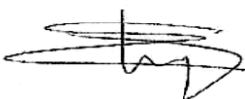
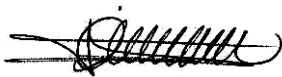



# **Analyses minéralogiques** **Caractérisation géotechnique** **(forages sur la commune de Lochwiller - 67)**

## GEODERIS

**Rapport d'avancement**  
**décembre 2015**

**Ce document comporte 18 pages**  
**(hors couverture et annexes)**

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
Nom	C. AUVRAY	E. FOURREAU	D. GRGIC
Qualité	Ingénieur de Recherche	Assistant Ingénieur	Maître de conférence - HdR
Visa			

# Sommaire

<b>1-</b>	<b>CADRE DE L'ETUDE</b> .....	<b>4</b>
<b>2-</b>	<b>PREPARATION DES ECHANTILLONS</b> .....	<b>4</b>
<b>3-</b>	<b>CONDUITE DES MESURES ET DES ESSAIS</b> .....	<b>4</b>
	3.1- Analyse minéralogique .....	4
	3.2- Essais géotechniques .....	5
<b>4-</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>9</b>
	4.1- Analyse minéralogique .....	9
	4.2- Essais géotechniques .....	13

## Liste des figures

Figure 1 - Représentation des limites d'Atterberg.....	6
Figure 2 - Représentation schématique de la cellule œdométrique.....	7
Figure 3 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-7 (pression injection = 0.10MPa et pression de confinement = 0.33MPa).....	16
Figure 4 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-20 (pression injection = 0.16MPa et pression de confinement = 0.52MPa).....	16
Figure 5 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC7-16 (pression injection = 0.45MPa et pression de confinement = 1.50MPa).....	17
Figure 6 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC5-18 (pression injection = 0.25MPa et pression de confinement = 0.90MPa).....	17
Figure 7 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC6-17 (pression injection = 0.18MPa et pression de confinement = 0.70MPa).....	18

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Identification des espèces minérales - Sondage SC4 (*différenciation de la bassanite par DRX).....	9
Tableau 2 - Identification des espèces minérales - Sondage SC5 (*différenciation de la bassanite par DRX).....	10
Tableau 3 - Identification des espèces minérales - Sondage SC6 (*différenciation de la bassanite par DRX).....	11
Tableau 4 - Identification des espèces minérales - Sondage SC7 (*différenciation de la bassanite par DRX).....	12
Tableau 5 - Paramètres physiques - Sondage SC4.....	13
Tableau 6 - Paramètres physiques - Sondage SC5.....	14
Tableau 7 - Paramètres physiques - Sondage SC6.....	14
Tableau 8 - Paramètres physiques - Sondage SC6.....	15

## 1- CADRE DE L'ETUDE

A la demande GEODERIS « Demande de prestations pour la réalisation d'analyses minéralogiques et d'essais géotechniques sur des carottes issues de forages de Lochwiller (67) » référencé "CAHIER DES CHARGES E2015/025DIO - 15ALS21010" en date du 02/07/2015, l'ASGA-GeoRessources a réalisé :

- Analyses minéralogiques : détermination de la part volumique de chaque phase rencontrées ;
- Essais géotechniques : évaluation de la teneur en eau, de la masse volumique humide et sec; évaluation de la porosité ; évaluation des limites d'Atterberg, évaluation de la valeur au bleu de méthylène des phases argileuses ; essais œdométriques

Ce document présente la totalité des résultats minéralogique, l'ensemble des paramètres physiques et les résultats partiels des essais œdométrique.

## 2- PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les analyses minéralogiques nécessitent deux type de préparation :

- la fabrication d'une lame mine pour réaliser un comptage des espèces minérales
- la fabrication d'une poudre avec une fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  afin de pouvoir réaliser des diffractions des rayons X (DRX). Cette technique permet : i) de déterminer la fraction argileuse et ii) de réaliser une détermination semi-quantitatives des espèces minérales.

Les essais géotechniques (paramètres physiques, essais oedométriques) nécessitent la préparation d'une poudre et d'échantillons cylindriques d'un diamètre de 38mm et d'un élanement de 20mm.

## 3- CONDUITE DES MESURES ET DES ESSAIS

### 3.1- Analyse minéralogique

La fabrication d'une lame mince permet d'identifier les différentes espèces minérales en lumière polarisée analysée (LPA) et en lumière polarisée non analysée (LPNA). La technique de comptage permet de quantifier les proportion de ce différentes espèces. Environ 600 points sont identifiés pour une surface de 30mm x 45mm. Ce comptage n'est possible qu'avec des matériaux présentant une cristallisation pluri-micrométrique. Dans le cas de matériaux marneux, le comptage s'avère difficile voire impossible à cause de la taille des différents constituants.

Pour la diffraction des rayons X, la technique est bien connue. Elle applique la loi de Bragg :  $2d \sin \theta = n \cdot \lambda$  où :  $\theta$  est l'angle de diffraction d'un rayonnement ;  $\lambda$  est la longueur d'onde émise par une anticathode ;  $d$  est la distance atomique entre deux plans d'un même cristal ;  $n$  est un numéro entier. La source anticathodique étant connue et les angles de diffraction mesurés, la distance atomique est obtenue par application de l'équation. La distance atomique ( $d$ ) ou interréculaire des cristaux est caractéristique de chaque minéral, ceci permet l'identification des différents minéraux. Pour la fraction argileuse, la position de la réflexion de base varie selon les minéraux argileux mais des minéraux différents peuvent présenter la même position de leur réflexion de base; la détermination des minéraux argileux est donc fondée sur l'étude combinée d'un diffractogramme réalisé sans traitement préalable, d'un diffractogramme réalisé après

## GEODERIS

saturation par l'éthylène-glycol, et par l'étude d'un diffractogramme réalisé après chauffage à 490° pendant deux heures.

### 3.2- Essais géotechniques

#### *Identification physique :*

##### *Teneur en eau :*

La teneur en eau est mesurée par différence de masse d'un échantillon avant et après passage à l'étuve.

Elle est déterminée suivant la norme NF P 94-410-1 :

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (1)$$

avec :

$$m_w = m_2 - m_3$$

$$m_d = m_3 - m_1$$

où :

$m_w$  est la masse d'eau ;

$m_d$  est la masse de matériau sec ;

$m_2$  est la masse de la prise d'essai et de son contenant avant le passage à l'étuve ;

$m_1$  est la masse du contenant ;

$m_3$  est la masse de la prise d'essai et de son contenant après le passage à l'étuve.

La teneur en eau est exprimée en pourcentage et l'intervalle est de 0,1. Pour que cette mesure soit valide, le conditionnement des sondages et des éprouvettes entre chaque manipulation doit être parfaitement étanche afin de conserver les conditions hydriques naturelles du matériau.

#### *Masses volumiques :*

Les masses volumiques sèches et naturelles sont déterminées sur un échantillon géométriquement « parfait » c'est-à-dire un cylindre ou un prisme. Dans le cas contraire, ces paramètres seront déterminés par pesée hydrostatique sur des morceaux. Pour la masse volumique des grains indispensable au calcul de la porosité, l'échantillon est sous forme de poudre : nous prélèverons donc un échantillon représentatif de la zone étudiée. Les procédures utilisées pour la détermination de ces paramètres sont les normes AFNOR NF P94-410-1 / -2.

#### *Porosité apparente :*

La porosité apparente est calculée à partir de la masse volumiques sèche et de la masse volumique des grains en fonction de la norme AFNOR NF P94-410-3. La taille des pores atteints avec cette mesure ne peut excéder quelques millimètres.

## GEODERIS

### Limites d'Atterberg :

On détermine les teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers du matériau :

- limite de liquidité ( $w_L$ ) : teneur en eau du matériau remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

- limite de plasticité ( $w_p$ ) : teneur en eau du matériau remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

Il en est déduit l'**indice de plasticité** ( $I_p$ ) : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique et il est utilisé avec la teneur en eau naturelle dans la détermination de l'**indice de consistance** ( $I_c$ ) : rapport défini par la formule :  $I_c = (w_L - w) / I_p$ , où  $w$  est la teneur en eau du matériau dans son état naturel et ne comportant pas d'éléments supérieurs à 400  $\mu\text{m}$ . N'oublions pas non plus qu'il peut être mesuré une limite de retrait ( $w_R$ ).

Les teneurs en eau sont exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

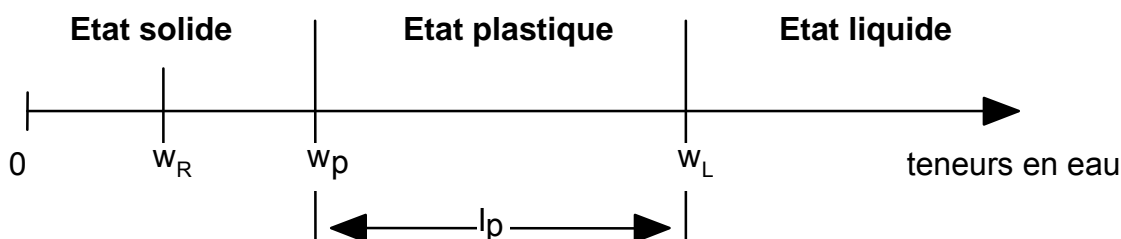


Figure 1 - Représentation des limites d'Atterberg

Cette procédure répond à la norme NF P95 0-51, elle est destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg et s'applique aux matériaux dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400  $\mu\text{m}$ .

### Valeur au bleu de méthylène des phases argileuses :

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du matériau. La valeur de bleu est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le matériau, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des minéraux argileux présents dans la fraction fine.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante se produit à la périphérie de la tache.

Cette valeur est déterminée en suivant la norme NF P94-068.

## Caractérisation hydromécanique :

La réalisation d'essais œdométriques sur des échantillons de roches, et en particulier de roches peu perméables requiert un dispositif expérimental qui permet :

- 1 – d'assurer un ajustement du diamètre de l'échantillon, par rapport au diamètre interne de la cellule (déformation radiale nulle) et un effritement superficiel minimal de l'éprouvette lors de sa mise en place dans le corps de cellule indéformable,
- 2 – de maintenir une contrainte axiale stable au cours de chacun des paliers,
- 3 – de maintenir une pression interstitielle stable au cours de chacun des paliers,
- 4 – d'optimiser les conditions de drainage aux deux extrémités de l'éprouvette afin de limiter le temps d'essai,
- 5 – d'avoir une précision et une plage de mesure des déformations axiales adaptées au protocole fixé pour les phases de déchargement en contrainte axiale à pression interstitielle constante et les phases de chargement en pression interstitielle à contrainte axiale constante, et à la déformation maximale de l'éprouvette au cours de l'essai (déformation totale obtenue sous l'état de contrainte effective maximal).

Afin de faciliter l'introduction des éprouvettes dans les corps de cellule indéformable et pour limiter leur effritement superficiel, les bords des corps de cellule sont biseautés (Figure 2).

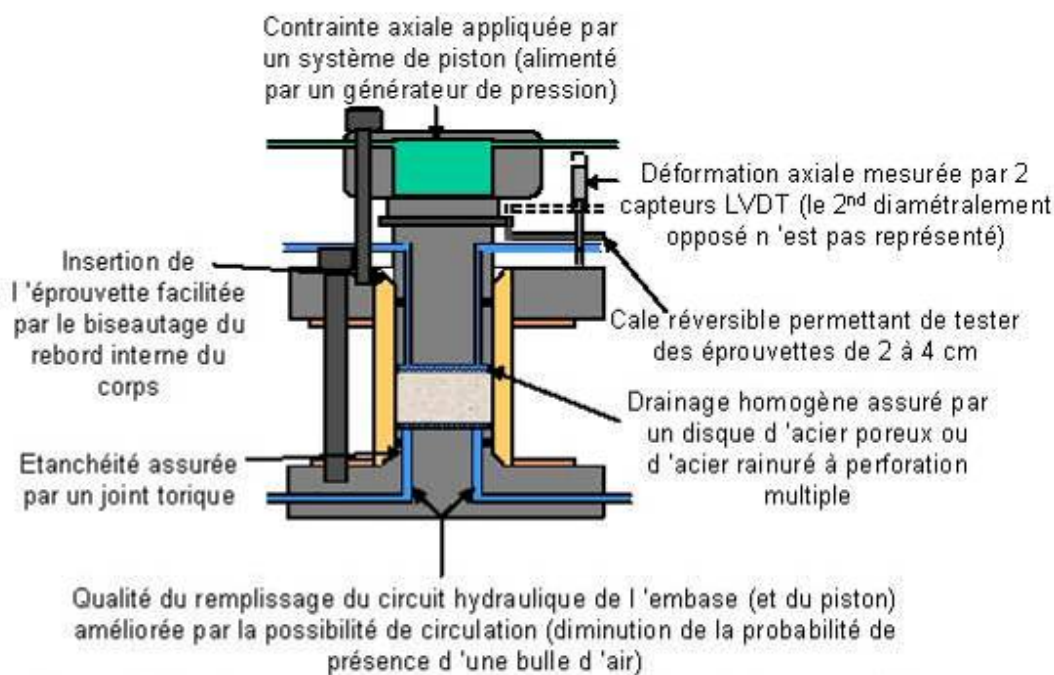


Figure 2 - Représentation schématique de la cellule œdométrique

De plus, pour obtenir un ajustement optimal entre le diamètre des éprouvettes et le diamètre interne des corps de cellules indéformables, les éprouvettes seront réalisées en trois étapes. Dans un premier temps, les éprouvettes seront carottées puis rectifiées, avec un carottier permettant d'obtenir des éprouvettes de diamètre supérieur à 38 mm (carottier diamanté permettant d'obtenir des éprouvettes d'un diamètre approximatif de 40 mm). Dans un second temps, un ajustement plus précis sera réalisé à l'aide de papier de verre afin d'obtenir un diamètre légèrement supérieur au diamètre interne des corps de cellules. Les éprouvettes seront ensuite introduites en force dans le corps de cellule à l'aide d'une presse. L'enfoncement sera réalisé manuellement (guidage de la presse en déplacement) à très faible vitesse. Une rotule est placée entre l'éprouvette et la presse afin de faciliter sa

## GEODERIS

mise en place dans le corps de cellule. Cette technique permet d'obtenir un effritement minimal des éprouvettes tout en assurant un bon ajustement du diamètre des éprouvettes avec le diamètre interne du corps de cellule.

Le protocole retenu est le suivant :

1 - Pression de gonflement : on mesure l'augmentation de la force axiale (et donc une contrainte en prenant en compte la section de l'échantillon) en gardant le déplacement axial constant (les déplacements radiaux sont bloqués par l'anneau œdométrique). A stabilisation de la force, nous aurons atteint la pression maximale de gonflement.

a - Chargement axial équivalent à la profondeur de prélèvement - Attente de la stabilité en déplacement axial. Blocage des déplacements axiaux

b - Injection en amont et aval du fluide (nature chimique à déterminer) avec une pression d'injection pouvant correspondre à celle in situ.

c - Enregistrement de l'augmentation de la force axiale avec un capteur de force avec une sensibilité de 0,1kN soit pour un échantillon de 38mm de diamètre, une précision de 0,09 MPa. Attente de la stabilité de la force.

