratification des argilites se décollent faisant apparaître le litage fin, créant une perméabilité à l'air qui déclenche le gonflement naturel. Les histogrammes ci-dessus montrent une progression de la teneur moyenne en poids de la pyrite jusqu'à atteindre le début d'un palier indiquant +/-2,5% dans la zone du toit des argiles compactes, $p_l > 4,5$ MPa (cf.

figure 3) et dans la classe $36 < E_M/p_i < 40$ (cf. figure 4).

Ces valeurs indiquent la limite inférieure du massif décomprimé et la perméabilité limite à l'air, exprimée indirectement en termes de pressions limites pressiométriques:

- au-delà de cette limite, dans les couches sous-jacentes, les conditions anoxiques sont préservées, la pyrite est stable dans son milieu originel; c'est le toit d'une zone inerte (cf. figure 3) qui se poursuit jusqu'à la base du Toarcién (cf. figure 1);

- en deçà de cette limite, dans les couches sus-jacentes, la zone de réaction s'étend jusqu'aux couches proches de la surface, exemptes de pyrite.

Ces réactions conjuguées de décompression et de gonflement subséquent sont naturelles. Elles sont pilotées par une vitesse d'ascendance du socle ardennais (cf. figure 2) de 1,2 mm/an dans la région du Luxembourg, décroissante dans les régions limitrophes à l'ouest et au sud (Garcia-Castellanos, Cloetingh, Van Balen, 2000). Elles n'ont pas d'effets détériorants à l'égard des constructions.

Par contre, un déchargement sous forme de terrassement de ces couches est assimilable à une augmentation brutale de la vitesse d'ascension naturelle, provoquant une augmentation conséquente de la décompression, de la perméabilité à l'air et du gonflement pyriteux subséquent, avec effets destructifs sur les constructions mal dimensionnées à cet égard - ce qui nous amène à présenter la synthèse ci-dessous:

6) gonflement classique des argiles	désordres en cas d'études géotechniques méconnaissant les phénomènes de gonflement
5) gonflement pyriteux généré artificiellement	
4) gonflement de décompression généré artificiellement	sans effets destructifs pour les constructions (phase destructive dans le cycle de la matière)
3) gonflement pyriteux naturel	
2) gonflement de décompression naturelle	
1) «gonflement» naturel d'ascendance du socle	

Tableau 3: Types de gonflement cumulatifs et leur impact sur la bonne tenue des constructions fondées dans le schiste pyriteux; ordre de présentation suivant l'approche de la géologie appliquée à la géotechnique

Dans ce contexte on relira avec profit le paragraphe 4.7 'Tassement d'un ouvrage fondé dans une excavation' dans la brochure D60 (Ménard, 1975).

Ainsi l'investigation des schistes pyriteux toarciens à l'aide du pressiomètre MENARD permet de mettre en évidence un gonflement potentiel de déchargement, différent du gonflement pyriteux, et les échantillons d'analyses géochimiques et minéralogiques peuvent être utilisés subsidiairement pour l'analyse du gonflement classique des argiles.

5.3.2 Contrôle du choix du coefficient α , module d'élasticité

Le degré de surconsolidation et la nature du schiste n'étant pas constants, on choisira dans un premier temps $\alpha = 1$ suivant les recommandations de la brochure D60 ce qui peut être vérifié à l'aide d'essais pressiométriques cycliques. Ces essais ainsi que des essais pressiométriques de haute sensibilité avec lectures au 50^{ème} de cm³, effectués à l'aide du pressiomètre MENARD GA, permettent de mesurer des déplacements micrométriques de la paroi des forages, donnant des modules de micro-déformation, comparables aux modules dits élastiques (Ménard 1961, Ménard et Rousseau 1962). Ces modules peuvent servir de paramètre dans un calcul aux éléments finis, s'il est jugé opportun d'appréhender le risque de gonflement de déchargement suivant cette méthode (Boulon, Flavigny, Gambin 1996).

6 SYNTHÈSE

Les auteurs conçoivent l'article comme document d'orientation dans l'investigation du schiste pyriteux toarcien potentiellement gonflant à l'aide du pressiomètre MENARD.

Cet article n'aborde pas les sujets concernant le dimensionnement des parades anti-gonflement, - autre volet spécial pouvant bénéficier de la mise à profit des valeurs pressiométriques.

6.1 Les conditions de genèse, l'affleurement régional, les causes et les effets de gonflement du schiste pyriteux toarcien sont présentés en introduction, dans la première partie de l'article.

6.2.1 Dans la deuxième partie de l'article, il est rappelé que:

- les pressions limites pressiométriques permettent de reconnaître la décompression naturelle du massif d'argiles pyriteuses ascendant;

- les analyses minéralogiques et géochimiques effectuées sur des échantillons de carotte de forages pressiométriques carottés permettent de mesurer la teneur en pyrite au laboratoire.

6.2.2 La relation de cause à effet entre la décompression croissante et la teneur en pyrite décroissante, accompagnée de gonflements, nous a conduit à dresser un tableau du potentiel de gonflement par couches, classées sensiblement en fonction des plages de pressions limites pressiométriques suivant les recommandations du Fascicule 62 qui permet:

- d'orienter la prise d'échantillons destinés aux analyses minéralogiques et géochimiques en l'occurrence de la teneur en pyrite;

- de cibler la densité d'échantillonnage en fonction des classes de sol et de la mise en place prévisionnelle de parades anti-gonflement;

- d'abandonner l'approche classique d'échantillonnage systématique, à interdistances régulières à l'instar de la disposition des essais pressiométriques,

6.3 Dans la troisième partie il est montré que l'investigation des schistes pyriteux toarciens à l'aide du Pressiomètre Ménard permet

- de reconnaître l'état de surconsolidation du massif en fonction du rapport E_M/p_i ;

- de mettre ainsi en évidence un gonflement potentiel de déchargement, différent du gonflement pyriteux;

- de vérifier le bon choix du coefficient α pour mener à bien les calculs de tassements;

- de fournir au besoin un module d'élasticité, éventuellement réclamé par certains programmes de modélisation, pour évaluer le risque de gonflement de déchargement par un calcul aux éléments finis.

