



RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 4 : Essais de cisaillement direct cyclique de calcarénite-coulis

Auteurs : T. Bata – M. BOULON

Organisme : INPG

R/15/SOL/023
LC/14/SOL/56
Mars 2015

SOLCYP - FICHE SIGNALETIQUE

TITRE : Essais de cisaillement direct cyclique de calcarénite-coulis

RAPPORT N°: R/15/SOL/023

DATE D'ETABLISSEMENT : mars 2015

AUTEUR(S) : B. Tata - M. Boulon

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : INPG

THEME DE RATTACHEMENT : 4

LETTRE DE COMMANDE : LC/14/SOL/56

SOLCYP - extension aux roches tendres

Essais de cisaillement cyclique sur des interfaces calcarénite – coulis

Benoît Tata, Ingénieur ENSE³ Grenoble INP, Fugro GeoConsulting S.A.

Marc Boulon, professeur retraité, Université Grenoble-Alpes, Laboratoire 3SR

Alain Puech, directeur scientifique, Fugro GeoConsulting S.A.

Février 2015

Résumé de l'étude

Le développement de l'industrie éolienne offshore rend urgent le besoin de disposer de lois d'interface sol-pieu sous sollicitations cycliques c'est-à-dire susceptibles de décrire la dégradation des propriétés de l'interface en fonction de la nature des cycles (leur amplitude notamment), et de leur nombre.

Le projet national SOLCYP a pour objectif de développer des méthodologies pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques. Une procédure pour prendre en compte la dégradation cyclique le long de pieux sous chargements axiaux a été mise au point. Cette procédure est applicable aux pieux battus et forés dans des sols standards, c'est à dire sables et argiles. Il convient maintenant de voir comment cette procédure peut être étendue au cas des pieux forés ancrés dans les roches tendres.

L'objet de cette étude a été de réaliser des essais exploratoires en vue de comprendre le comportement de l'interface roche – pieu sous chargements axiaux et cycliques. Pour ce faire, des échantillons d'interfaces calcarénite – coulis de ciment ont été soumis à des cisaillements monotone et cyclique à l'aide d'une boîte de cisaillement en 3D appelée BCR3D au laboratoire 3SR de Grenoble. L'analyse des résultats obtenus sur pieux modèles et lors de cisaillements directs sur chemins à Contrainte Normale Constante (CNC) et à Volume Constant (VC) démontre que le comportement de l'interface est fortement contrôlé par la rigidité normale externe, en l'occurrence ici, celle du massif rocheux. Une rigidité infinie est couramment attribuée à cette catégorie des roches. La plus grande partie des cisaillements cycliques de cette étude a été réalisée à volume constant. La rupture de l'interface a toujours lieu par la création d'une surface de rupture dans la calcarénite, bien moins résistante que le coulis.

A très faible amplitude des cycles, la réponse globale de l'interface est régie par deux phénomènes. Un premier phénomène (petite échelle) lié à la dilatance - contractance des grains constitutif du matériau rocheux et un deuxième phénomène (grande échelle) de dilatance – contractance géométrique lié aux rainures (aspérités) présentes sur le plan moyen d'interface.

A forte amplitude des cycles, mais en deçà de la limite de rupture de l'interface, le phénomène de dilatance - contractance géométrique des rainures s'impose et prime sur la contribution des grains constitutifs. Le comportement de l'interface est donc largement contrôlé par la géométrie des rainures. A nombre de cycles croissant, on observe d'abord une tendance dilatante (augmentation de contrainte normale), puis une tendance contractante brutale (chute de contrainte normale), ce qui différencie notablement l'interface calcarénite – coulis de l'interface sol - structure classique.

Mots clés : rugosité interne de forage, rugosité modèle réduit, interface calcarénite - coulis, cisaillement direct à volume constant, dégradation cyclique du frottement

