

Phénomènes de gonflement/ retrait dans des marnes, ou « schistes cartons », du Toarcien

A. MONJOIE

Université de Liège
Sart Tilman B19, B-4000 Liège
A.Monjoie@ulg.ac.be

C. SCHROEDER

Université de Liège, départe-
ment ArGEnCo
Sart Tilman B52/3, B-4000
Liège
Christian.Schroeder@ulg.ac.be

Résumé

Les phénomènes de gonflement / retrait observés sur les marnes du Toarcien, appelées « schistes cartons », induisent des désordres importants au niveau des fondations des ouvrages chargés différemment. Sans être directement en relation avec la sécheresse, ils sont cependant essentiellement dus aux cycles d'hydratation / dessiccation auxquelles ces roches particulières sont soumises au fil des saisons, variations hydriques pouvant être accentuées par la présence d'ouvrages chauffants (fours). L'article présente les résultats d'une étude réalisée sur les matériaux du sous-sol d'une usine présentant des gonflements permanents d'amplitude parfois décimétrique. Les essais de gonflement en laboratoire et la caractérisation minéralogique des matériaux par diffraction X permettent de mettre les mécanismes en évidence et d'expliquer ceux-ci par les variations minéralogiques (gypse-anhydrite) liées à la présence de pyrite et de calcite au sein de ces marnes.

Mots-clés : Marnes, Toarcien, schistes-cartons, gonflement, retrait, anhydrite, pyrite, gypse, essais de laboratoire et *in situ*.

Swelling/shrinkage phenomenon in Toarcian marls, or "cardboard shales"

Abstract

The swelling / shrinkage phenomenon observed on the Toarcian marl, also called "cardboard shale", causes somewhat large damage to the foundations of differentially loaded buildings. If they are not directly linked to the drought, they are nevertheless due to the seasonal hydration / drying cycles supported by these specific materials. The moisture variations can be increased by the presence of some heating buildings (ovens). The paper presents the results of a study performed on the subsoil material of a plant subjected to some permanent decimetric swellings. The laboratory swelling tests and the mineralogical X-Ray diffraction analyses allow to point out the mechanisms and their relationships with the mineralogical modifications (gypsum-anhydrite) induced by the presence of calcite and pyrite in these marls.

Key words: Marls, Toarcian, cardboard shale, swelling, shrinkage, pyrite, anhydrite, gypsum, laboratory and *in situ* tests.

NDLR : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Sur les bords septentrionaux et méridionaux du Massif ardennais, les formations transgressives du Crétacé au nord et du Jurassique au sud contiennent plusieurs horizons marneux riches en minéraux argileux interstratifiés gonflants, l'horizon de smectite de Herve au nord et les marnes du Toarcien au sud. Ces horizons sont également riches en pyrite (Fourmarier, 1954).

C'est au droit des marnes du Toarcien que des soulèvements importants des radiers de grands halls industriels ont été mis en évidence. Outre leur grande ampleur, ils ne présentent pas les caractères classiques de réversibilité : gonflement/retrait en fonction des cycles d'humidification - séchage des phénomènes dus aux minéraux argileux du type bentonite, smectite, interstratifiés illite-smectite...

Le cas étudié est relatif à un grand hall industriel où de fortes productions périodiques de chaleur accompagnent des coulées de matières en fusion au départ de fours à très hautes températures (environ 1 500 °C).

Les soulèvements des dalles du hall sont pratiquement continus sans phase de retrait, et atteignent 38 à 78 mm en 14 mois après plusieurs sollicitations thermiques apportées par les coulées de matière en fusion. L'implantation relative des points de mesures et les évolutions des gonflements sont présentées respectivement aux figures 1 et 2.

Par contre, les pieds de colonnes du hall comme ceux des fours et machines lourdes restent stables, du fait des descentes de charge importantes en ces points par rapport à la contrainte de gonflement du sol de fondation.