2 - Potentiel de gonflement : on laisse se déformer axialement l'échantillon (les déplacements radiaux sont bloqués par l'anneau œdométrique) puis après stabilisation, on augmente la force axiale pour revenir à la hauteur initiale de l'échantillon.

a - Chargement axial équivalent à la profondeur de prélèvement - Attente de la stabilité en déplacement axial.

b - Injection en amont et aval du fluide (nature chimique à déterminer) avec une pression d'injection pouvant correspondre à celle in situ.

c - Enregistrement de l'augmentation du déplacement axial avec un capteur de déplacement ayant une sensibilité de 0,001mm. Attente de la stabilité du déplacement

d - Augmentation de la force pour retrouver la hauteur initiale de l'échantillon.

La difficulté de ces mesures est fortement liée à la nature hétérogène du matériau. Une attention particulière sera faite sur la représentativité entre l'analyse minéralogique et la pression de gonflement mesurée. Nous préconisons une seconde analyse minéralogique sur l'échantillon après l'essai œdométrique afin de vérifier l'évolution géochimique du matériau.



# GEODERIS

## 4- RESULTATS

### 4.1- Analyse minéralogique

Les observations de lames minces complétées par des mesures de diffraction des rayons X ont permis d'identifier l'ensemble des espèces minérales. Les résultats sont présentés dans les tableaux 1 à 4. L'ensemble des photographies est en annexe 1.

*Tableau 1 - Identification des espèces minérales - Sondage SC4  
(\*différenciation de la bassanite par DRX)*

échantillons	SC4_1	SC4_3	SC4_6	SC4_12	SC4_13	SC4_14
commentaires	1	2	3	4	5	6
cotes	1,25-1,35	7,80-7,95	10,40-10,60	14,30-14,40	17,50-17,60	18,80-18,90
Illite	8,7	11,1	14,3	3,2	8,5	4,8
Smectites	22,6	22,1	26,2	8,2	1,4	3,6
Chlorite	3,5	3,7	7,1	1,3	2,0	0,8
Gypse	18,0	1,0	14,8	24,4	40,0	8,6
Bassanite*				59,4		71,9
Anhydrite			5,0		1,1	4,9
Dolomite	21,9	22,1				
Calcite	23,0	31,7	25,1			
Magnesite				0,5	22,8	4,3
Quartz	0,9	8,2	7,4	3,1	21,6	1,1
Orthoclase						
Albite	1,4				2,6	
Pyrite						
Amarantite						

échantillons	SC4_15	SC4_16	SC4_17	SC4_18	SC4_19
commentaires	7	8	9	10	11
cotes	20,80-21,00	22,90-23,00	36,15	39,55-39,70	41,50-41,70
Illite	4,3	7,5	5,3	6,8	8,5
Smectites	3,2	2,8		15,0	10,8
Chlorite	0,7	2,0	0,9	5,4	1,9
Gypse		39,0	18,4	21,5	6,5
Bassanite*	39,5		65,2	28,0	20,7
Anhydrite	4,3	0,9	4,8		35,0
Dolomite	45,5	5,1	5,4	10,0	5,0
Calcite					
Magnesite		21,7			
Quartz	2,5	20,9	0,1	13,3	6,8
Orthoclase					4,9
Albite		0,1			
Pyrite					
Amarantite					

## GEODERIS

Ces résultats suscitent plusieurs commentaires qui sont précisés ci-dessous :

- 1 Gypse granulaire en remplacement de clastes sédimentaires - Nodules gypseux
- 2 Microcristaux isolés dans la matrice - Nodules gypseux
- 3 Microcristaux et macrocristaux en forme de tablettes. Remplacement probable car la densité des cristaux suit les laminations sédimentaires. Les nodules sont constitués à 99% de gypse
- 4 Nodules formés de macrocristaux allongés + gypse microcristallin en remplacement de lamines sédimentaires
- 5 Nodules formés de macrocristaux. Fractures remplies de cristaux allongés déformés (croissance des cristaux pendant l'ouverture des fractures, "crack and seal").
- 6 Nodules cristallins
- 7 Nodules en croissance dans un sédiment laminé.
- 8 Lamines macrocristallines massives pouvant correspondre à des nodules amalgamés. Présence de structures "crack and seal"
- 9 Nodules macrocristallins montrant une frange externe microcristalline correspondant au remplacement du sédiment encaissant.
- 10 Gypse microcristallin en remplacement du sédiment. Possible aggradation des cristaux. Quelques "Crack and seal".
- 11 Seul exemple de possible gypse "primaire". Lamines de gypse microcristallin en forme de feuillets fins.

*Tableau 2 - Identification des espèces minérales - Sondage SC5  
(\*différenciation de la bassanite par DRX)*

échantillons	SC5_2	SC5_4	SC5_6	SC5_9	SC5_11	SC5_13	SC5_15	SC5_18
commentaires	12	13	14	15	16	17	18	19
cotes	6,90-7,10	11,05-11,20	17,70-17,90	19,30-19,45	23,30-23,40	29,80-29,90	32,70-32,80	25,95-26,10
Illite	16,2	7,4	10,7	1,8	2,5	5,2	15,5	7,0
Smectites	32,3	25,6	25,0		2,6	7,4	13,2	10,0
Chlorite	5,4	2,2	1,6	1,0	1,8	2,2	2,0	
Gypse			1,2	84,5	83,2		32,9	19,0
Bassanite*						2,3		33,0
Anhydrite	2,5	1,2	0,7		1,4	52,0	12,8	18,0
Dolomite	27,2	19,8	40,1	5,4	7,8	2,2		4,0
Calcite	7,4	39,8	6,4					
Magnesite				2,7		16,8		6,0
Quartz	7,0	2,5	8,1	4,5	0,7	11,8	14,3	3,0
Orthoclase			4,3				7,0	
Albite		1,5	2,0				2,2	
Pyrite	2,0							
Amarantite								

Les commentaires associés à ces résultats sont :

- 12 Cristaux automorphes : concentration de cristaux fins (100µm max) dans une lamines et des fractures sub-verticales, cristaux très fins (20µm) disséminés dans l'encaissant.
- 13 Très petits cristaux (silts) disséminés dans l'encaissant.
- 14 Un nodule de gypse (mosaïque cristalline) et très rares petits cristaux (silts) disséminés dans l'encaissant.

## GEODERIS

- 15** Gypse sous plusieurs formes: microcristallin en remplacement de sédiment (peut-être d'anhydrite également), mosaïque cristalline dans les nodules, mosaïque cristalline dans les fractures horizontales
- 16** Macrocristaux en tablettes allongées et organisés en 2 directions apparentes. L'une parallèle aux laminations sédimentaires et l'autres app. à 90°.
- 17** Gypse en macrocristaux renfermant de inclusions d'anhydrite, en remplacement de l'anhydrite originelle. "Crack-and-seal" dans les fractures horizontales.
- 18** Automorphe dans les fractures (rare "crack-and seal") et en remplacement plus diffus de l'anhydrite.
- 19** Macrocristaux de gypse. Présence de traces de kaolinite (inf. à 1%)

*Tableau 3 - Identification des espèces minérales - Sondage SC6  
(\*différenciation de la bassanite par DRX)*

échantillons	SC6_1	SC6_4	SC6_6	SC6_7	SC6_10	SC6_12	SC6_14	SC6_17
commentaires	20	21	22	23	24	25	26	27
cotes	3,60-3,70	10,40-10,50	17,30-17,40	21,90-22,00	24,90-25,10	29,90-30,10	31,80-31,90	20,00-20,10
Illite	5,6	11,8	7,3	9,4	4,2	6,4	12,2	3,0
Smectites	17,8	28,3	10,6	7,3	1,3	6,3	26,3	2,0
Chlorite	2,0	7,0	1,5	2,5	1,3	1,8	3,1	2,0
Gypse								7,0
Bassanite*			64,3	50,9	11,4	13,0	22,7	78,0
Anhydrite		1,2			74,1	48,2	6,5	
Dolomite	35,6	35,2	3,0	1,9	1,2	3,2	11,1	1,0
Calcite	37,7	9,1						
Magnesite			6,9	18,0	3,2	11,5		3,0
Quartz	1,3	7,7	6,3	10,0	3,4	9,6	18,1	4,0
Orthoclase								
Albite								
Pyrite								
Amarantite								

Les commentaires sont précisés ci-dessous :

- 20** Gypse dans de nombreuses petites fractures.
- 21** Gypse macrocristallin dans petits nodules et fines fractures verticales.
- 22** Gypse macrocristallin dans petits nodules et fractures horizontales. Gypse microcristallin en remplacement d'anhydrite fibreuse dans la majeure partie de la lame. Pas d'inclusions d'anhydrite dans gypse dans fractures.
- 23** Gypse macrocristallin dans les fractures (quelques "crack-and-seal"), et en flammes se développant en remplacement du sédiment et d'anhydrite fibreuse.
- 24** Gypse macrocristallin dans les fractures ("crack-and-seal"), et plus rarement dans des nodules avec inclusions d'anhydrite. Egalement en remplacement très incomplet d'anhydrite.
- 25** Gypse dans de nombreuses petites fractures ("crack-and-seal").
- 26** Gypse macrocristallin en "crack-and-seal" dans fractures fine principalement horizontales, et en remplacement de sédiment et peut-être d'anhydrite.
- 27** Gypse macrocristallin en tablettes

## GEODERIS

*Tableau 4 - Identification des espèces minérales - Sondage SC7  
(\*différenciation de la bassanite par DRX)*

échantillons	SC7_1	SC7_2	SC7_3	SC7_4	SC7_5	SC7_6	SC7_7	SC7_8
commentaires	28	29	30	31	32	33	34	35
cotes	12,80-12,90	26,25-26,40	34,70-34,85	39,20-39,35	41,05-41,25	42,95-43,10	44,95-45,10	45,80-45,88
Illite	4,5	21,0	11,1	10,3	12,2	6,8	4,8	9,3
Smectites	2,4	27,0	27,2	13,3	14,1	4,1	8,9	8,2
Chlorite	1,2	12,0	2,2	2,1	3,1	1,3	2,4	1,7
Gypse		4,3				8,2	9,6	1,0
Bassanite*				25,7	37,5	57,8	7,4	23,6
Anhydrite	2,7	3,8	2,6	2,9		12,7	28,9	13,6
Dolomite		7,7	6,4	3,2	12,0		15,4	19,4
Calcite	43,1	13,8	20,9					
Magnesite				5,0	3,5	4,0	2,2	14,7
Quartz	46,0	10,5	27,4	29,5	17,6	5,1	18,9	7,5
Orthoclase				5,8				
Albite			2,2	2,2			1,5	
Pyrite								
Amarantite								1,0

Ces résultats suscitent plusieurs commentaires qui sont précisés ci-dessous :

- 28** Inclusions d'anhydrite dans les cristaux de gypse des nodules. Possible anhydrite résiduelle.
- 29** Rare gypse macrocristallin formant de petits nodules.
- 30** Gypse macrocristallin dans nodules avec inclusions d'anhydrite. Possibles petits cristaux disséminés dans sédiments et fractures.
- 31** Gypse macrocristallin dans fractures ("crack-and-seal") et plus microcristallin en possible remplacement d'anhydrite, avec inclusions de sédiment résiduel.
- 32** Gypse majoritairement macrocristallin dans fractures ("crack-and-seal") et nodules en remplacement d'anhydrite (bel exemple). Rarement plus microcristallin et possible remplacement d'anhydrite
- 33** Gypse macro- et microcristallin dans nodules en remplacement d'anhydrite. Plus rare gypse macrocristallin dans fines fractures horizontales ("crack-and-seal").
- 34** Gypse majoritairement macrocristallin dans fractures horizontales et sub-verticales ("crack-and-seal") en cristaux très fins allongés. Plus rarement en remplacement d'anhydrite dans nodules.
- 35** Gypse macrocristallin dans fractures horizontales ("crack-and-seal") et plus rarement en macrocristaux remplaçant très partiellement l'anhydrite.

Remarque:

L'analyse optique des lames minces ne permet pas (ou très difficilement) de différencier le gypse de la forme hemihydratée qu'est la bassanite. Seule l'analyse en DRX a permis de différencier et quantifier cette espèce minérale.

Dans presque toute les lames, les nodules semblent clairement croître dans un sédiment laminé argileux, peut-être calcitique/dolomitique par endroit, et peuvent déplacer les laminations, ce qui montre une croissance secondaire, post-dépôt. Il peut également remplacer le sédiment existant, ce qui semble évident dans SC4-1. Toutefois, dans les nodules il est probable qu'il soit précoce. Il montre une forme cristalline granulaire et en

## GEODERIS

tablettes, voire rarement fibreuse. La lame SC4-19 est la seule qui montre une forme de gypse qui pourrait être syn-sédimentaire, avec une biréfringence dans des couleur d'ordre supérieur. Les cristaux plus fins allongés sont localisés dans des lamines, non des nodules. Dans les fractures, le gypse est plus tardif. Les formes en « crack and seal » montrent une croissance pendant l'écartement des épontes des joints.

En résumé, il faut retenir que les nodules et lamines sont précoces. Ils sont probablement tous initialement en anhydrite mais beaucoup sont remplacées par du gypse. Des inclusions d'anhydrite sont également visibles dans le gypse des nodules.

### 4.2- Essais géotechniques

#### *Identification physique :*

L'ensemble des résultats est présenté dans les tableaux 5 à 8. La signification des symboles dans ces tableaux est la suivante :

$\rho_h$  ;  $\rho_d$  et  $\rho_s$  : masses volumiques "naturelle", sèche et des grains

W : teneur en eau "naturelle"

n : porosité calculée

Sr : degré de saturation

Atterberg : limite d'Atterberg avec WI = limite de liquidité, Wp = limite de plasticité, Ip = indice de plasticité, Ic = Indice de consistance

V.B.S. : valeur au bleu de méthylène

Les différents bordereaux de mesures pour les limites d'Atterberg et les valeurs au bleu de méthylène sont respectivement en annexe 2 et 3.