Table des matières

1. 1	INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE	7
1.1	INTRODUCTION	7
1.2	PROBLÉMATIQUE	7
2. 2	LES MATÉRIAUX EN CONTACT	9
2.1	LA CALCARÉNITE	9
2.2	LE COULIS DE CIMENT	12
3. 3	PREPARATION DES ECHANTILLONS D'INTERFACE CALCARENITE-COULIS	12
3.1	RAINURAGE (ETAT DE SURFACE DE LA CALCARENITE)	12
3.2	SCELLEMENT DE L'INTERFACE CALCARÉNITE-COULIS	14
4. 4	DISPOSITIF EXPERIMENTAL - LA MACHINE DE CISAILLEMENT DIRECT	15
4.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA BCR3D	15
4.2	DESCRIPTION MÉCANIQUE ET PERFORMANCES	16
5. 5	PROCEDURE D'ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT CYCLIQUE	17
5.1	PRINCIPE DE REPARTITION DES EPROUVETTES SUR UNE CAROTTE	17
5.2	PRINCIPE DES ESSAIS PSEUDO-STATIQUES (ESSAIS DITS MONOTONES)	17
5.3	PRINCIPE DES ESSAIS CYCLIQUES	19
6. 6	RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS	21
6.1	CALCARENITE LISSE - COULIS [VC] : ESSAI F12	21
6.2	CALCARENITE RAINUREE-COULIS [CNC]: ESSAI F ₁	24
6.3	CALCARENITE RAINUREE- COULIS (VC)	27
6.3.1	ESSAIS « MONOTONES » [VC] A SEUILS DE DEPLACEMENT RELATIF TANGENTIEL IMPOSES	28
6.3.2	ESSAIS CYCLIQUES [VC] A SEUILS DE DEPLACEMENT RELATIF TANGENTIEL IMPOSES	35
6.3.3	ESSAIS CYCLIQUES [VC] A SEUILS IMPOSES EN CONTRAINTE DE CISAILLEMENT	46
6.3.4	AUTRES ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT CYCLIQUE REALISES	61
7. 7	ANALYSE ET SYNTHESE DES RESULTATS	72
7.1	RESISTANCE ULTIME DE L'INTERFACE CALCARENITE LISSE – COULIS en cisaillement monotone	73
7.1.1	: Exploitation des essais F9 et F12	73
7.1.2	: Confrontation aux résultats de l'essai F1 (CNC) interprétés localement	74
7.1.3	: Conclusions relatives à la résistance au cisaillement (monotone) de l'interface calcarénite lisse - coulis	75

7.2 RESISTANCE ULTIME DE L'INTERFACE CALCARENITE RAINUREE - COULIS EN CISAILLEMENT « MONOTONE » A VOLUME CONSTANT (VC)	76
7.2.1: Exploitation des essais F2 et F13	76
7.2.2: Conclusions relatives à la résistance au cisaillement (monotone) de l'interface calcarénite rainurée – coulis à volume constant	77
7.3 MODE(S) DE RUPTURE DE L'INTERFACE CALCARENITE RAINUREE - COULIS	77
7.4 CARACTERISATION DE LA DEGRADATION CYCLIQUE EN CISAILLEMENT DES INTERFACES CALCARENITE RAINUREE – COULIS	78
7.4.1 : cycles symétriques, exploitation des essais F8, F14, et F10	79
7.4.2 : Conclusion sur la dégradation cyclique lors des essais de cisaillement symétriques	84
7.4.3 : cycles asymétriques, exploitation des essais F10, F15, F5, F16 et F11	86
7.4.4: Conclusion sur la dégradation cyclique lors des essais de cisaillement asymétriques	92
7.4.5 : Conclusion générale sur la dégradation cyclique	93
8. PASSAGE AU CAS REEL	98
9. CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES	100
9.1 Conclusions	100
9.1.1: Cisaillement VC à grande amplitude de déplacement relatif tangentiel	100
9.1.2 : Cisaillement VC à faible amplitude de déplacement relatif tangentiel ou à faible contrainte de cisaillement	100
9.1.3: Un cycle de cisaillement VC de moyenne amplitude	101
9.1.4: Cycles de cisaillement VC	101
9.2 : Perspectives	101
10. BIBLIOGRAPHIE	103

1 INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

1.1 INTRODUCTION

La France a des projets de construction de 7 à 10 fermes éoliennes off-shore sur la côte atlantique et dans la Manche. Les puissances installées par ferme seront dans la fourchette de 420 à 750 MW, chaque éolienne devant délivrer entre 5 et 8 MW. Le sol marin de ces sites est constitué de roches tendres, calcarénite ou craie. Les fondations de ces éoliennes, monopile ou jacket, soumises à sollicitations cycliques, sont en cours de définition. Des solutions sur pieux forés seront nécessairement considérées. Dans ce cas, les propriétés du contact roche-coulis constitueront un élément déterminant du dimensionnement de ces fondations dans la phase avancée des projets. Pour plus de détails, on pourra se reporter au rapport SOLCYP « *Existing design approaches for offshore pile design in weak carbonate rocks* », et à la publication « *Design for cyclic loading : piles and other foundations* ».

Les premiers résultats du programme national SOLCYP concernant les pieux sous chargement axial cyclique ancrés dans les terrains argileux et sableux, ont généralement montré une chute de capacité, résultant d'une chute de contrainte normale le long du fût. La procédure SOLCYP s'attache à définir une méthodologie permettant de prévoir cette chute de contrainte normale. Dans la phase 4 du Projet National, il a été décidé de procéder à une étude exploratoire destinée à évaluer dans quelle mesure la procédure SOLCYP pouvait s'appliquer aux pieux forés dans les roches tendres. Des essais d'interaction roche-coulis ont été réalisés au cours du 1^{er} semestre 2014, au laboratoire 3SR. Le matériau cible était une calcarénite.

La géométrie du contact sol-pieu, paramètre constitutif des propriétés mécaniques de l'interface, est déterminante. Nous avons retenu le cas d'une paroi rocheuse dont la rugosité résulte du passage de l'outil de forage, le pieu étant scellé à l'aide d'un coulis classique de ciment. Cependant, la taille des échantillons d'interface roche-coulis étant limitée, nous avons adopté une rugosité de roche à l'échelle géométrique $\frac{1}{2}$ par rapport à la rugosité réelle typique. L'extension des résultats au cas réel sera discutée au chapitre 8.