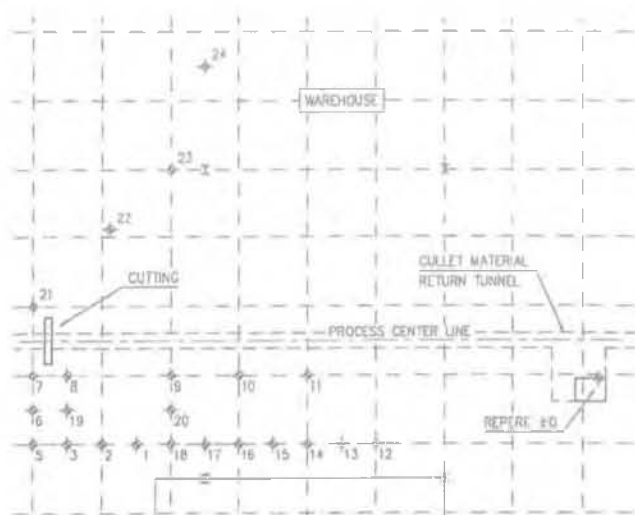


FIG. 1 Implantation relative des points de mesure des gonflements.
Relative location of measuring points of swelling.

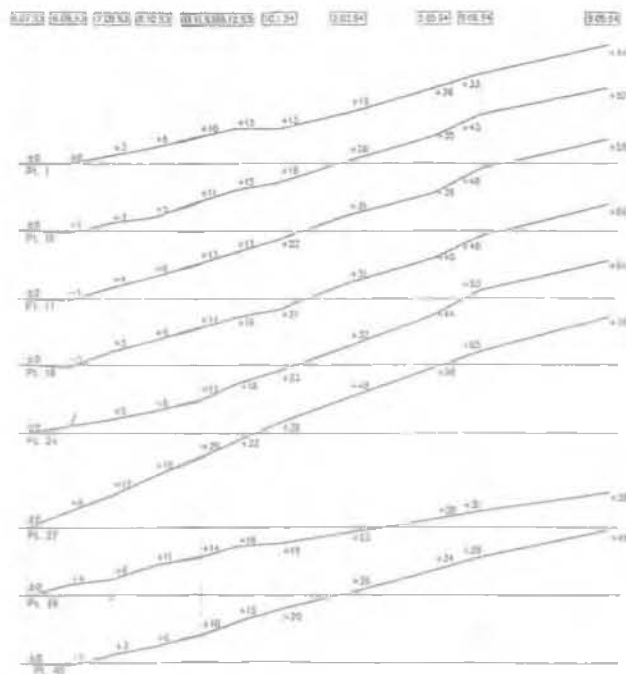


FIG. 2 Mesures de gonflement (durée : un an).
Swelling measurements (duration: one year).

Géologie régionale

Elle est caractérisée par des terrains mésozoïques (245 à 65 millions d'années) formant un paysage en cuesta. Ces terrains (Maubeuge, 1954) reposent en discordance sur un socle d'âge dévonien (400 à 360 millions d'années), qui affleure plus au nord. Les roches, au droit du site, appartiennent au Jurassique-Lias supérieur, et plus précisément à l'étage du Toarcien (187 millions d'années).

Pour reconnaître les terrains sur lesquels le hall est construit, un « tunnel » de 8 m de long et d'une section de 2 m sur 3 m a été réalisé sous le hall. Les roches présentes sont des marnes finement feuilletées, appelées « schistes cartons » dans la région en raison du faciès papyracé qu'elles présentent quand elles s'altèrent. Généralement riches en fossiles, elles contiennent de la matière organique disséminée et des sulfures, notamment de la pyrite (FeS_2), sous forme de veinettes dans les plans de stratification, de petites lentilles ou de nodules. On peut également observer de nombreuses veines de calcite (CaCO_3), d'une épaisseur comprise entre quelques millimètres et plusieurs centimètres. La plus grande partie de ces veines a cristallisé à la faveur de plans de diaclases perpendiculaires à la stratification qui est subhorizontale (pendage de 0 à 5° vers le sud-ouest). Les roches sont assez humides avec localement quelques suintements. La perméabilité des marnes est faible (10^{-7} à 10^{-8} m/s), ce qui implique que les réactions chimiques se passent en milieu pratiquement confiné.