*Tableau 5 - Paramètres physiques - Sondage SC4*

sondage SC4	Profondeurs	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	n (%)	Sr (%)	Atterberg (WI / Wp / Ip / Ic)	V.B.S
SC4-1	1,25-1,35	2,00	1,70		17,7				
SC4-2	3,40-3,60	1,90	1,50	2,67	24,3	43,8	83,3	39 / 32 / 7 / 2,1	3,74
SC4-4	7,50-7,60	1,90	1,50	2,62	23,1	42,7	81,2	38 / 32 / 6 / 2,5	3,36
SC4-3	7,80-7,95								
SC4-7	9,65-9,80								
SC4-5	10,00-10,10	2,10	1,80	2,44	12,7	26,2	87,3		
SC4-6	10,40-10,60								
SC4-12	14,30-14,40								
SC4-20	14,80-15,00								
SC4-13	17,50-17,60								
SC4-8	17,80-17,90	2,20	2,00	2,56	9,3	21,9	85,2		
SC4-14	18,80-18,90								
SC4-15	20,80-21,00								
SC4-9	21,00-21,10	2,30	2,00		10,1				
SC4-16	22,90-23,00								
SC4-10	28,80-28,90	2,30	2,10	2,60	7,9	19,2	86,4		
SC4-17	36,15								
SC4-11	39,55-39,65	2,30	2,00	2,60	9,8	23,1	85,1		
SC4-18	39,55-39,70								
SC4-19	41,50-41,70								

## GEODERIS

*Tableau 6 - Paramètres physiques - Sondage SC5*

sondage SC5	Profondeurs	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	n (%)	Sr (%)	Atterberg (WI / Wp / Ip / Ic)	V.B.S
SC5-1	3,80-4,00	2,00	1,70	2,71	21,1	37,3	96,4	39 / 31 / 8 / 3,1	2,50
SC5-2	6,90-7,10								
SC5-3	7,10-7,25	2,20	1,90		15,7				2,13
SC5-5	10,90-11,05	2,00	1,80	2,69	17,1	33,1	93,2		
SC5-4	11,05-11,20								
SC5-6	17,70-17,90								
SC5-7	17,90-18,05	2,20	1,90		14,2				
SC5-9	19,30-19,45								
SC5-10	19,45-19,55	2,20	1,90	2,72	15,3	30,1	96,6		
SC5-8	20,30-20,50								
SC5-11	23,30-23,40								
SC5-12	23,50-23,60	2,30	2,10		7,1				
SC5-13	29,80-29,90								
SC5-14	30,10-30,20	2,50	2,50	2,81	4,2	11,0	95,4		
SC5-15	32,70-32,80								

*Tableau 7 - Paramètres physiques - Sondage SC6*

sondage SC6	Profondeurs	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	n (%)	Sr (%)	Atterberg (WI / Wp / Ip / Ic)	V.B.S
SC6-1	3,60-3,70								
SC6-2	6,30-6,45	2	1,80	2,67	15,5	32,6	85,8	43 / 36 / 7 / 3,8	2,73
SC6-3	9,20-9,40	2,2	2,00	2,70	11,5	25,9	88,9		
SC6-4	10,40-10,50								
SC6-6	17,30-17,40								
SC6-5	17,85-18,00	2,2	1,90	2,71	13,8	29,9	87,9		1,62
SC6-8	21,50-21,70								
SC6-7	21,90-22,00								
SC6-9	22,20-22,30	2	1,80	2,50	13,1	28,0	84,4		
SC6-11	24,50-24,60	2,4	2,20		9,1				
SC6-10	24,90-25,10								
SC6-12	29,90-30,10								
SC6-13	30,30-30,40	2,6	2,50		4,2				
SC6-15	31,70-31,80								
SC6-14	31,80-31,90								
SC6-16	32,60-32,70								

## GEODERIS

*Tableau 8 - Paramètres physiques - Sondage SC6*

sondage SC7	Profondeurs	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	n (%)	Sr (%)	Atterberg (WI / Wp / Ip / Ic)	V.B.S
SC7-1	12,80-12,9								
SC7-2	26,25-26,40								
SC7-3	34,70-34,85								
SC7-4	39,20-39,35								
SC7-5	41,05-41,25								
SC7-6	42,95-43,10								
SC7-7	44,95-45,10								
SC7-8	45,80-45,88								
SC7-9	10,00-10,12	2,1	1,80		16,7			34 / 29 / 5 / 3,7	
SC7-10	17,70-17,90	2,1	1,80	2,66	16,4	32,3	91,5		
SC7-11	27,05-27,20	2,2	1,90		13,6				1,75
SC7-12	31,90-32,10	2,2	1,90	2,70	15	29,6	96,4		
SC7-13	36,10-36,25	2,1	1,90		15,6				1,32
SC7-14	40,00-40,20	2,3	2,20	2,50	5,1	12,0	93,7		
SC7-15	46,75-46,90	2,3	2,40	2,73	4,8	12,1	95,5		
SC7-16	44,50-44,70								

### **Caractérisation hydromécanique :**

Les essais avec les échantillons SC4-7, SC4-20, SC7-16, SC5-18 et SC6-17 permettant de quantifier le potentiel de gonflement et la pression de gonflement sont en cours. Les conditions expérimentales sont précisées sur les figures 3 à 7 qui représentent un gonflement ou un retrait de l'échantillon en fonction du temps. L'eau injectée dans les échantillons est une eau de site fournie par GEODERIS.

Des analyses minéralogiques ont été réalisées sur des morceaux prélevés à proximité immédiate des échantillons SC5-18 et SC6-17 (tableaux 2 et 3). Pour les trois autres échantillons, des analyses sont en cours. L'intérêt de ces analyses est de pouvoir regarder l'influence des teneurs en évaporites sur le comportement hydromécaniques.

Après une période d'environ 42 jours de retrait, l'échantillon SC4-7 (Figure 3) présente une phase de gonflement qui semble s'amortir vers le 90<sup>ième</sup> jours. En effet, nous pouvons observer une stabilité du déplacement mesuré.

Pour l'échantillon SC4-20 (Figure 4), nous avons pu observer un début de gonflement après 42 jours de retrait, cependant ce gonflement s'est arrêté très rapidement et depuis les mesures de déplacement étant stables, nous ne pouvons plus y associer de retrait ou de gonflement.

Pour l'échantillon SC7-16 (Figure 5), les déplacements mesurés sont très peu importants. Nous mesurons des oscillations de quelques microns. Nous sommes par conséquent à la limite de détection par rapport à la sensibilité des capteurs de déplacement. Néanmoins, à partir du 80<sup>ième</sup> jour, nous pouvons observer une tendance à un gonflement qui reste peu marquée. En effet, nous avons enregistré un déplacement de -17 microns sur une période de 20 jours environ. Actuellement, cette tendance semble s'amortir.

Depuis la mise en place de l'échantillon SC5-18 (Figure 6) soit depuis 24 jours, nous ne mesurons de quelques microns de déplacement. Avec les résultats des essais précédents, il semblerait que cette phase initiale doive encore se poursuivre afin de pouvoir observer du gonflement. Les analyses minéralogiques nous permettent

## GEODERIS

d'envisager ce gonflement par une transformation de la bassanite (teneur de 33%) et l'anhydrite (teneur de 18%) en gypse.

Pour l'échantillon SC6-17 (Figure 7), nous avons observé un déplacement négatif dès la mise en place de l'essai. Cette phase précoce de gonflement est peu probable : nous attribuons plutôt ce comportement à une phase d'équilibre de l'échantillon dans la cellule c'est-à-dire à une reprise des jeux mécaniques lors du montage de la cellule oedométrique. Etant donné la teneur en bassanite (78%), nous pourrions probablement mesurer un gonflement.

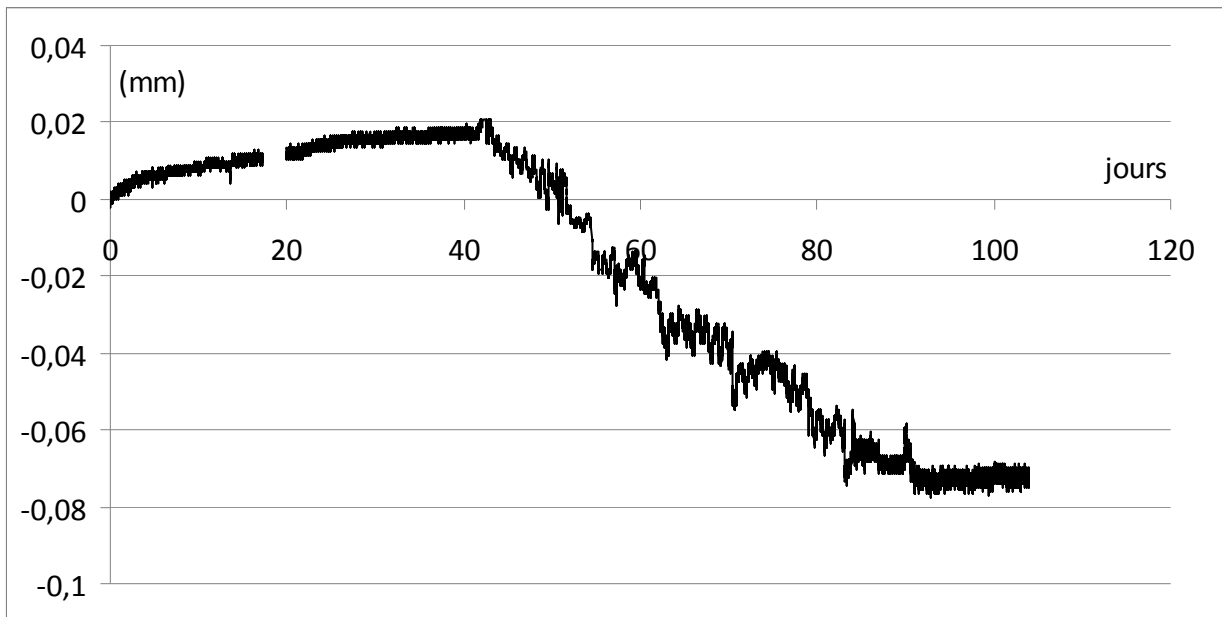


Figure 3 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-7  
(pression injection = 0.10MPa et pression de confinement = 0.33MPa)

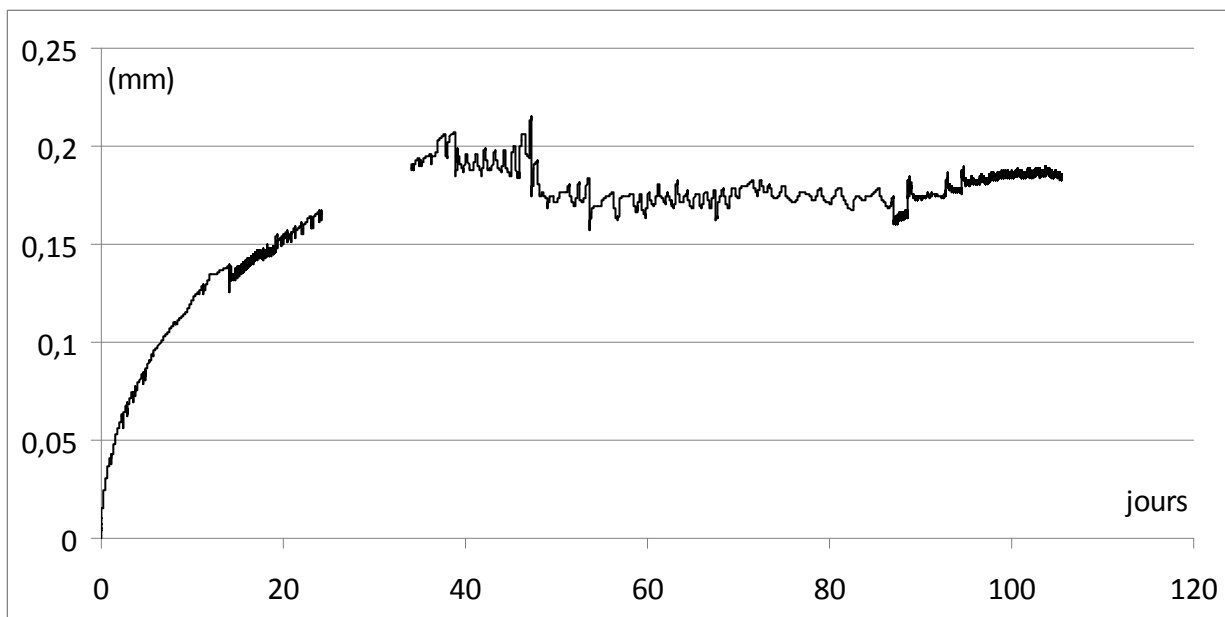


Figure 4 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC4-20  
(pression injection = 0.16MPa et pression de confinement = 0.52MPa)



## GEODERIS

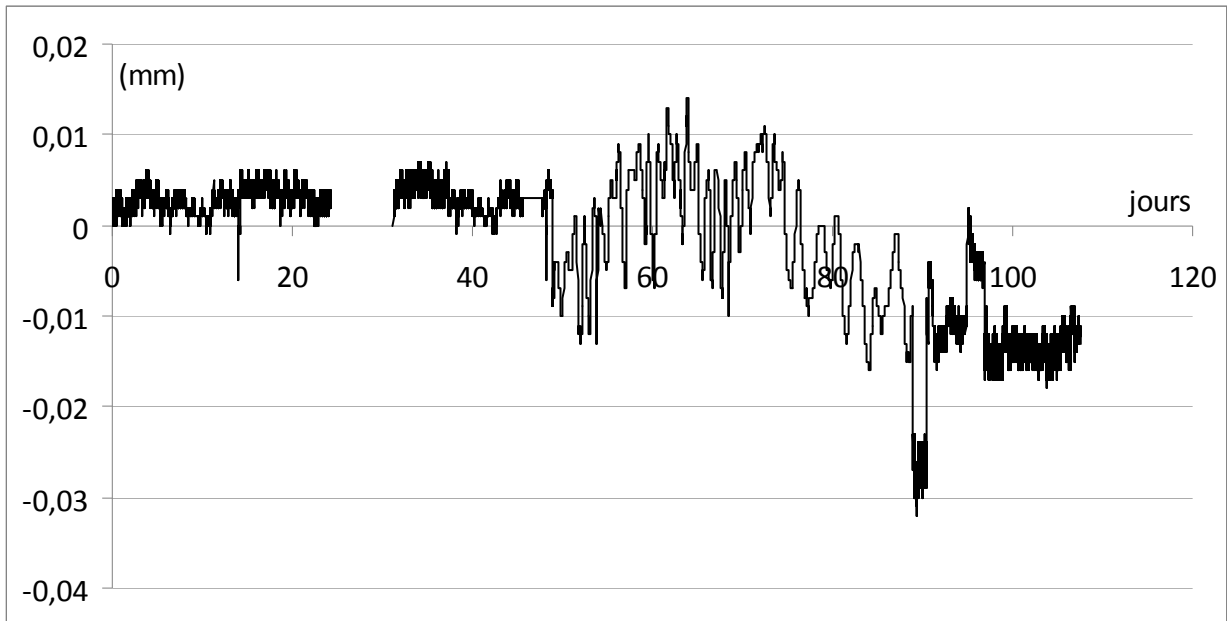


Figure 5 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC7-16  
(pression injection = 0.45MPa et pression de confinement = 1.50MPa)