7 CONCLUSION

L'article montre que le pressiomètre MENARD est un instrument de mesure polyvalent, de haute précision, utile pour la reconnaissance des sols pyriteux, potentiellement gonflants, et qui pourrait trouver son application dans l'investigation de faciès semblables, connus stratigraphiquement depuis l'ère Primaire et présents dans le monde entier.

8 REMERCIEMENTS

Nous remercions J. Bintz, directeur e.r. Service Géologique, Luxembourg, les Prof. e.r. A. Kies, Uni Luxembourg; et J. Nuyens, ULBruxelles pour leurs critiques; K. Chini, géologue, Ch. Schroeder, secrétaire, Eurasol s.a. pour la relecture et la mise en forme de l'article.

Les auteurs seuls sont responsables pour d'éventuelles fautes qui se seraient glissées dans le texte.

9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR 1991. Norme française NF P94-110, Paris
- Baud J.-P., Gambin M. 2013. Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama, 18^{ième} CIMSTF, ISP6, Paris
- Baud J.-P., Gambin M., Heintz R. 2013. 50 MPa Ménard PMTs Help Linking Soil and Rock Classifications, 18^{ième} CIMSTF, ISP6, Paris
- Baud J.-P., Gambin M. 2013. Soil and Rock Classification from High Pressure Borehole Expansion Tests. Geotechnical and Geological Engineering Journal, Special Issue on Hard Soils and Weak Rocks, Springer, Berlin
- Bintz J. 1984. Géologie, géochimie et possibilités d'exploitation des schistes bitumineux luxembourgeois. – Revue technique 4, Luxembourg
- Boulon M., Flavigny E., Gambin M. 1996. Le module pressiométrique: historique et modélisation. II^e Colloque Franco-Polonais en Mécanique des Sols et des Roches Appliquée, Gdansk
- CEN 2012. Norme européenne EN-ISO 22476-4
- Delsate D. 1997. Les couches à "Leptaena (Koninckella)" sur l'aurole orientale du Bassin de Paris. Anoxie et notion de crise biologique au Toarcien inférieur. Trav. Sci. Mus. Nat. Hist. Nat. Lux. 27. Luxembourg
- Faber G. 1947. Recherches en vue de la possibilité d'une exploitation industrielle du schiste bitumineux du Toarcien dans le Grand-Duché de Luxembourg, Publ. Serv. Géol., Volume VII, Luxembourg
- Faber G., Lucius M. 1956. Les schistes bitumineux du Toarcien dans l'aire de sédimentation luxembourgeoise. Nouvelles recherches sur les possibilités d'une exploitation industrielle, Publ. Serv. Géol., Vol. XII, Luxembourg
- Fascicule 62, titre V, 1993. Règles techniques de conception et de calcul de fondation des ouvrages de Génie Civil. M.E.L.T.T.
- Gambin M. 1963. Calcul du tassement d'une fondation profonde en fonction des résultats pressiométriques, Sols-Soils, N°7 Paris
- Gambin M. 1990. Constance et évolution des règles pressiométriques. 2^{èmes} Journées Techniques Internationales du CAMSOR, Tlemcen (Algérie)
- Garcia-Castellanos, D., Cloetingh S., Van Balen R.T., 2000. Modelling the middle Pleistocene uplift in the Ardennes-Rhenish Massif: thermo-mechanical weakening under the Eifel? – Global Planet. Change 27, Elsevier, Amsterdam
- Hanzo M. 1979. Milieu de dépôt et évolution diagénétique des argilites toarciennes d'après l'étude de nodules carbonatés des «Schistes carton» de Bettembourg (Grand-Duché de Luxembourg) Sciences de la Terre, Tome XXIII, Nancy
- Heintz R. 2005. Rapport national du Grand-Duché de Luxembourg, ISP5 – PRESSIO 2005 (50 ans de pressiomètres) vol. 2 Gambin, Magnan and Mestat (ed), LCPC, Paris
- Joly H., Ninck 1935. Un cas très particulier de désordres causés par les modifications épigénétiques de roches liasiques (schistes à posidonies du Toarcien de Lorraine) Congrès Intern. Des Mines, de la Métallurgie et de la Géologie Appliquée, VIIe Session T. II, Paris
- Lexa-Chomard A. et Pautrot C. 2006. Géologie et Géographie de la Lorraine. Editions Serpenoise, Metz
- Lucius M. 1948. Erläuterungen zur geologischen Karte Luxemburgs. Das Gutland. Publ. Serv. Géol. Volume V, Luxembourg
- Ménard L. 1961. Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation, V^e ICSMFE, Paris
- Ménard L. Rousseau J. 1962. L'évaluation des tassements, tendances nouvelles. Sols Soils, N°1, Paris
- Ménard L. 1975. The interpretation of pressuremeter test results, Sols-Soils, N°26 Paris
- Penner, E. Eden, W. J., Gillot, J. E. 1973. Floor heave due to biochemical weathering of shale. Proceedings of the 8th ICSMFE II, Moscow
- Wagner J.-F. 2004. Ingenieurgeologische Probleme im Süden Luxemburgs ("Schistes bitumineux") und Keramikrohstoffe (Villeroy & Boch, Merzig) Exkursion H am 16. April 2004, Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F. 86, Stuttgart