Le lever géologique de cet affleurement artificiel est représenté à la figure 3. On y remarque la présence de bancs centimétriques à millimétriques de marnes, les filons de calcite (Ca) et les inclusions pyriteuses (Py).

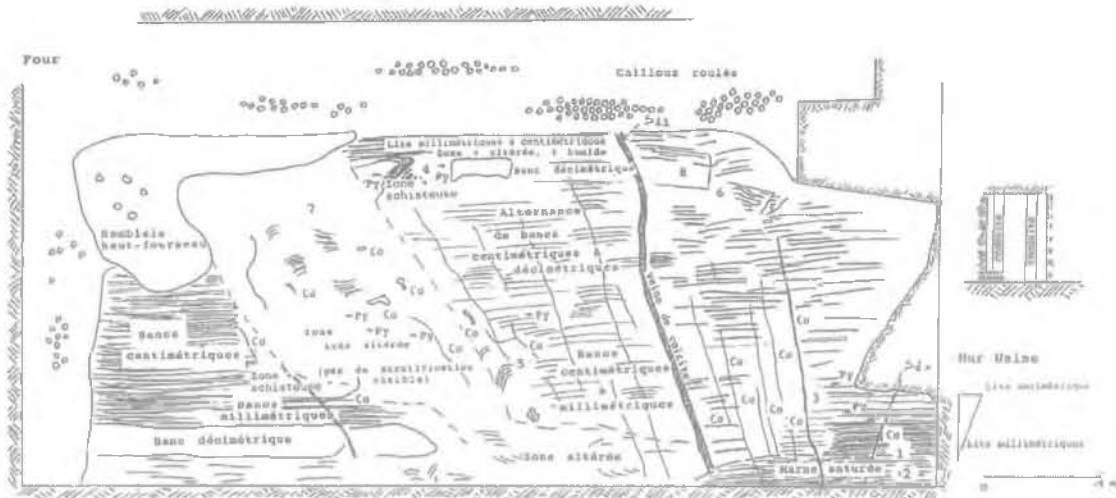


FIG. 3 Lever géologique du sous-sol de l'usine.
Geological survey of plant underground.
(Py : pyrites; Ca : calcite)

De nombreux échantillons ont été prélevés dans les différents faciès rencontrés : zones à bancs millimétriques, à bancs centimétriques, à bancs décimétriques, zones sans stratification, secteurs fissurés et altérés. Ils ont fait l'objet d'analyses minéralogiques et d'essais géotechniques.

3

Analyses minéralogiques

Les analyses ont été réalisées sur la roche totale par diffractométrie RX au moyen d'un appareil Philips PW2006 par techniques classiques sur poudre totale désorientée et sur la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$) en agrégats orientés. La nature des minéraux présents a été déterminée ainsi qu'une estimation semi quantitative¹. Un examen en lames minces a complété l'étude. Six échantillons caractéristiques ont été analysés.

Dans l'ensemble, la composition des échantillons est assez similaire.

¹ La méthodologie est celle décrite par Thorez (1976). La méthode d'estimation semi-quantitative est celle définie par Cook et al. (1975), revue et complétée par Boski et al. (1998).

Du point de vue de la roche totale, dans les 6 échantillons (tableau I), la calcite et le quartz dominent, accompagnés de la kaolinite, d'une illite ouverte, de gypse, de pyrite et de marcasite, ainsi que des traces de feldspaths, de sidérite, de jarosite. La dolomite apparaît en proportion importante (15 à 26 %) dans trois échantillons.

En lames minces, on constate que la calcite est souvent présente en fines cristallisations suivant le litage et en petites veinettes transversales. Le quartz est généralement présent sous forme de veines.

Du point de vue de la fraction argileuse, les constituants sont par ordre décroissant (tableau II), la kaolinite, une illite ouverte par départ des ions K^+ des espaces interfoliaires, un interstratifié irrégulier (10-(10-14Sm)) à feuillettes illitiques dominants et smectitiques, un interstratifié irrégulier (10-14C) à feuillettes illitiques et chloritiques et de la chlorite.