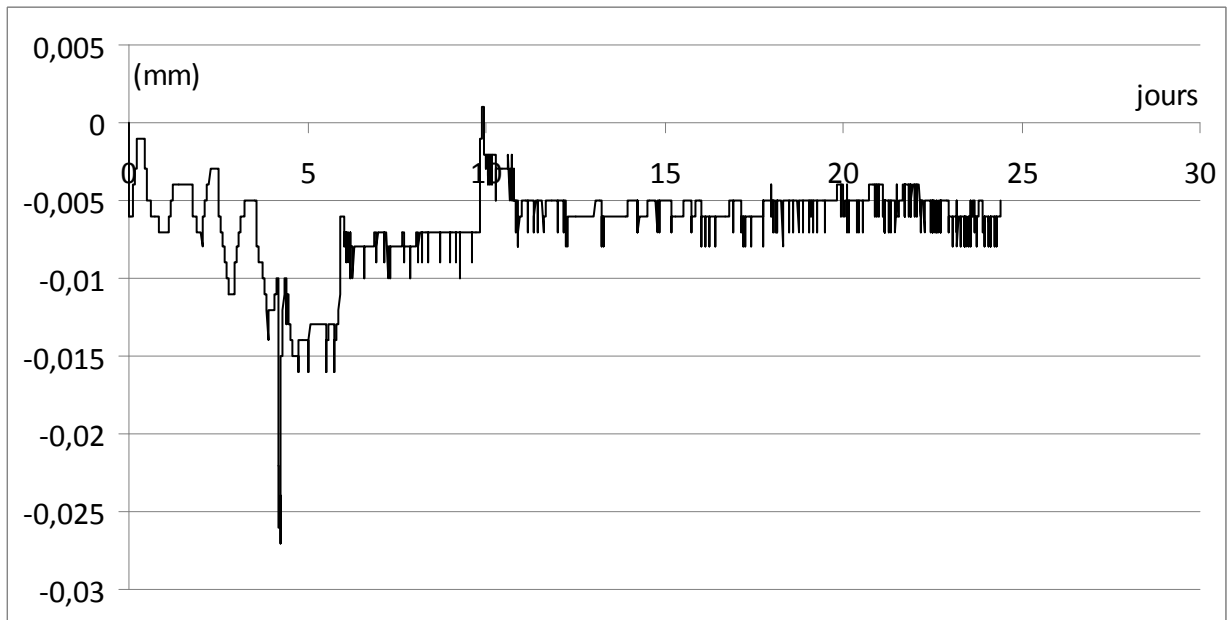
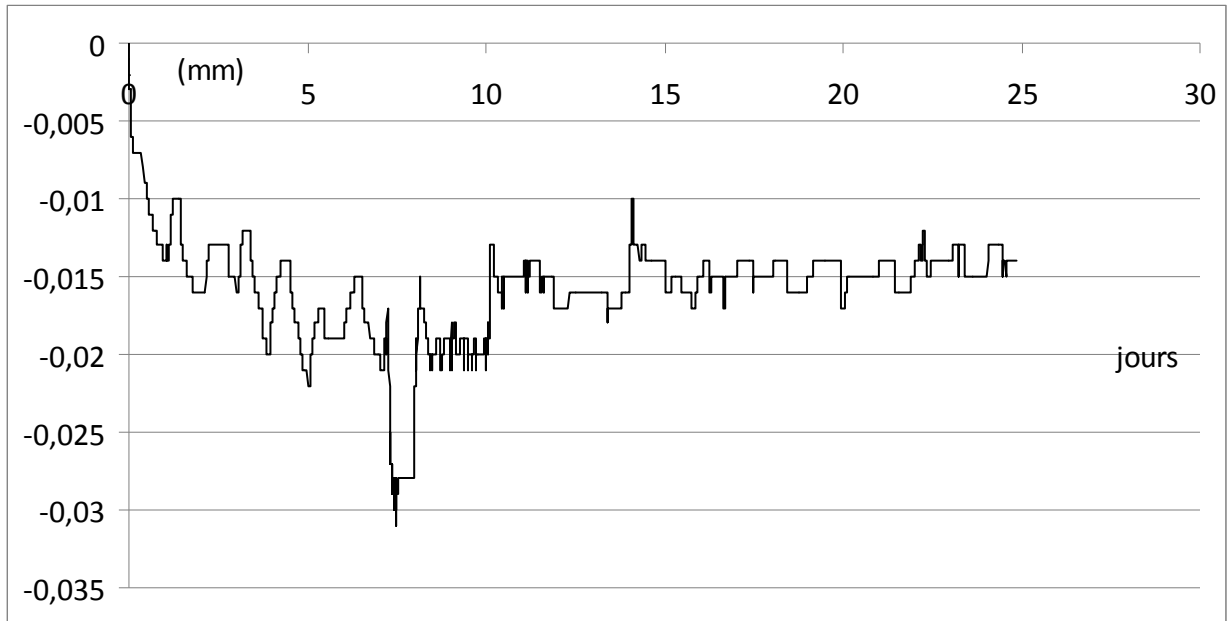


Figure 6 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC5-18  
(pression injection = 0.25MPa et pression de confinement = 0.90MPa)

## GEODERIS

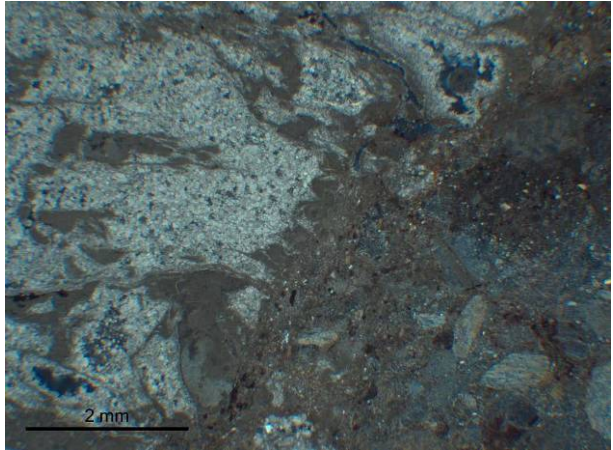
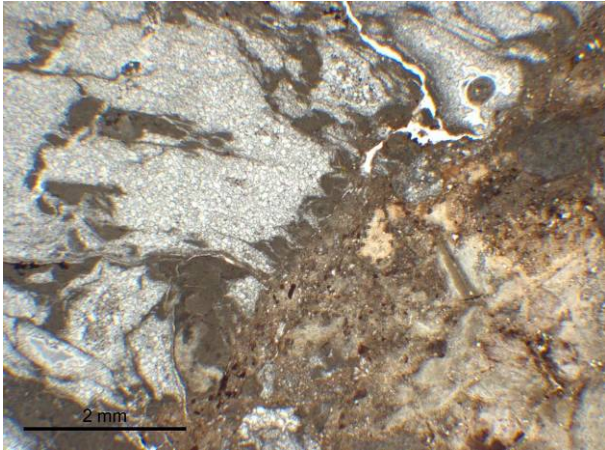


*Figure 7 - Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps - SC6-17  
(pression injection = 0.18MPa et pression de confinement = 0.70MPa)*

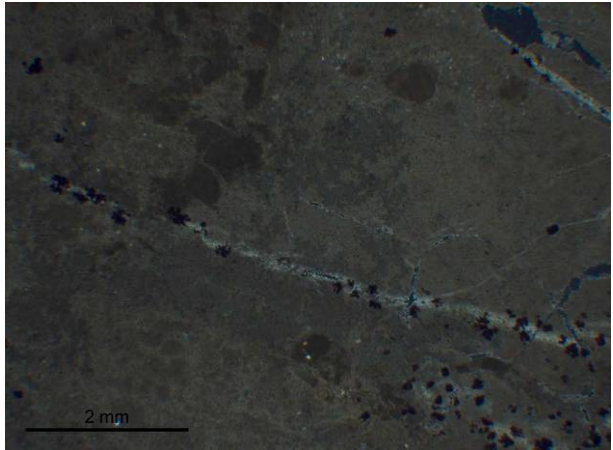
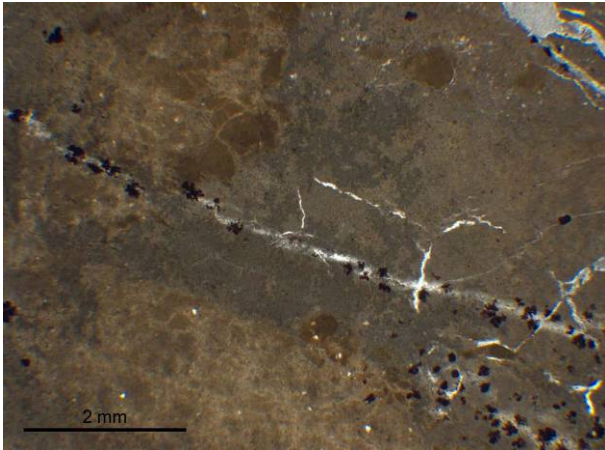
# **Annexe 1**

## **Photographies au microscope optique**

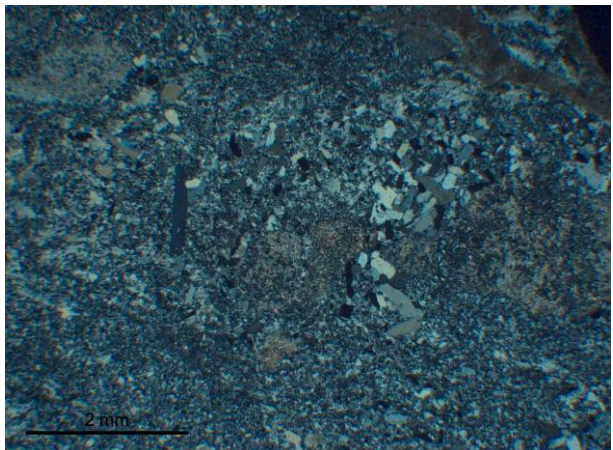
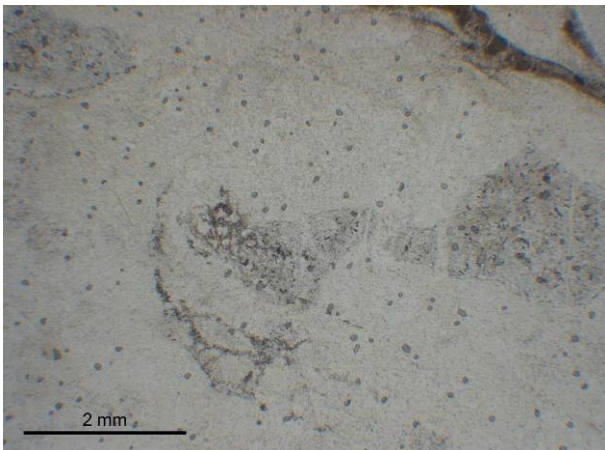
**GEODERIS**



**SC4-01 (LPA / LPNA)**

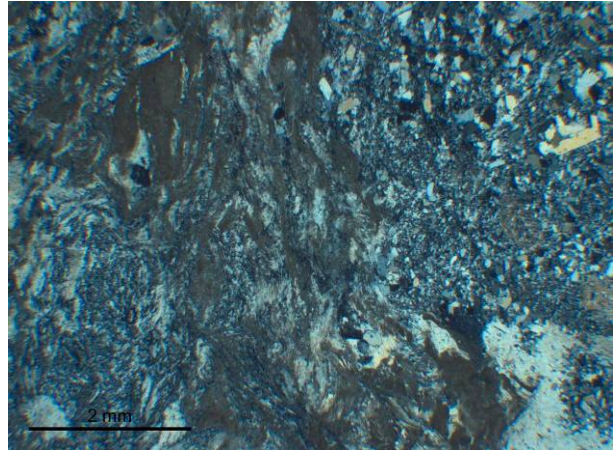
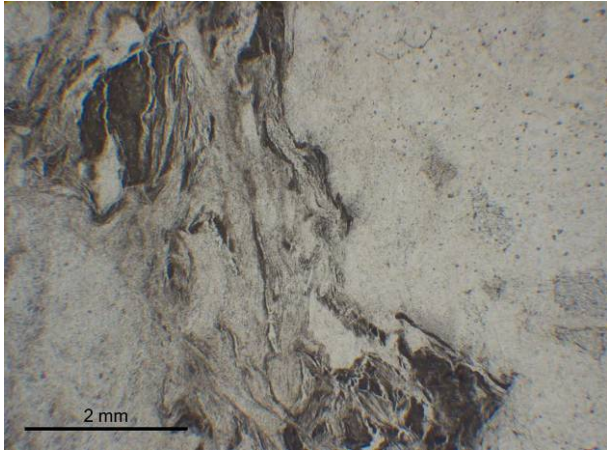


**SC4-03 (LPA / LPNA)**

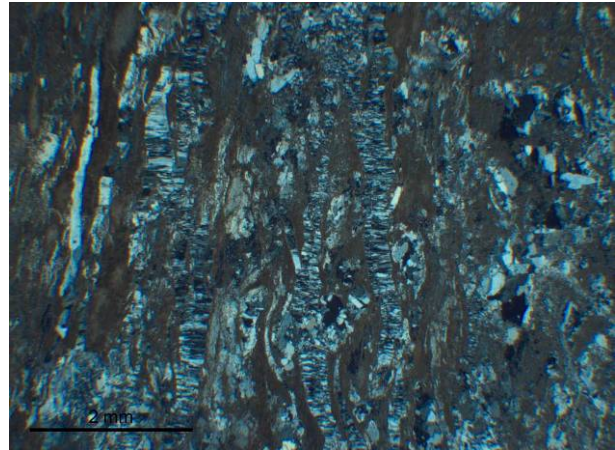
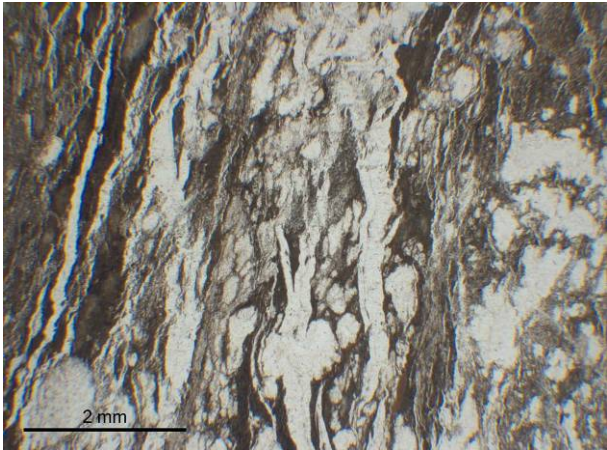


**SC4-06 (LPA / LPNA)**

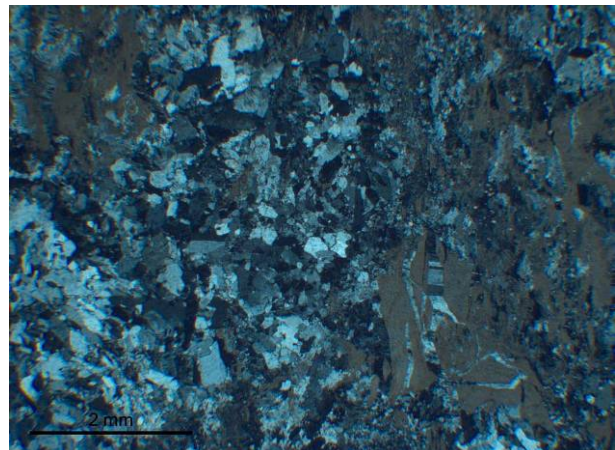
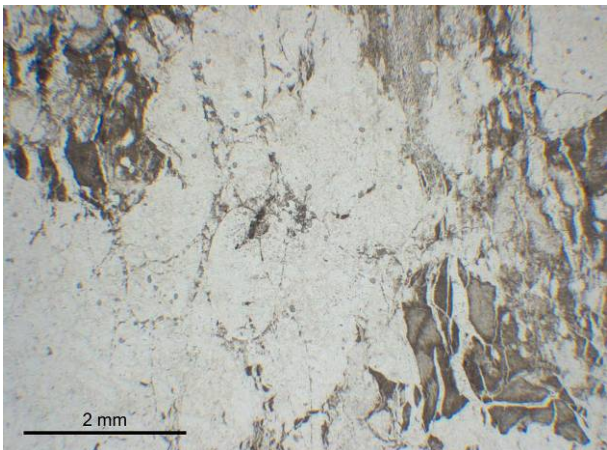
**GEODERIS**