Les propriétés mécaniques essentielles de la calcarénite et du coulis sont présentées au chapitre 2. La machine d'essai (BCR3D), de cisaillement direct pour le contact entre géomatériaux, est décrite au chapitre 3. Les chapitres 4 et 5 sont consacrés respectivement à la description de la procédure de préparation des échantillons, et à celle des essais proprement dits. Le chapitre 6 donne les détails du programme d'essai, ainsi que les principaux résultats de ces essais. Une analyse et une synthèse de ces résultats sont présentées au chapitre 7. Enfin, une conclusion, des perspectives, et une tentative d'extrapolation des résultats au cas réel (échelle 1) sont fournies au chapitre 8. On trouvera en annexe les résultats détaillés des essais.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Les pieux forés offshore sont usuellement de type tube métallique inséré dans un trou pré-foré. L'annulaire est ensuite cimenté par gravité à l'aide d'un coulis de ciment. Deux conditions d'interface sont à vérifier : interface acier-coulis et interface coulis-roche (figure 1.1). D'après plusieurs études, la capacité ultime des pieux forés offshore serait conditionnée par la plus faible des deux valeurs :

résistance au cisaillement développée à l'interface acier-coulis ou résistance au cisaillement développée interface coulis-roche.

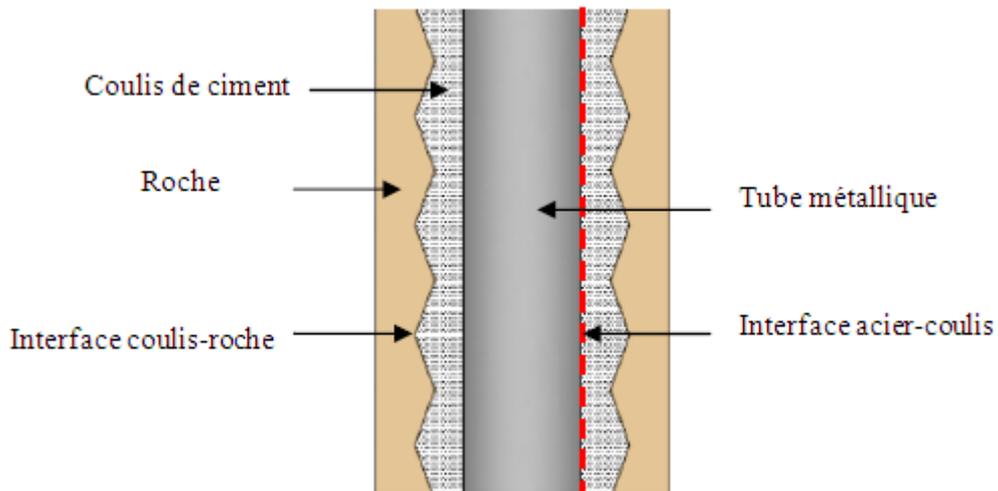


Figure 1.1 : Coupe transversale idéalisée du pieu foré offshore

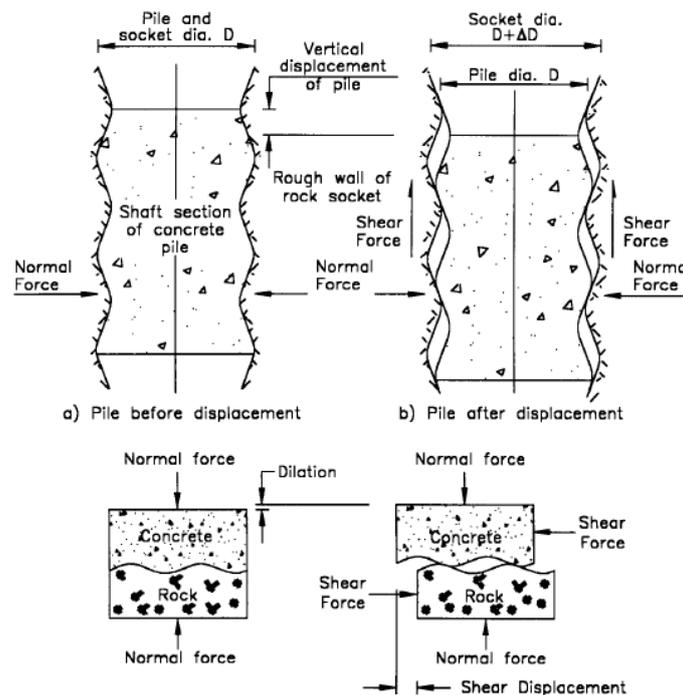


Figure 1.2 : Comportement de l'interface roche-pieu pour un pieu foré traditionnel soumis à des sollicitations axiales d'après Johnston et Lam, 1989.