En résumé, les roches formant le sous-sol du site contiennent en moyenne 20 % de minéraux argileux, dont environ 10 % sont gonflants (représentant environ 2 % de la masse totale). Ces minéraux gonflants, même en faible quantité, provoquent un gonflement significatif (Monjoie et al., 1992, Monjoie, 1997).

TABEAU I Analyse de la roche totale.

Échantillon	1	2	3	5	6	9
Calcite	53 %	24	37	48	57	63
Quartz	30 %	49	30	34	20	9
Kaolinite	5 %	7	7	6	2	1
Illite ouverte	3 %	5	4	4	1	Traces
Pyrite	2,5 %	5	3	1	< 1	1
Marcasite	2,5 %	2	2			
Gypse	1 %	4	2	6	4	
Dolomite			15		15	26
Sidérite	3 %	1		Traces	?	?
Feldspath	Traces	1	Traces	1	Traces	Traces
Jarosite	?	?	?	Traces	?	?
Chlorite		1				

TABIEAU II Analyses de la fraction argileuse.

Échantillon	1	2	3	5	6	9
Kaolinite	36	37	41	40	48	55
Illite ouverte	27	30	26	27	21	22
10-(10-14Sm)	24	20	20	20	15	12
10-14 C	7	6,5	5	6	9	5
Chlorite	6	6,5	8	7	7	6
Vermiculite	?	?	?	?	?	?

4

Essais classiques de gonflement (1^{re} phase)

Ces essais consistent en la réalisation en parallèle d'un essai de gonflement libre et d'une mesure de la pression de gonflement.

Pour la mesure du gonflement libre, l'échantillon (diamètre 50 mm, hauteur 20 mm) est posé sur un support et surmonté d'une plaque sur laquelle vient poser un capteur de déplacement permettant la mesure de la variation de hauteur de l'échantillon au cours du temps. L'essai comprend des cycles d'humidification (par aspersion en continu de l'échantillon) et de séchage « naturel » à l'air ambiant, avec un pas de temps de quelques heures (Fig. 4) au cours desquels on mesure l'amplitude du gonflement et l'amplitude du retrait.

La pression de gonflement est mesurée par un essai de gonflement empêché. Il consiste à placer l'échantillon dans un oedomètre standard, avec une contrainte initiale nulle. Ensuite, l'échantillon est humidifié par aspersion et la déformation axiale (changement de hauteur de l'échantillon) est surveillée. Sitôt qu'une déformation (1/100 mm) est détectée, la contrainte sur l'échantillon est augmentée, de manière à conserver une déformation nulle.

Sept échantillons ont été testés lors de plusieurs cycles d'humidification - séchage.

Globalement (tableau III), à l'exception de l'échantillon n° 9, le moins riche en 10-(10-14Sm), qui gonfle peu), les échantillons ont un comportement similaire tel que présenté à la figure 4, relative à l'échantillon n° 2.

TABIEAU III Valeurs de gonflement maximum et des contraintes de gonflement.

Échantillon	Gonflement maximal (%)	Contrainte de gonflement (kPa)
1	1.95	21
2	1.30	56
3	1.75	50
5	2.15	50
6	1.80	36
8	--	25
9	0.21	25

On constate que :

– le gonflement libre se manifeste dès le début de l'humidification. Il augmente assez rapidement (en quelques heures), et se stabilise ensuite ;