**SC4-12 (LPA / LPNA)**

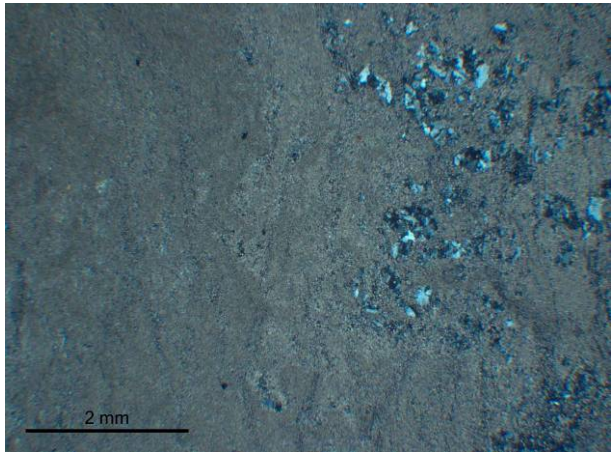
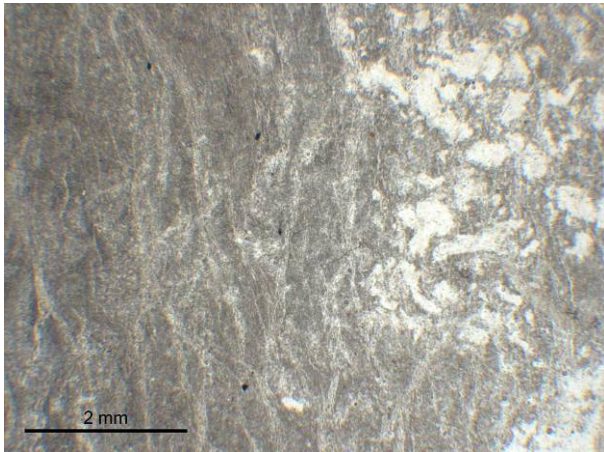


**SC4-13 (LPA / LPNA)**

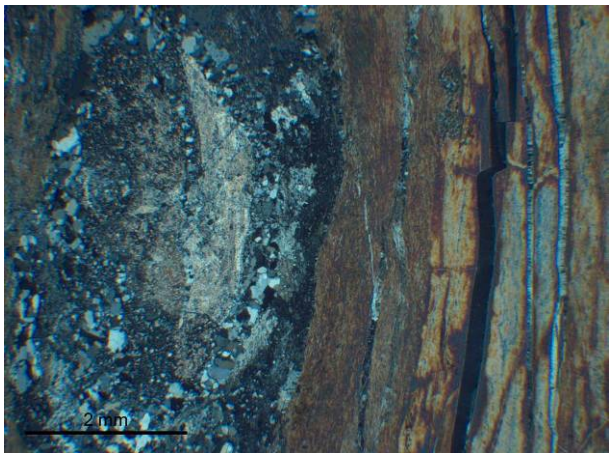
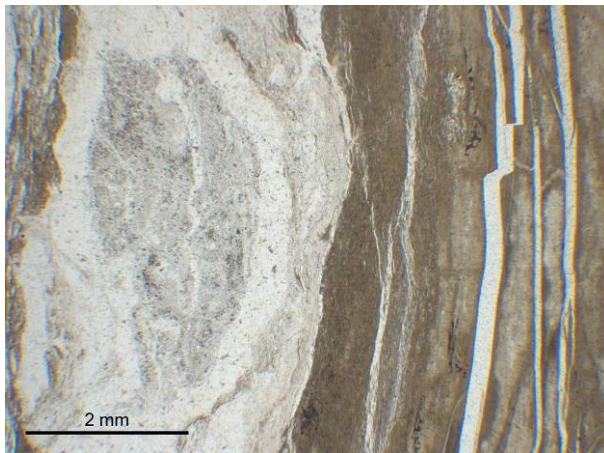


**SC4-14 (LPA / LPNA)**

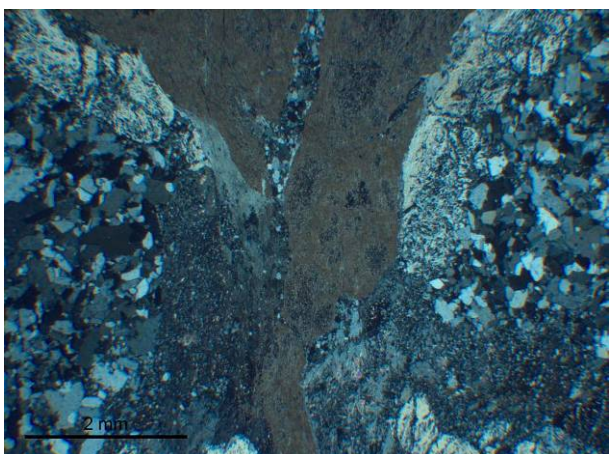
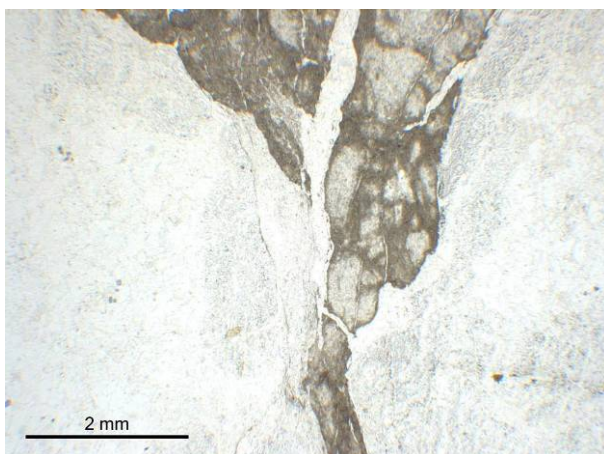
**GEODERIS**



**SC4-15 (LPA / LPNA)**

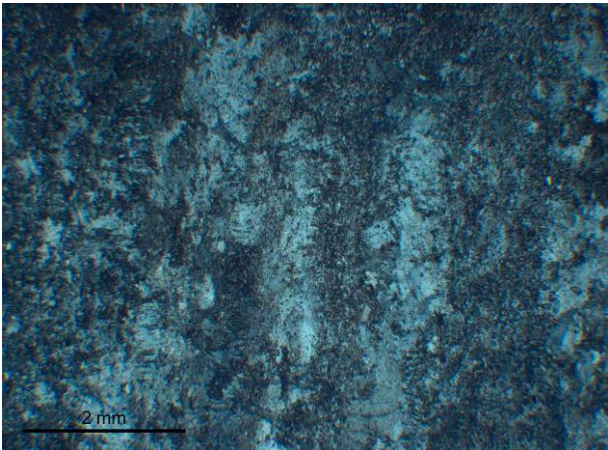
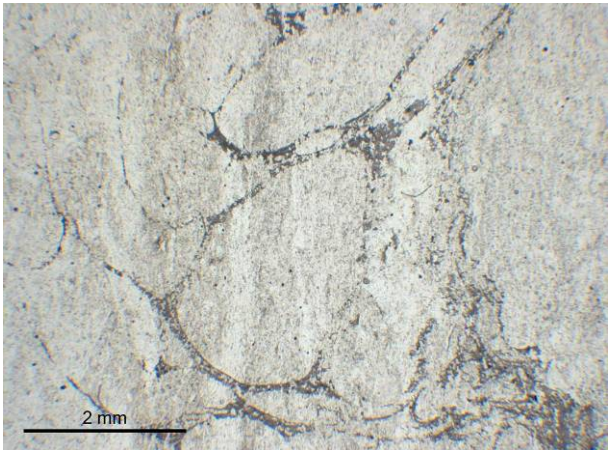


**SC4-16 (LPA / LPNA)**

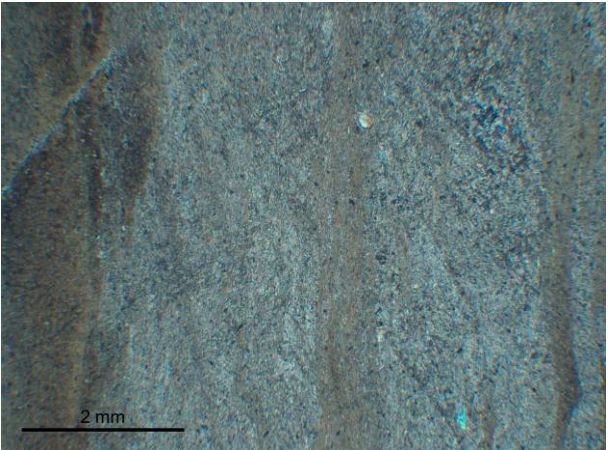
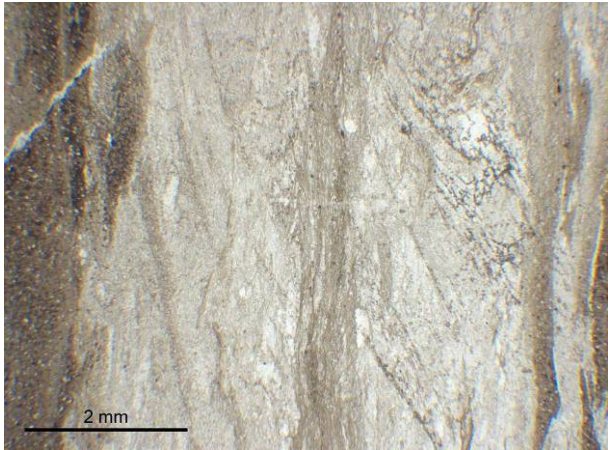


**SC4-17 (LPA / LPNA)**

**GEODERIS**

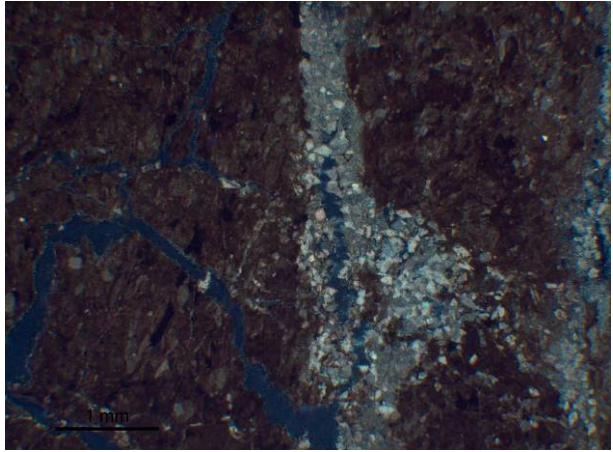
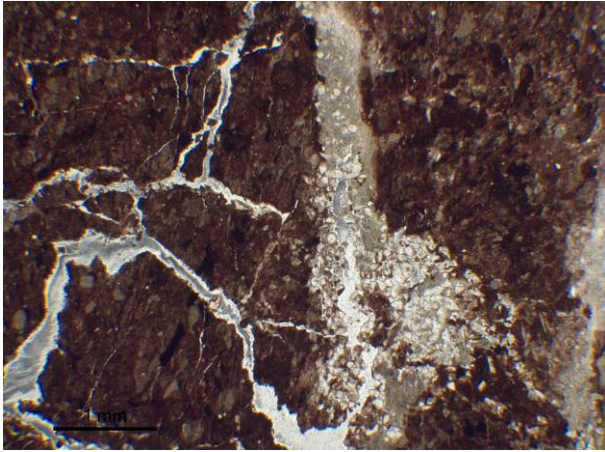


**SC4-18 (LPA / LPNA)**

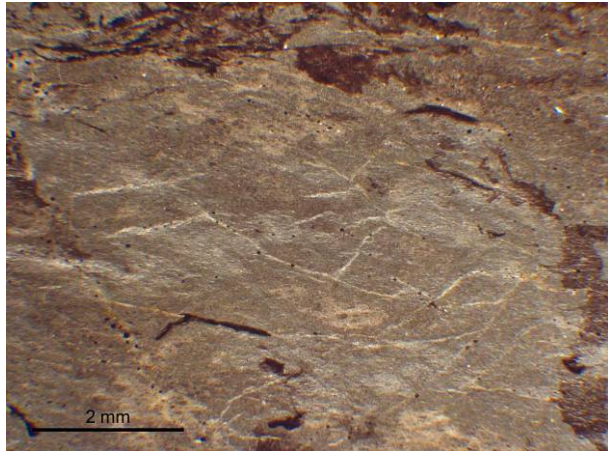


**SC4-19 (LPA / LPNA)**

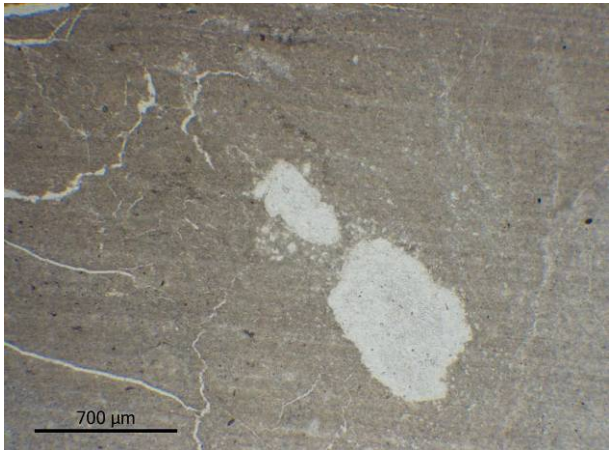
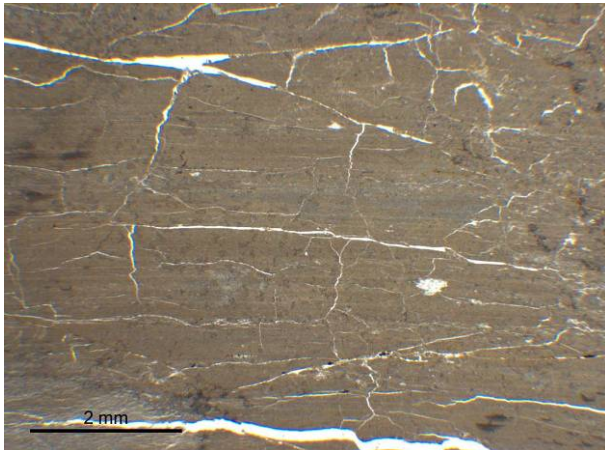
**GEODERIS**



**SC5-2 (LPA / LPNA)**



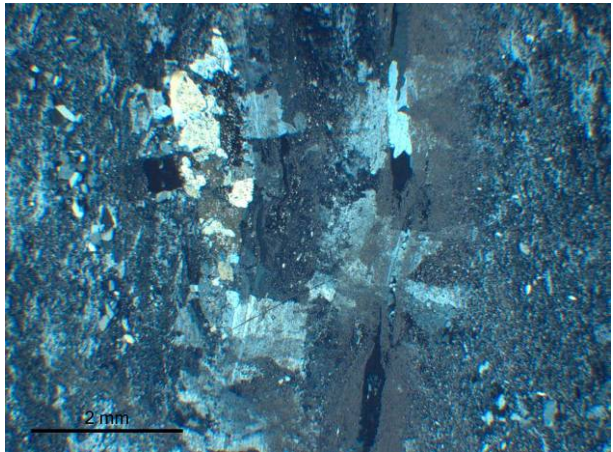
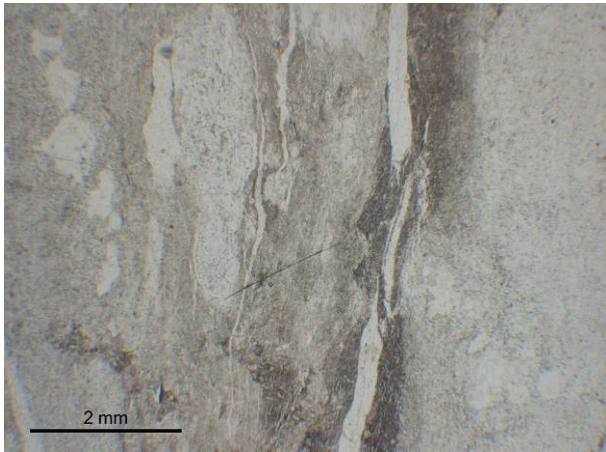
**SC5-4 (LPA)**