La compréhension du comportement d'interface acier-coulis est limitée par un manque de documentation. Toutefois, les travaux réalisés par Abbs & Needham, 1985, Fragio et al, 1985 ont démontré que dans les roches tendres la capacité ultime des pieux forés offshore était gouvernée par la résistance au cisaillement de l'interface coulis-roche. L'étude expérimentale porte sur le

comportement de l'interface coulis-roche sous sollicitations cycliques. Le mécanisme de rupture de l'interface roche-coulis est voisin, voire identique au mécanisme de cisaillement des joints rocheux. Le comportement de l'interface coulis-roche d'un pieu foré traditionnel soumis à des sollicitations axiales est illustré par la figure 1.2 d'après Johnston et Lam, 1989.

2 LES MATÉRIAUX EN CONTACT

L'étude expérimentale porte sur le comportement de l'interface coulis-calcarénite sous sollicitations cycliques.

2.1 LA CALCARÉNITE

La calcarénite soumise au cisaillement est décrite comme une roche tendre carbonatée. Cette catégorie de roche a une teneur en carbonate supérieure à 90%. Le comportement mécanique de ce type de roche tendre est décrit dans le rapport SOLCYP précédemment cité « *Existing design approaches for offshore pile design in weak carbonate rocks* »

Les échantillons soumis aux essais proviennent d'un site offshore qui peut être considéré comme représentatif de la plupart des sites rocheux identifiés comme susceptibles de recevoir des fermes éoliennes marines.

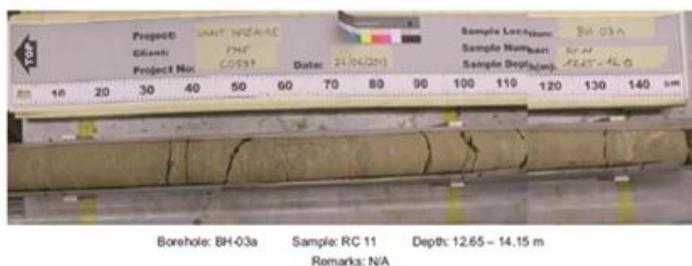


Figure 2.1 : Tronçons de carotte de calcarénite.

Les carottes de calcarénite prélevées ont un diamètre de 100mm.

Il existe une importante hétérogénéité, ainsi que des lacunes, dans le matériau, tel qu'il apparaît dans les carottes prélevées, qui ont servi à préparer les échantillons calcarénite-coulis de ciment (figure 2.1)

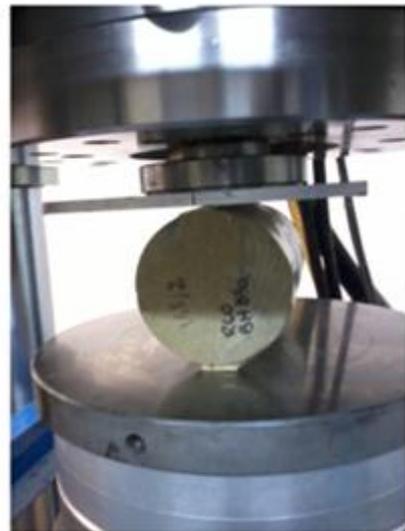
Des essais préliminaires ont été réalisés en vue de déterminer les caractéristiques de la calcarénite et du coulis de ciment utilisé (figure 2.2).

Essais Préliminaires

- **Essais de compression simple** : ces essais sont réalisés en vue de déterminer la résistance à la compression simple (UCS) de la calcarénite utilisée. Deux échantillons de forme cylindrique, d'élancement égal à 2 ont été soumis à la compression simple.



Essai de compression simple



Essai Brésilien

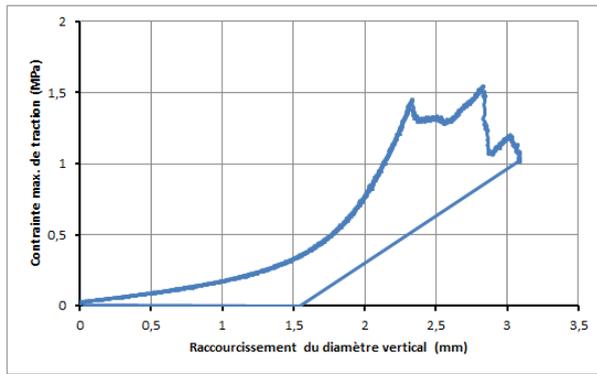
Figure 2.2: Essais préliminaires réalisés sur 2 échantillons de calcarénite.

- **Essais Brésiliens ou de fendage**: l'essai Brésilien permet de déterminer la résistance en traction du matériau. Deux échantillons de calcarénite ont été soumis à cet essai classique. Cet essai est interprété au moyen de la théorie de l'élasticité. Cette théorie indique qu'il existe des contraintes de compression dans le cylindre (figure 2.2) sur des facettes horizontales, tandis que les contraintes sont de traction sur les facettes verticales le long du plan joignant les 2 génératrices soumises à la force de la presse.