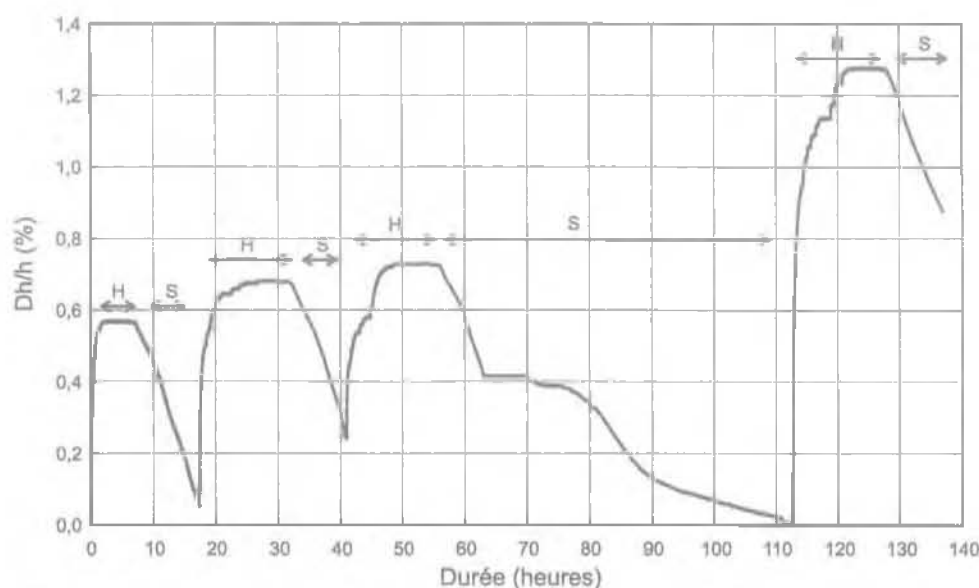


FIG. 4 Essai de gonflement - retrait sur marne pure; on remarque la réversibilité totale. H : phase d'humidification ; S : phase de séchage.

Swelling and shrinkage test on pure marl; note the complete reversibility. H: soaking phase; S: drying phase.

- le retrait en cours de séchage est pratiquement complet ;
- les valeurs de gonflement atteintes au cours de cycles ultérieurs de humidification/séchage ne dépassent pas ou peu la valeur atteinte au cours du premier gonflement et ne sont pas inférieures. Ceci indique que le matériau conserve son pouvoir gonflant ;
- après un essai de mesure de la contrainte de gonflement (essai à gonflement empêché), l'échantillon a gardé toutes ses capacités de gonflement et retrait.

Le gonflement maximal absolu est de 2,15 % et la contrainte de gonflement maximale absolue est de 56 kPa.

Cette première phase d'essais (Fig. 4) montre que le gonflement classique, dû aux seuls minéraux argileux gonflants du type 10-(10-14Sm), ne permet pas d'expliquer les soulèvements nettement plus importants et permanents constatés *in situ*.

Il est donc évident que d'autres processus entraînent en jeu.

5

Processus physico-chimiques en jeu

Le contenu minéralogique des roches prélevées dans le « tunnel » (tableau I) indique la présence de calcite (et parfois de dolomite), de pyrite et marcasite, de gypse, d'où l'hypothèse de réactions physico-chimiques affectant les pyrites et marcasites en présence d'H₂O et d'oxygène, avec formation d'H₂SO₄, qui attaque la calcite (et la dolomite), avec production d'anhydrite (CaSO₄) peu soluble mais, qui en présence d'eau, se transforme en gypse avec une augmentation volumique de plus de 60%.

Les réactions successives sont les suivantes:

- 1) $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$
- 2) $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \text{ (anhydrite)} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 3) $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (gypse)}$ avec gonflement de plus de 60 %

Différentes autres réactions (Monjoie et Schroeder, 2001) peuvent produire de la sidérite (FeCO₂), de la jarosite KHF₆(SO₄)₃(OH), minéraux présents dans certains échantillons analysés (tableau I).

La réaction la plus importante est l'oxydation des sulfures de fer avec production d'acide sulfurique. Cette réaction est exothermique d'où une augmentation de température qui accélère la réaction.

Le séchage empêche la solubilisation du gypse, ce qui stabilise le gonflement acquis.

Dans ces conditions, les réactions sont quasi irréversibles d'où un gonflement permanent et l'absence de retrait.

6

Essai de longue durée et à long terme (2^e phase)

Des essais de longue durée, similaires à ceux qui ont été décrits au chapitre 4, ont été entrepris avec des périodes de plusieurs jours pour les humidifications et les séchages.