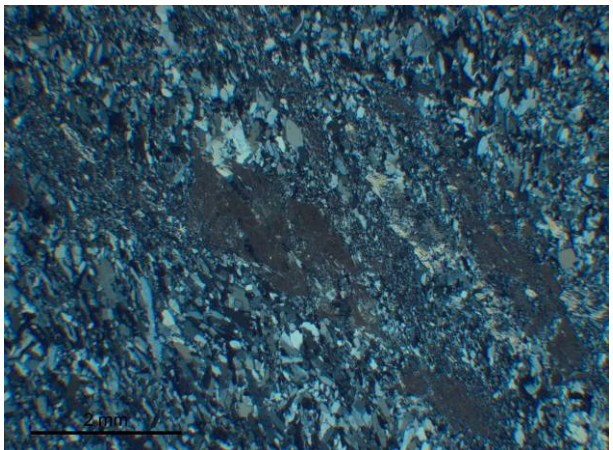
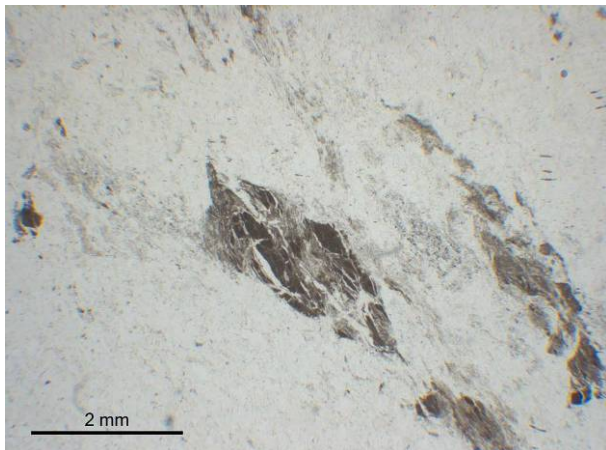
**SC5-6 (LPA)**



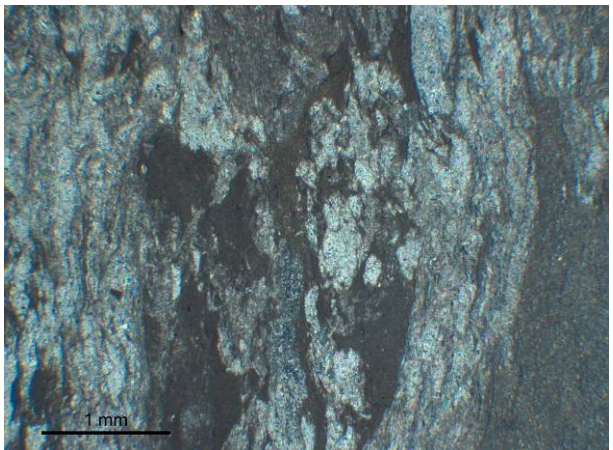
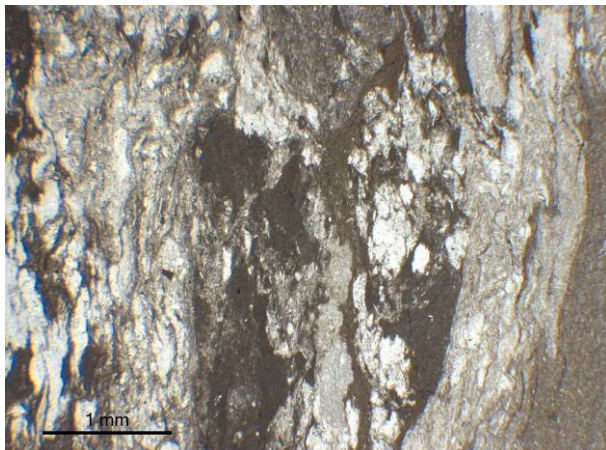
**GEODERIS**



**SC5-9 (LPA / LPNA)**

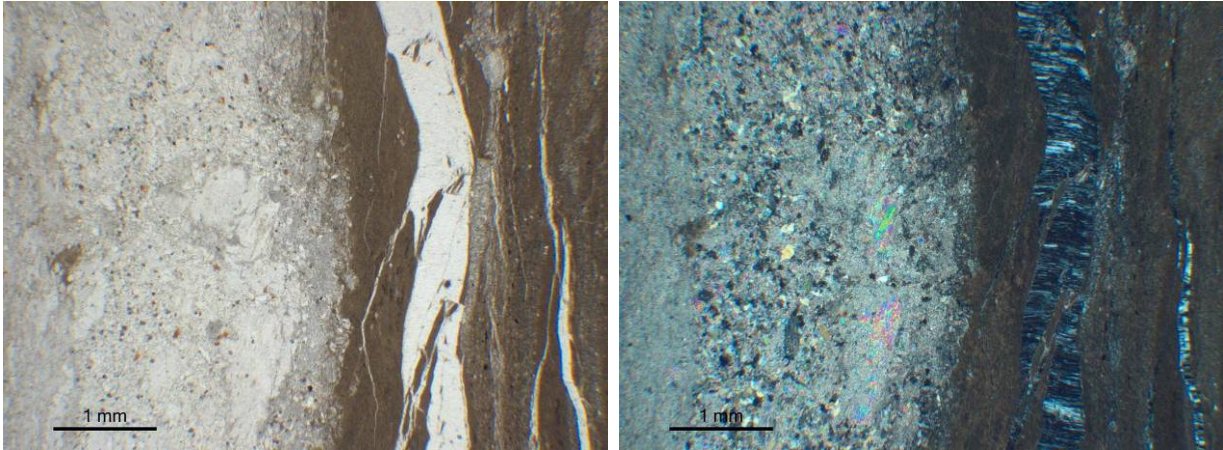


**SC5-11 (LPA / LPNA)**



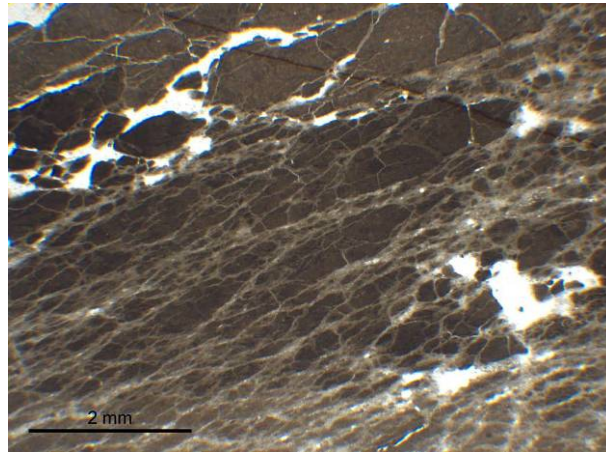
**SC5-13 (LPA / LPNA)**

**GEODERIS**

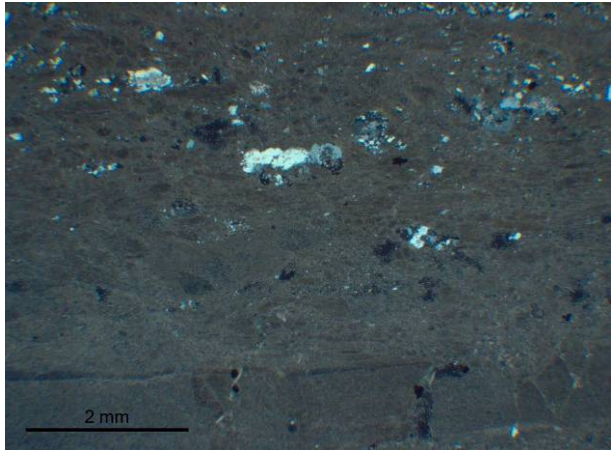
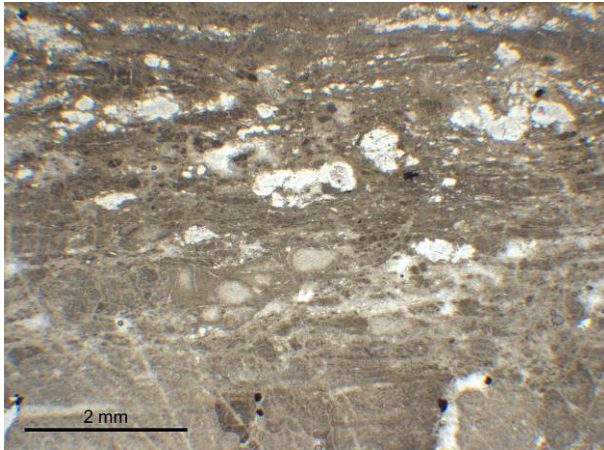


**SC5-15 (LPA / LPNA)**

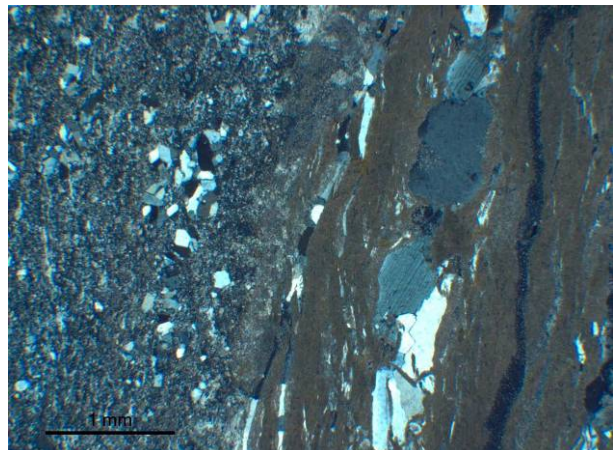
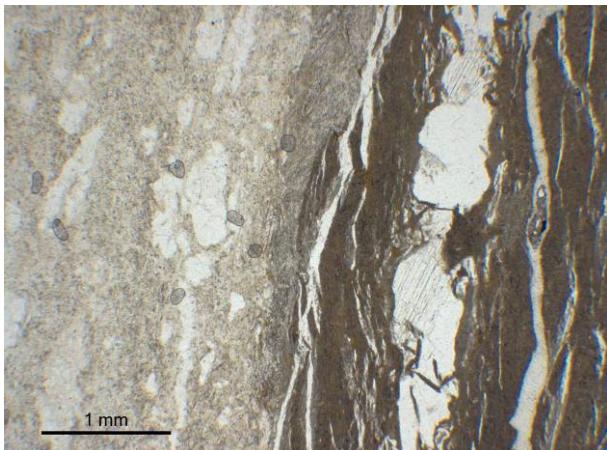
**GEODERIS**



**SC6-1 (LPA)**

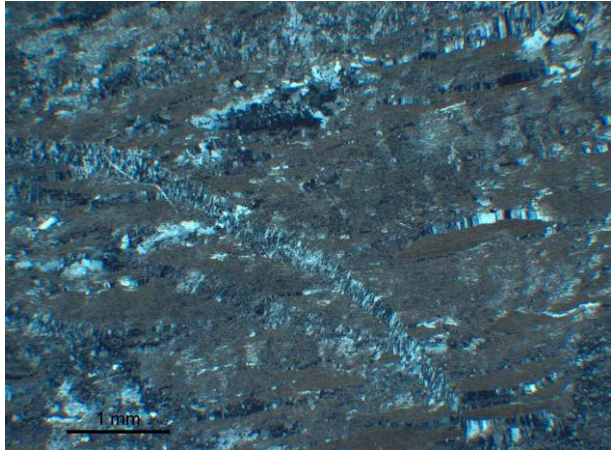
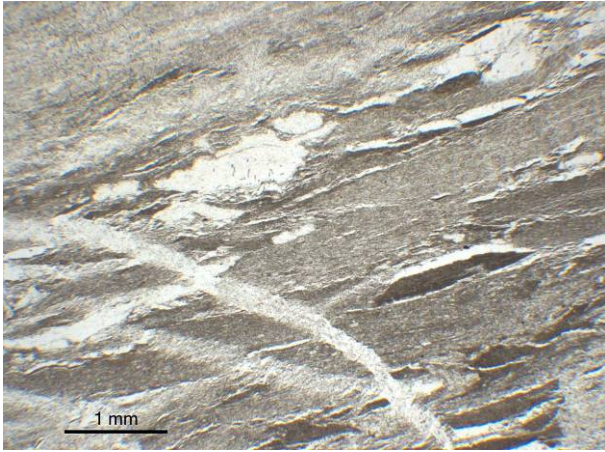


**SC6-4 (LPA / LPNA)**

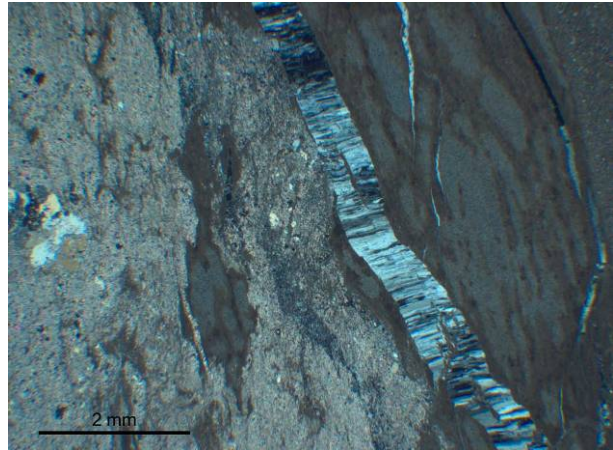
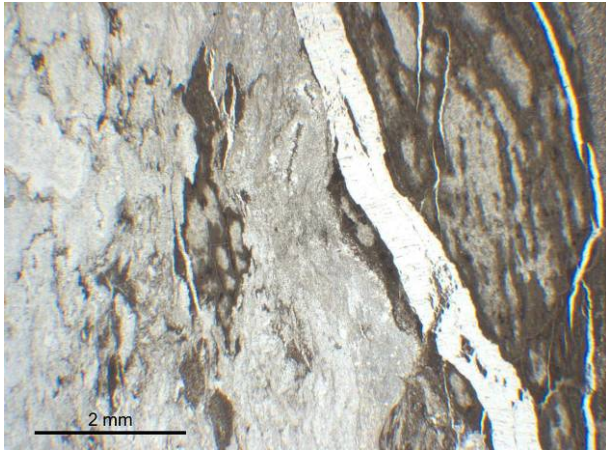


**SC6-6 (LPA / LPNA)**

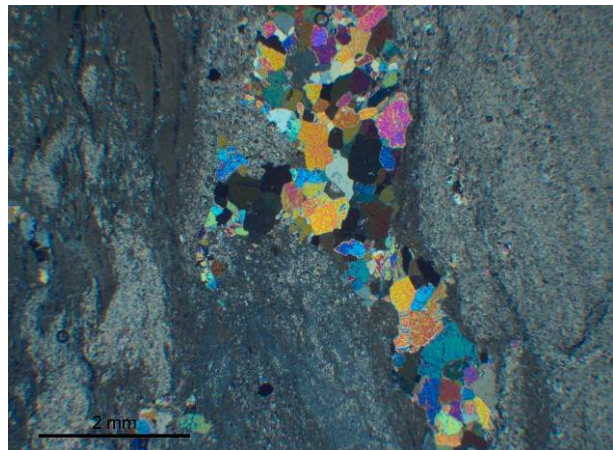
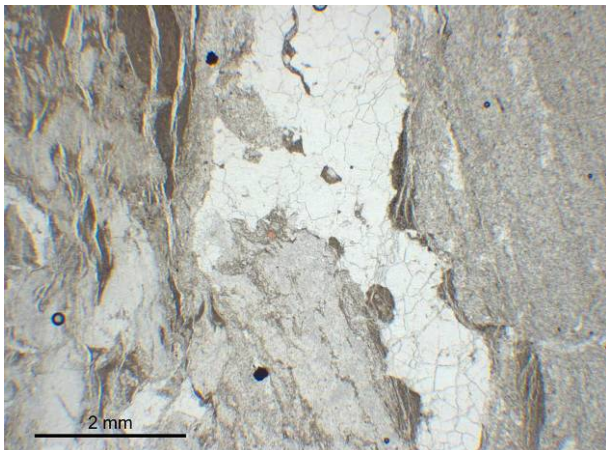
**GEODERIS**