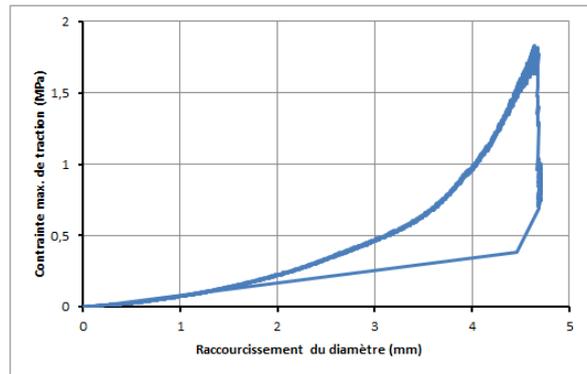
Soient P l'effort de compression appliqué, L la longueur du cylindre, D son diamètre, la contrainte maxima de traction dans le cylindre vaut :

$$\frac{P}{\pi LD}$$

Les résultats obtenus lors de ces essais préliminaires sont illustrés sur les graphiques suivants.

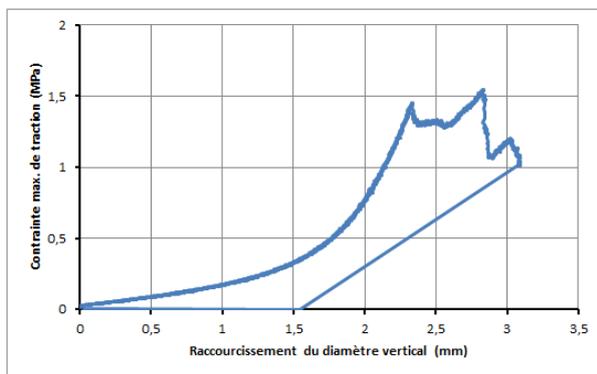


Echantillon N°1

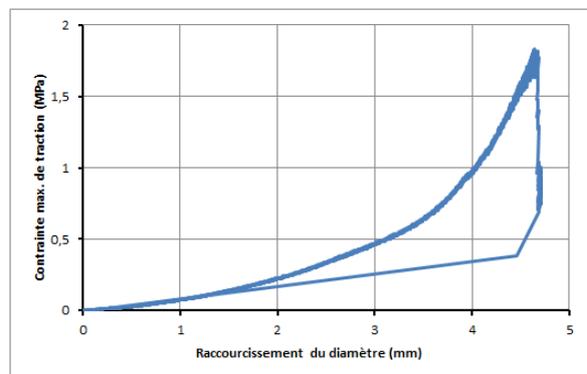


Echantillon N°2

Figure 2.3: Essais de compression simple réalisés sur 2 échantillons de calcarénite.



Echantillon N°1



Echantillon N°2

Figure 2.4: Résultats des essais Brésiliens réalisés sur 2 échantillons de calcarénite

Tableau 2.1 : Caractéristiques de la calcarénite soumis au cisaillement

Propriétés	Essais de compression simple		Essais Brésilien	
	échantillon N°1	échantillon N°2	échantillon N°1	échantillon N°2
UCS (MPa)	4,48	13,36		
Traction (MPa)			1,45	1,80
Teneur en eau(%)*	7,5			
Poids volumique (kg/m ³)	2197			

*Mesures effectués uniquement sur des morceaux de calcarénite de l'échantillon N°1

- **Mesure de teneur en eau :** cette mesure a été effectuée sur 5 échantillons de calcarénite. La teneur en eau moyenne est de 7,5%. Il se peut que la teneur en eau soit variable d'un échantillon provenant d'une carotte à l'autre. La variation de teneur en eau pourrait aussi être liée aux conditions de conservation des échantillons et à la durée de stockage des carottes.

- **Mesure du poids volumique de la calcarénite** : Les mesures effectuées sur quatre échantillons ont donné un poids volumique moyen de 2197 kg/m³

Les résultats des essais préliminaires effectués sur la calcarénite sont résumés dans le tableau 2.1. Ces résultats présentent les caractéristiques de la calcarénite utilisée pour des essais d'interface.

Le coulis de ciment utilisé a été également soumis aux essais Brésilien et de compression simple. Les caractéristiques du coulis sont présentées au paragraphe 2.2.

2.2 LE COULIS DE CIMENT

Le ciment utilisé pour la composition du coulis est du type « Ciment OPTIMAT- CEM II/B-LL 32,5 R CE NF ». Le coulis a été préparé selon la composition recommandée par les normes pour la mise en œuvre des pieux forés offshore. Ainsi, la composition du coulis a été réalisée en respectant la proportion ciment-eau (C/E) de 2. Les essais de compression simple et de traction réalisés sur le coulis après 28 jours révèlent une résistance moyenne à la compression simple de 20,7MPa et une résistance moyenne à la traction de 2,31MPa. Bien que ces valeurs soient inférieures aux valeurs recommandées dans la pratique de mise en œuvre des pieux forés offshore, cette différence n'a qu'une influence négligeable sur les résultats des essais de cisaillement de l'interface coulis-calcarénite car ces valeurs restent bien supérieures à la résistance propre de la calcarénite.