La figure 5 présente simultanément les résultats obtenus sur deux échantillons « compagnons » testés simultanément, l'un en gonflement libre, l'autre en gonflement empêché.

Après 1 300 heures (54 jours), le gonflement atteint environ 5 %. La contrainte de gonflement augmente en début d'essai puis se stabilise vers 80 à 90 kPa. Il est à noter que la contrainte de gonflement demeure inchangée au cours des cycles, ce qui est bien conforme avec le mécanisme suggéré.

Le gradient du gonflement augmente après 500 heures, puis 700 heures et ralentit légèrement après 960 heures.

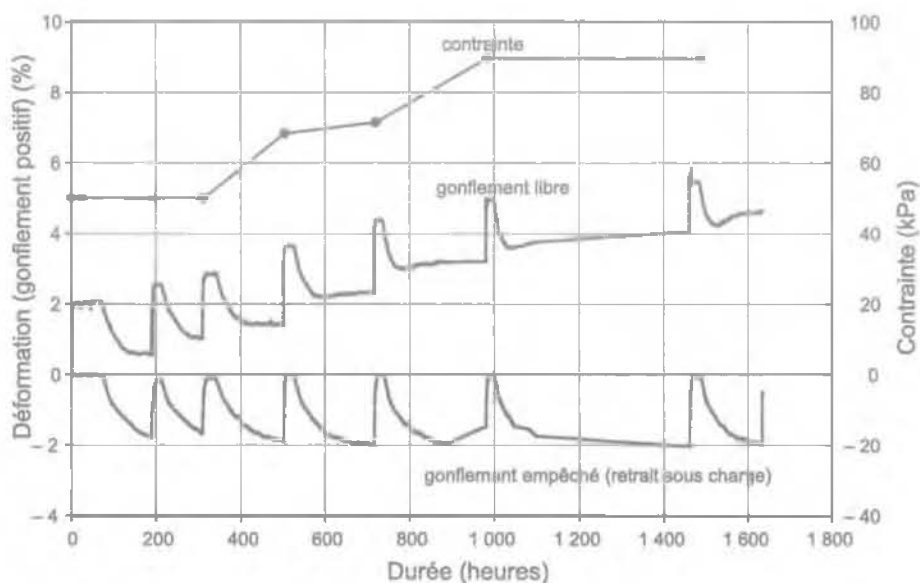


FIG. 5 Essai de longue durée sur une période de 54 jours ; mesure du gonflement libre et de la pression de gonflement.
Long duration tests: 54 days period; measurement of free swelling and of swelling pressure.

Conclusion

Les résultats des essais de gonflement en laboratoire montrent le comportement très spécifique des « schistes cartons » testés.

Ces essais permettent d'expliquer les phénomènes observés *in situ* : gonflement des sols peu chargés tandis que les colonnes restent stables en raison des descentes de charges supérieures à la pression de gonflement.

Les analyses minéralogiques confirment la présence de gypse et anhydrite, la formation séquentielle de l'un et l'autre minéral au cours des cycles d'hydratation / séchage expliquant, lors de la dessiccation, la non réversibilité du gonflement provoqué par l'hydratation. Cette évolution pourrait être contrôlée par des analyses DRX à différents stades de l'essai avec quantification de certains minéraux, diminution de la teneur en pyrite, augmentation de la teneur en gypse... Le flux hydraulique faible dans les marnes joue un rôle important dans la pérennité du phénomène.

La partie inférieure de la figure 5 montre la compaction lors du cycle de séchage de l'échantillon à gonflement empêché. Cette compaction (retrait) est sensiblement constante au cours des cycles.

L'essai de gonflement libre a été poursuivi à long terme jusqu'à 206 jours (Fig. 6). Le gonflement atteint environ 25 %. Durant cette phase, le gradient du gonflement diminue légèrement après 50 jours, et de façon plus marquée après 105 jours.