**SC6-7 (LPA / LPNA)**

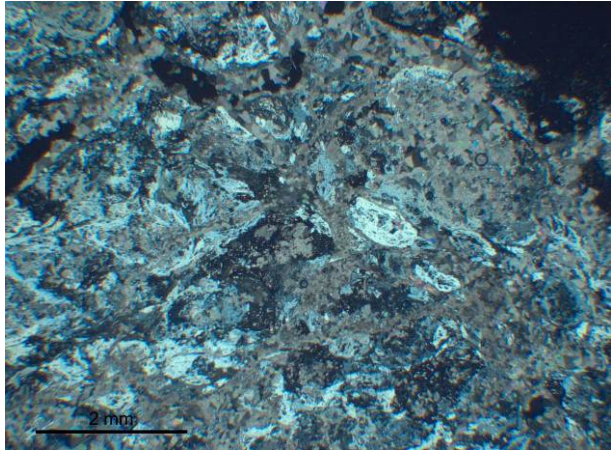
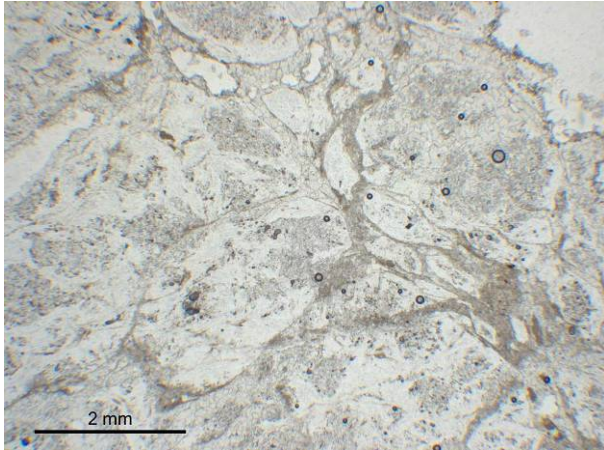


**SC6-10 (LPA / LPNA)**

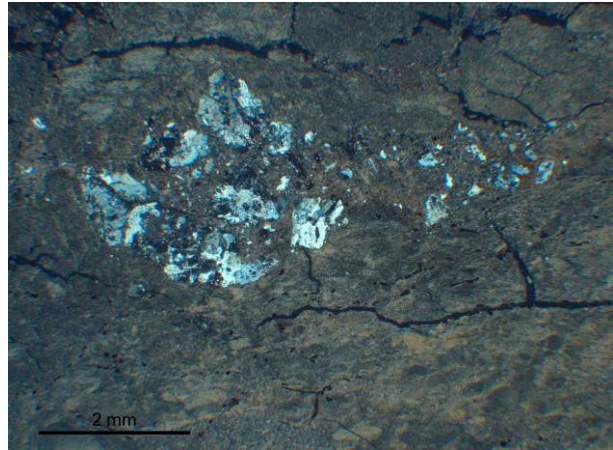
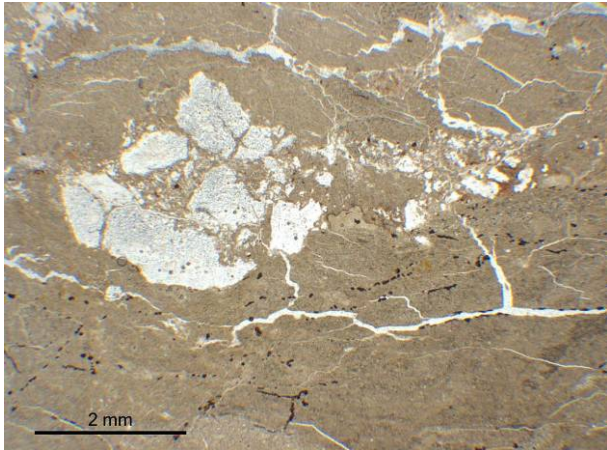


**SC6-12 (LPA / LPNA)**

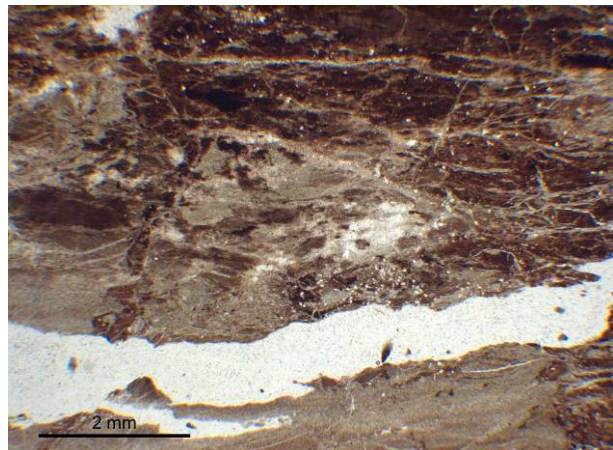
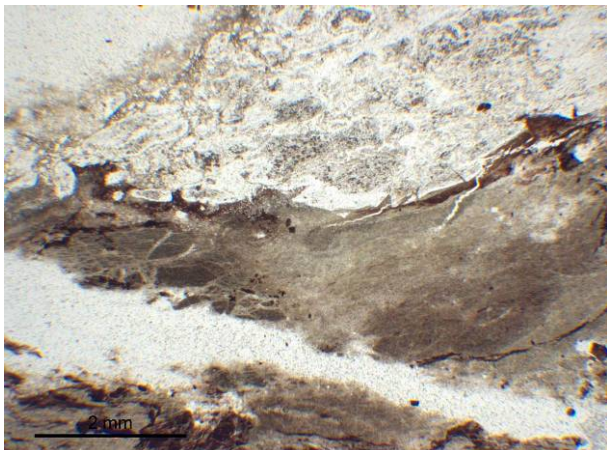
**GEODERIS**



**SC7-1 (LPA / LPNA)**

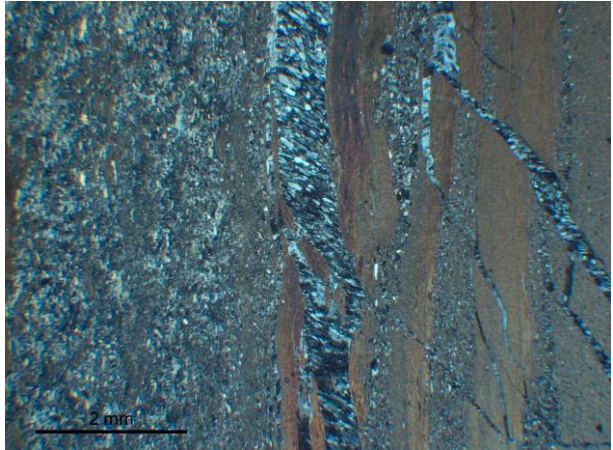
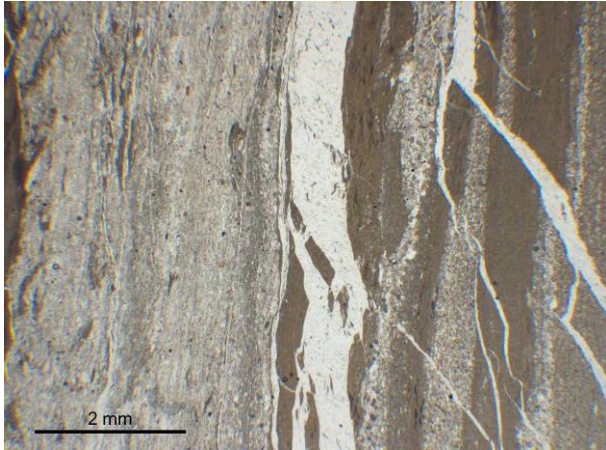


**SC7-2 (LPA / LPNA)**

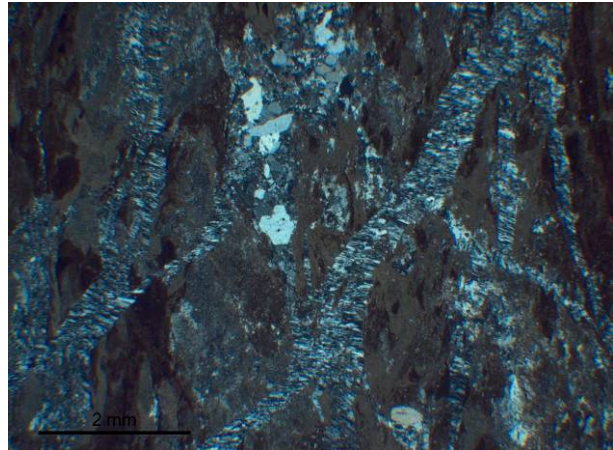
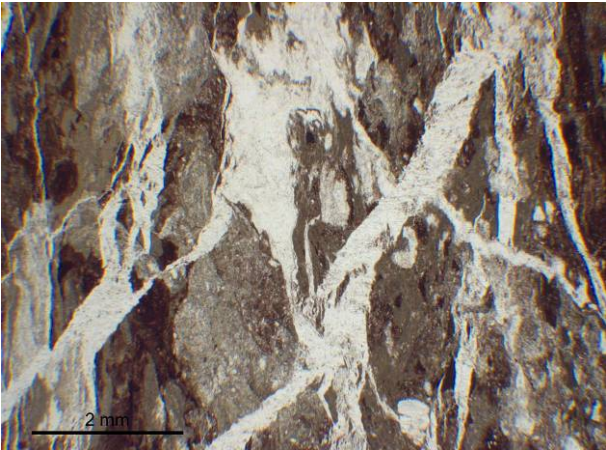


**SC7-3 (LPA)**

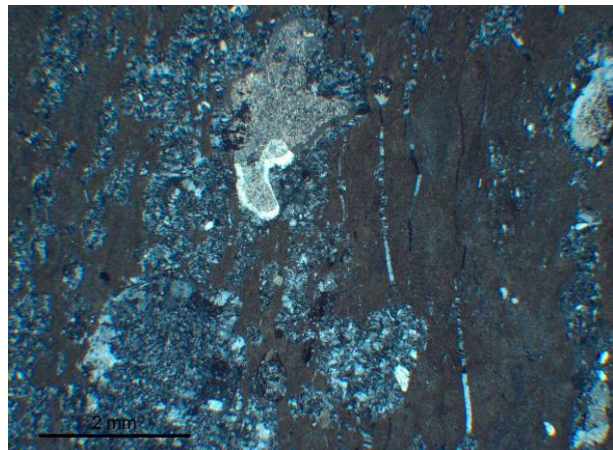
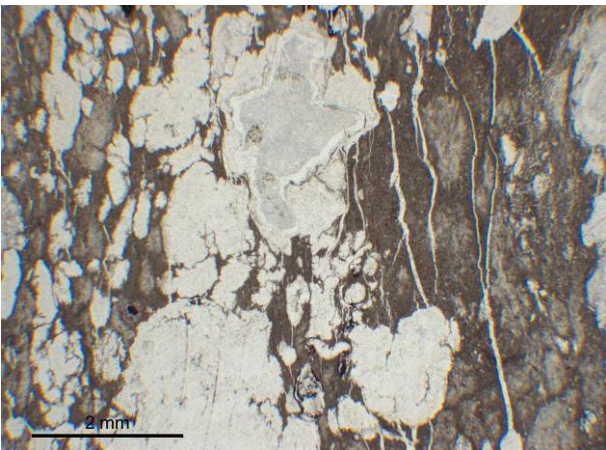
**GEODERIS**



**SC7-4 (LPA / LPNA)**

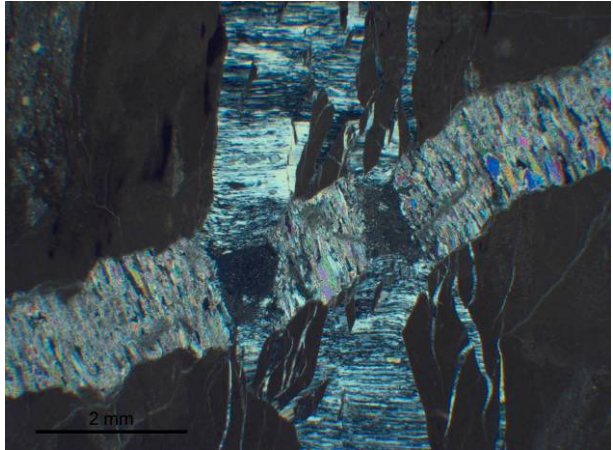
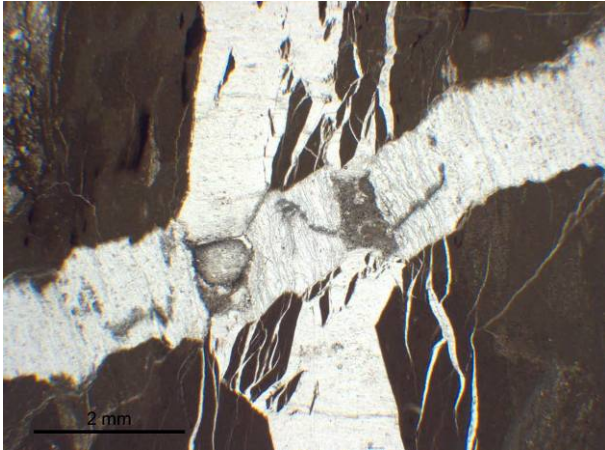


**SC7-5 (LPA / LPNA)**

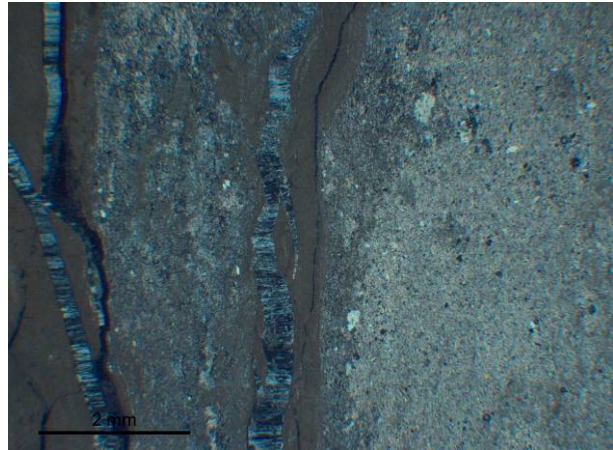
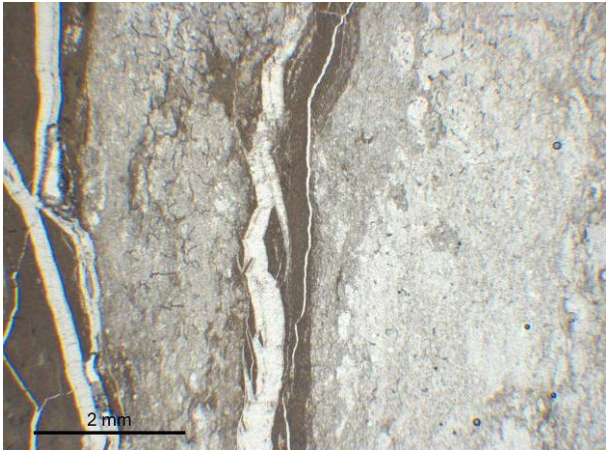