3 PREPARATION DES ECHANTILLONS D'INTERFACE CALCARENITE-COULIS

Les carottes de calcarénite prélevées ont été découpées en tranches de 50mm d'épaisseur selon la disposition de la figure 3.2. Chaque carotte ayant un diamètre de 100mm, les spécimens (tranches) de calcarénite ainsi découpés ont chacun pour dimensions : épaisseur = 50mm et diamètre = 100mm.

3.1 RAINURAGE (ETAT DE SURFACE DE LA CALCARENITE)

Les études réalisées par Johnston et Lam (1989), idéalisées sur la Figure 3.1 ont montré que la rugosité laissée par l'outil de forage pourrait avoir une contribution importante sur le comportement de l'interface roche-coulis. Plusieurs chercheurs ont reconnu le rôle joué par cette rugosité sur le comportement de l'interface roche-pieu. La représentation de cette rugosité sur la surface de calcarénite est donc indispensable pour une étude du comportement de l'interface calcarénite-coulis dans le cadre des pieux forés offshore.

Tandis que Seidel et Haberfield (1995) recommandent que la représentation de cette rugosité sur un échantillon rocheux soit dépendante de l'échelle de surface, Nam (2004) a mené une étude de quantification de la rugosité produite par différents types d'outils de forage sur la paroi des pieux forés dans le calcaire. Seidel et Haberfield proposent un modèle dit « Monash socket roughness

model » pour l'analyse statistique de cette rugosité. Ce modèle repose sur une idéalisation dans laquelle l'interface roche –coulis est considérée en 2-D comme une série de cordes de longueur constante, l_a , interconnectées entre elles (Figure 3.1).

Lee et al (2003) ont effectué des mesures de rugosité sur la paroi de 15 pieux forés sur 10 sites de la péninsule Coréenne constitués de granite, gneiss, sandstone et andésite. Dans leur rapport, ils proposent une représentation de la rugosité par des dents triangulaires de 50mm de largeur l_a et 1 à 4mm de hauteur Δr quel que soit le type de roche.

Tableau 3.1: Géométrie 2-D de rugosité proposée par S. Nam 2004 pour les pieux forés dans les roches

Rock type	UCS of intact rock (MPa)	Roughness height, Δr (mm)	Roughness angle (θ°)	Drilling tool
Limestone	10	3.2 – 3.7	3.7 – 4.2	Auger
		4.3 – 5.1	4.9 – 5.8	Core barrel
Clayshale	1 - 4	3.6 – 5.3	4.1 – 6.1	Auger
		4.7 – 5.8	5.4 – 6.7	Core barrel

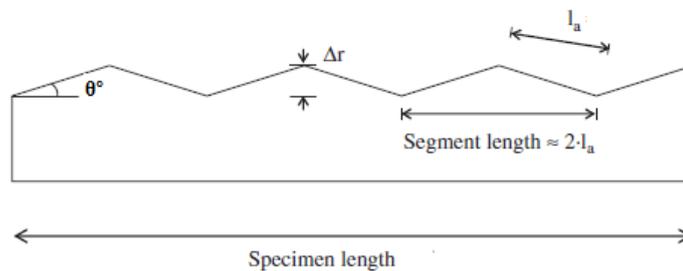


Figure 3.1 : Représentation de la rugosité par des dents de scie, d'après Nam 2004.

D'après les études de Nam (2004), la rugosité pourrait être représentée par une série d'aspérités identiques, triangulaires de 50 mm de base, l_a , un angle d'aspérités, θ , et une profondeur Δr (figure 3.1) selon l'outil de forage utilisé et le type de roche. Les résultats de ces études sont résumés dans le tableau 3.1.

Selon les suggestions de Nam (2004) pour les pieux forés dans le calcaire, une série d'aspérités de géométrie identique, inclinées selon l'angle $\theta = 5.7^\circ$ ont été reproduites sur les surfaces des spécimens de calcarénite. L'angle (θ) appelé « angle de rugosité » correspond à une aspérité triangulaire de base l_a , égale à 10 mm et de profondeur Δr égale à 0.5mm (figure 3.2). En référence au tableau 3.1 et à la figure 3.2, ces aspérités créées par rainurage sont à une échelle allant de 1/7 à 1/10 environ par rapport aux aspérités réelles de forage.

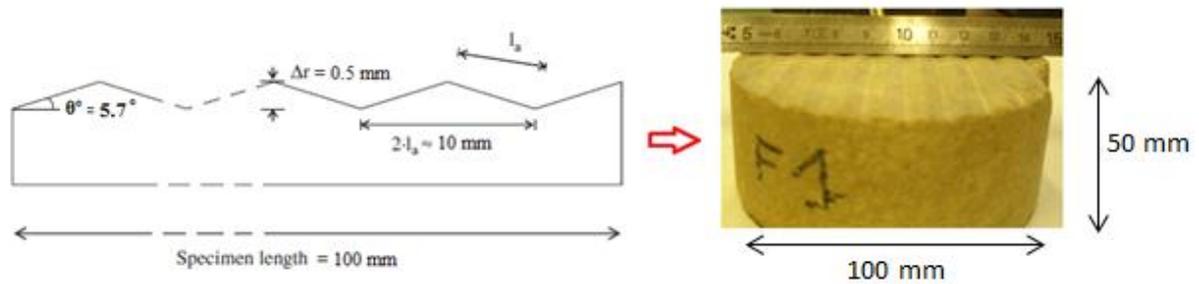


Figure 3.2 : Reproduction de la rugosité sur un spécimen de calcarénite.