Chaque dessiccation s'accompagne d'une déformation additionnelle permanente en fin de cycle, de sorte que, cycle après cycle, le gonflement total permanent augmente assez régulièrement. Ce phénomène est lié aux changements minéralogiques décrits ci-avant et, vraisemblablement, au piégeage d'éléments néoformés, empêchant l'échantillon de reprendre par retrait sa dimension originelle. Sur l'échantillon testé, le phénomène s'est poursuivi jusqu'à un gonflement total de l'ordre de 25 % qui aurait sans doute pu atteindre des valeurs plus élevées si l'échantillon ne s'était rompu par délitage, le phénomène pouvant théoriquement continuer jusqu'à la consommation totale de la calcite et de la pyrite présentes.

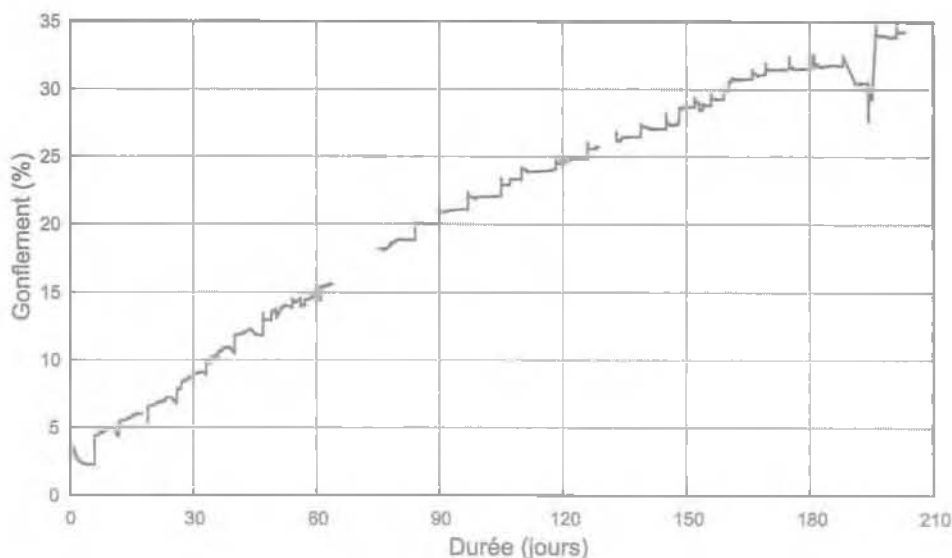


FIG. 6 Essai de longue durée sur une période de 150 jours.
Long duration tests: 150 days period.

Bibliographie

- Boski T., Pessoa J., Pedro P., Thorez J., Dias J.M.A., Hall I.R. - Factors governing abundance of hydrolysable amino acids in the sediments from the NW European Continental Margin (47-50°N). *Progress in Oceanography*, 42, 1998, p. 145-164.
- Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zimmel J. - Methods of sample preparation and x-ray diffraction analysis in x-ray mineralogy laboratory. In Kaneps A.G. et al. (eds.), *Init. Repts DSDP XXVIII*, Print. Office, Washington DC, 1975, p. 997-1007.

- Maubeuge P. - Le Trias et le Jurassique du sud-est de la Belgique. *Prodrome d'une description géologique de la Belgique-Hommage à Paul Fourmarier*, Société Géologique de Belgique, Liège, 1954, 826 p.
- Monjoie A., Rigo J.-M., Polo-Chiapolini C. - *Vade-Mecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité-drainage artificiels pour les sites d'enfouissement technique en Wallonie*, Derouaux, 1992.
- Monjoie A. - Géologie de l'ingénieur et processus géomorphologiques. *Rapport général du thème 1 du Symposium*

- Int. de Géologie de l'Ingénieur*. Athènes, Grèce, 1997, 9 p., 5 fig.
- Monjoie A., Schroeder Ch. - Instabilités de versants de terrils en relation avec l'autocombustion des schistes et charbons résiduels. *Revue française de géotechnique* n° 95-96, 2001, p. 91-102.
- Thorez J. - *Practical identification of clay minerals*, G. Lelotte ed., Dison, Belgique, 1976.