**SC7-6 (LPA / LPNA)**

**GEODERIS**



**SC7-7 (LPA / LPNA)**



**SC7-8 (LPA / LPNA)**

# **Annexe 2**

## **Limites d'Atterberg**



# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

## PROCES-VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau

Conforme à la norme : NF P 94-051

Procédure d'essai : MS1 - 10

Identification appareillage : Coupelle de Casagrande automatique (modèle Controls)  
 Coupelle de Casagrande manuelle type W.F.  
 N° balance

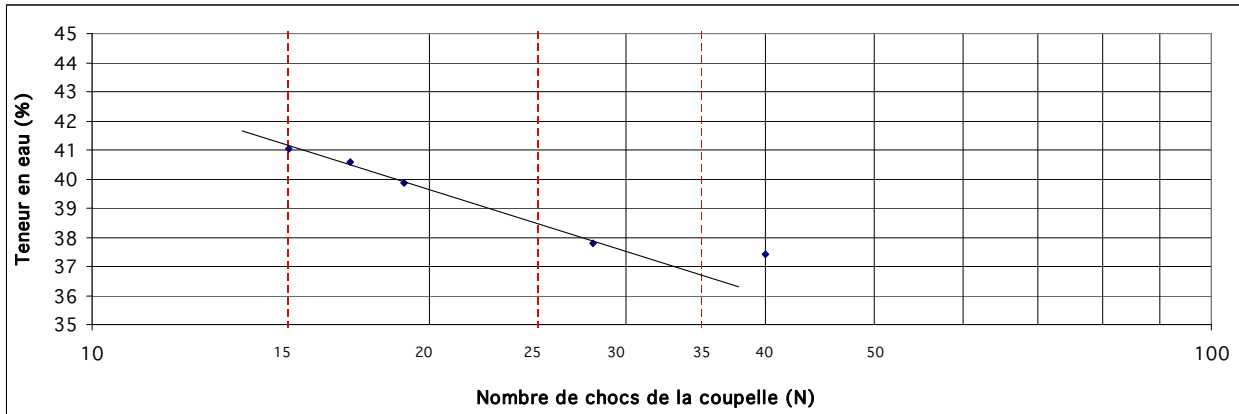
X
H3 et H2

Date : 03/09/2015  
 N° d'étude : 15.0524  
 Nom de l'étude : GEODERIS  
 Sondage : SC4-2  
 Profondeur :

Remarque

### Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups (N)	15	17	19	28	40			
Teneur en eau (%)	41,0	40,6	39,9	37,8	37,4			



### Limite de plasticité

Mesure n°	1	2	3	4
Teneur en eau (%)	31,5	31,8		

Limite de liquidité : $w_L =$	39	Indice de plasticité	
Limite de plasticité : $w_P =$	32	$I_P =$	7
Teneur en eau du sol		Indice de consistance	
$w (%) =$	24,3	$I_c =$	2,1

# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

**PROCES-VERBAL D'ESSAI**  
**DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG**

Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau

Conforme à la norme : **NF P 94-051**

Procédure d'essai : **MS1 - 10**

Identification appareillage : Coupelle de Casagrande automatique (modèle Controls)  
 Coupelle de Casagrande manuelle type W.F.  
 N° balance

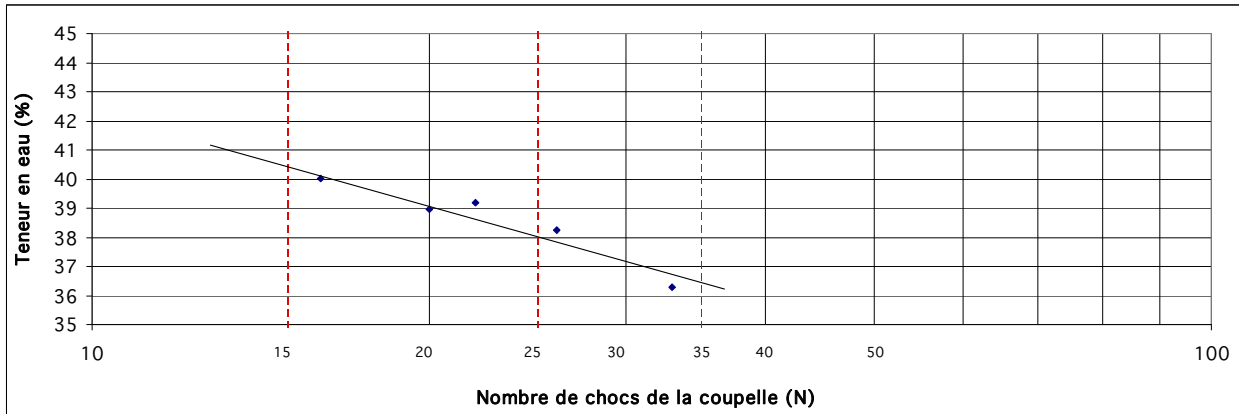
X
H3 et H2

Date : 03/09/2015  
 N° d'étude : 15.0524  
 Nom de l'étude : GEODERIS  
 Sondage : SC4-4  
 Profondeur :

Remarque

**Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande**

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups (N)	22	20	16	26	33			
Teneur en eau (%)	39,2	39,0	40,0	38,3	36,3			



**Limite de plasticité**

Mesure n°	1	2	3	4
Teneur en eau (%)	32,2	31,7		

Limite de liquidité : $w_L =$	38	Indice de plasticité	
Limite de plasticité : $w_P =$	32	$I_P =$	6
Teneur en eau du sol		Indice de consistance	
$w (%) =$	23,1	$I_c =$	2,5

# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

**PROCES-VERBAL D'ESSAI**  
**DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG**

Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau

Conforme à la norme : NF P 94-051

Procédure d'essai : MS1 - 10

Identification appareillage : Coupelle de Casagrande automatique (modèle Controls)  
 Coupelle de Casagrande manuelle type W.F.  
 N° balance

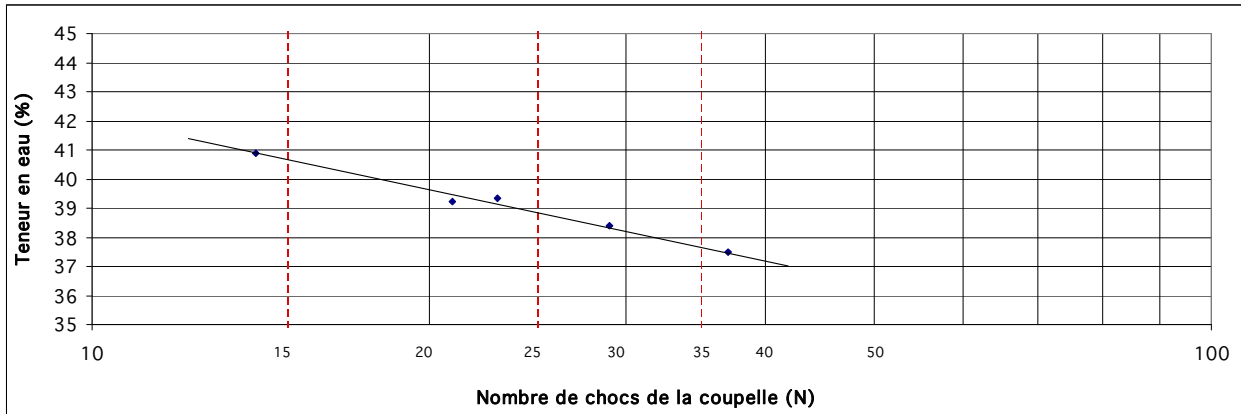
X
H3 et H2

Date : 03/09/2015  
 N° d'étude : 15.0524  
 Nom de l'étude : GEODERIS  
 Sondage : SC5-1  
 Profondeur :

Remarque

**Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande**

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups (N)	14	21	23	29	37			
Teneur en eau (%)	40,9	39,2	39,4	38,4	37,5			



**Limite de plasticité**

Mesure n°	1	2	3	4
Teneur en eau (%)	31,0	31,2		

Limite de liquidité : $w_L =$	39	Indice de plasticité	
Limite de plasticité : $w_P =$	31	$I_P =$ 8	
Teneur en eau du sol		Indice de consistance	
$w (%) =$	14,9	$I_c =$ 3,1	

# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

## PROCES-VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau

Conforme à la norme : NF P 94-051

Procédure d'essai : MS1 - 10

Identification appareillage : Coupelle de Casagrande automatique (modèle Controls)  
 Coupelle de Casagrande manuelle type W.F.  
 N° balance

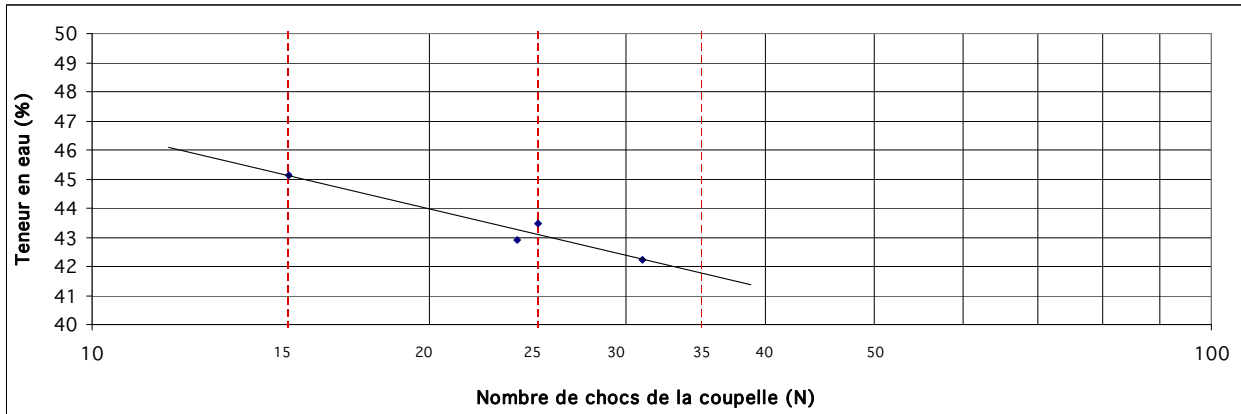
X
H3 et H2

Date : 08/09/2015  
 N° d'étude : 15.0524  
 Nom de l'étude : GEODERIS  
 Sondage : SC6-2  
 Profondeur :

Remarque

### Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups (N)	15	25	24	31				
Teneur en eau (%)	45,1	43,5	42,9	42,2				



### Limite de plasticité

Mesure n°	1	2	3	4
Teneur en eau (%)	36,0	35,2		

<b>Limite de liquidité : <math>w_L =</math></b>	<b>43</b>	<b>Indice de plasticité</b>
<b>Limite de plasticité : <math>w_P =</math></b>	<b>36</b>	<b><math>I_P =</math></b>
<b>Teneur en eau du sol</b>		<b>Indice de consistance</b>
<b><math>w (%) =</math></b>	<b>14,8</b>	<b><math>I_c =</math></b>
		<b>3,8</b>

# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

## PROCES-VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau

Conforme à la norme : **NF P 94-051**

Procédure d'essai : **MS1 - 10**

Identification appareillage : Coupelle de Casagrande automatique (modèle Controls)  
 Coupelle de Casagrande manuelle type W.F.  
 N° balance

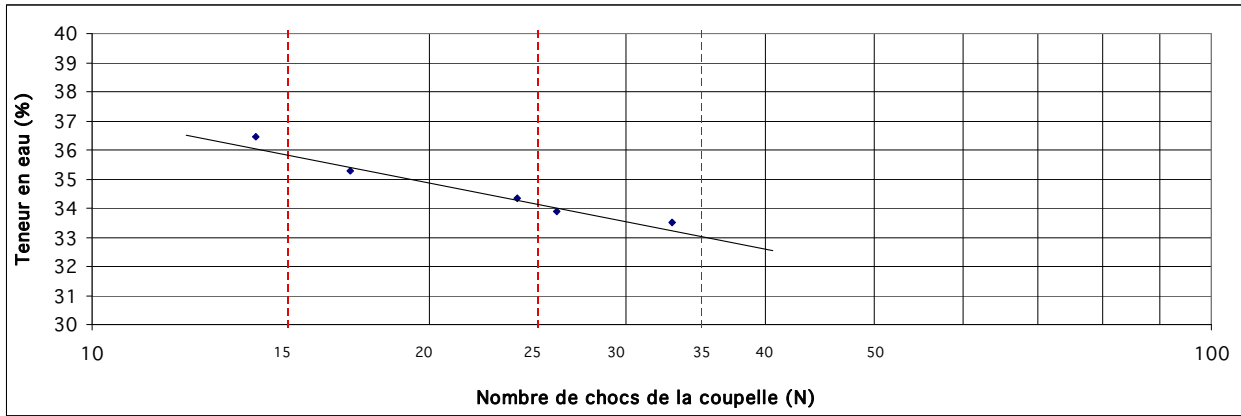
X
H3 et H2

Date : 08/09/2015  
 N° d'étude : 15.0524  
 Nom de l'étude : GEODERIS  
 Sondage : SC7-9  
 Profondeur :

Remarque

### Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups (N)	14	17	24	26	33			
Teneur en eau (%)	36,4	35,3	34,3	33,9	33,5			



### Limite de plasticité

Mesure n°	1	2	3	4
Teneur en eau (%)	29,3	29,2		

Limite de liquidité : $w_L =$	34	Indice de plasticité	
Limite de plasticité : $w_P =$	29	$I_P =$ 5	
Teneur en eau du sol		Indice de consistance	
$w (%) =$	16,4	$I_c =$ 3,7	

# **Annexe 3**

## **Valeurs au bleu de méthylène**

# GEODERIS



HydroGéomécanique Multi-échelle  
 Université de Lorraine - ENSG  
 UMR 7359 GéoRessources

## MESURE DE LA QUANTITE ET DE L'ACTIVITE DE LA FRACTION ARGILEUSE

Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache

Conforme à la norme NF P 94-068

Procédure d'essai : MS1-08

DATE	28/08/2015
OPERATEUR	E.L.
N° D'ETUDE	15.0524
NOM DE L'ETUDE	GEODERIS

Remarque :

Date de préparation de la solution de bleu de méthylène	21/08/2015
---	------------

Identification balance	H3
------------------------	----

REFERENCES DE L'ECHANTILLON	Teneur en eau initiale				Masse échantillon humide (g)	Masse échantillon sec (g)	Volume de solution de bleu (cm <sup>3</sup> )	V.B.S.
	PTH (g)	PTS (g)	Ptare (g)	w%				
SC4-2					84,16	315		3,74
SC4-4					87,75	295		3,36
SC5-1					62,10	155		2,5
SC5-3					56,25	120		2,13
SC6-2					54,86	150		2,73
SC6-5					67,91	110		1,62
SC7-11					62,68	110		1,75
SC7-13					64,45	85		1,32