N.B : Cet exemple de représentation de la rugosité de parois de pieux forés par des aspérités triangulaires de géométrie identique a été déjà utilisé par Clayton et Shoostari (1990) pour des essais de cisaillement craie-béton en vue de déterminer le comportement de pieux forés dans la craie.

3.2 SCELLEMENT DE L'INTERFACE CALCARÉNITE-COULIS

Les spécimens de calcarénite rainurés sont placés chacun dans un moule dit demi-boîte interne et ensuite recouverts par le coulis de ciment au travers d'une deuxième demi-boîte interne superposée à la boîte contenant la calcarénite (Figure 3.3).

L'échantillon ainsi préparé est laissé pendant 28 jours pour que le coulis atteigne une résistance proche de la résistance recommandée dans la pratique des pieux forés offshore.

Après 28 jours, l'interface est soumise au cisaillement à l'aide d'une machine de cisaillement direct présentée dans la section 4.

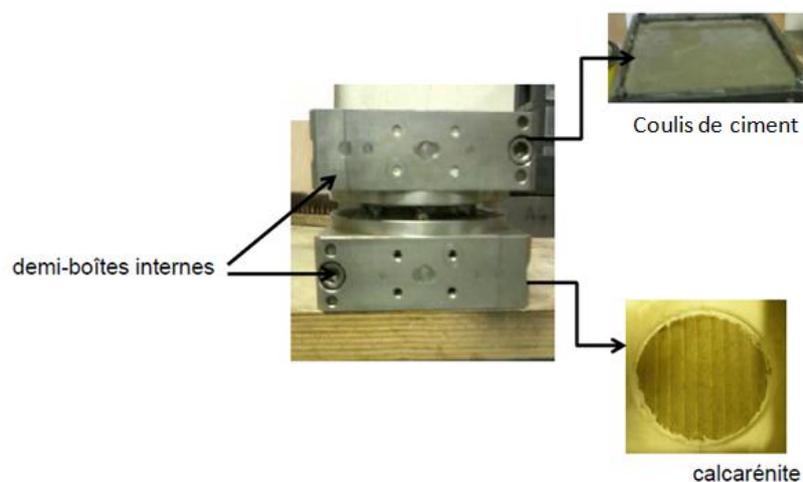


Figure 3.3 : Scellement de l'interface calcarénite-coulis.

4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL - LA MACHINE DE CISAILLEMENT DIRECT

Le but de ce chapitre est de décrire le dispositif expérimental utilisé. Le dispositif expérimental, qui nous a permis de réaliser des essais de cisaillement direct de l'interface coulis-calcarénite, est une boîte de cisaillement conçue et développée au sein du laboratoire 3SR de Grenoble sous la direction de Marc Boulon. Le dispositif est appelé BCR3D, comme « Boîte de Cisaillement Roches - 3 Dimensions ».



Figure 4.1 : La machine de cisaillement direct BCR3D

La BCR3D est une machine de cisaillement direct de laboratoire, permettant de caractériser mécaniquement les joints rocheux et tous contacts entre géomatériaux. L'essai de cisaillement direct étant l'essai le plus classiquement utilisé pour l'étude du comportement mécanique des interfaces rocheuses, le choix s'est naturellement orienté vers cette machine (figure 4.1).

4.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA BCR3D

L'originalité de ce dispositif expérimental consiste en un cisaillement, qui n'est pas dû au seul déplacement d'une des deux épaves du joint (soit la partie supérieure, soit la partie inférieure), mais à deux déplacements symétriques de celles-ci en sens inverse, afin que la force normale reste centrée sur la partie active du joint. La rotation relative de l'épave supérieure par rapport à l'épave inférieure du joint est ainsi très limitée. Cela implique aussi que la vitesse relative de cisaillement est deux fois plus grande que la vitesse nominale fournie par chaque moteur, ce qui est intéressant pour réaliser des essais à grande vitesse de sollicitation.

L'autre aspect original de ce dispositif réside dans le fait qu'il permet de cisailier l'échantillon dans n'importe quelle direction de son plan. On peut ainsi étudier l'anisotropie du cisaillement d'une

interface. Pour cela la boîte de cisaillement est munie de deux axes de cisaillement identiques et perpendiculaires (Figure 4.1). La combinaison simultanée des deux déplacements relatifs orthogonaux permet de cisailer l'échantillon dans n'importe quelle direction du plan de cisaillement.

4.2 DESCRIPTION MÉCANIQUE ET PERFORMANCES

Pour fournir une sollicitation tridimensionnelle, la BCR3D comporte trois axes de sollicitation, indépendants les uns des autres, un axe permettant d'appliquer l'effort normal et deux axes orthogonaux permettant le cisaillement. Les deux axes de cisaillement sont bien évidemment équivalents et nos essais de cisaillement ont été menés suivant l'axe Y seul (l'axe pseudo-statique sur la figure 4.1). La figure 4.2 fait ressortir les traits essentiels de la boîte de cisaillement selon l'axe Y. L'échantillon est scellé dans deux boîtes métalliques, appelées « demi-boîtes internes » (voir section 3.2) solidaires l'une de l'autre jusqu'au début du cisaillement, afin que l'échantillon ne subisse que les déplacements relatifs décidés par l'opérateur. L'échantillon ainsi préparé est positionné à l'intérieur de la boîte de cisaillement proprement dite, dans deux boîtes appelées « demi-boîtes externes ». Les demi-boîtes externes sont équipées de systèmes de glissières à billes permettant des déplacements dans les directions X et Y (et bien sûr Z pour la demi-boîte supérieure). Elles sont entraînées par des vérins électromécaniques. Pour nos essais, l'axe de cisaillement X a été maintenu bloqué de sorte que le cisaillement se fasse selon l'axe Y. La demi-boîte externe supérieure est solidaire d'un plateau coulissant le long de quatre colonnes verticales. Le plateau est entraîné par un vérin électromécanique afin d'appliquer l'effort normal. Chaque vérin est équipé d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement. L'ensemble est monté sur un bâti très rigide et la réaction fournissant l'effort normal est transmise par les quatre tirants de forte section.

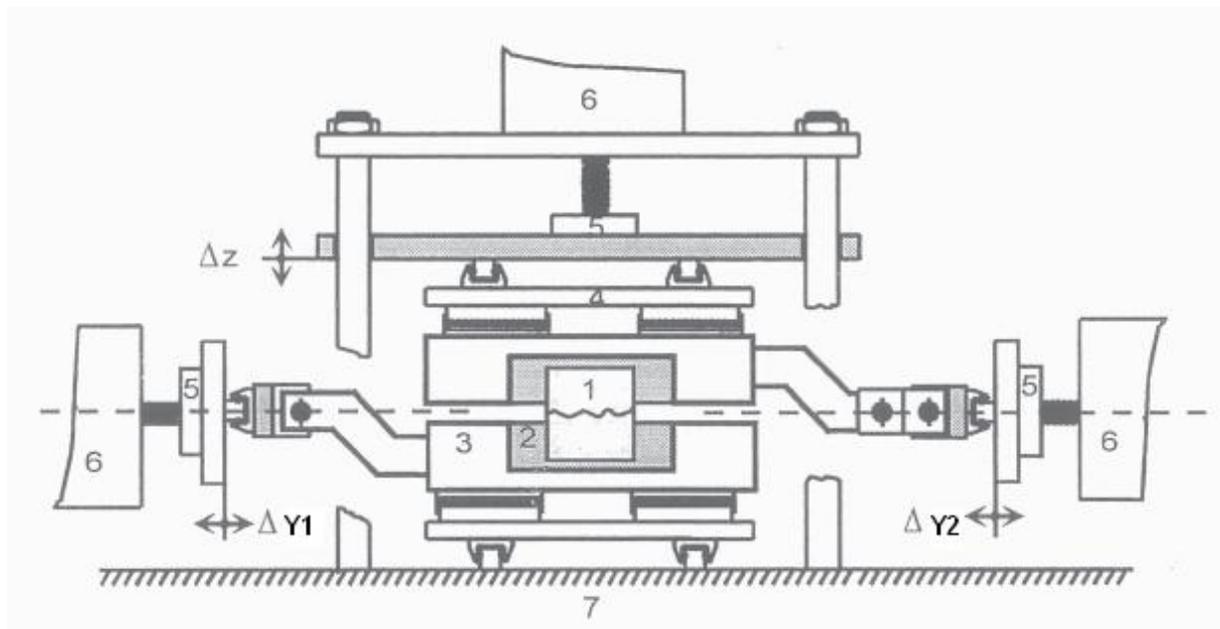


Figure 4.2 : Coupe schématique de la BCR3D selon l'axe de cisaillement Y (1-Echantillon, 2-demi-boîte interne, 3-demi-boîte externe, 4-glissières à billes, 5-capteurs de forces, 6-vérins mécaniques, 7-bâti rigide, ($\Delta Y1$, $\Delta Y2$, ΔZ)-capteurs de déplacement)

5 PROCEDURE D'ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT CYCLIQUE

5.1 PRINCIPE DE REPARTITION DES EPROUVETTES SUR UNE CAROTTE

Pour tenir compte de l'effet de l'hétérogénéité de la calcarénite présenté dans la section 2.1, le programme d'essai à initialement été formulé selon le découpage de la carotte ci-dessous.

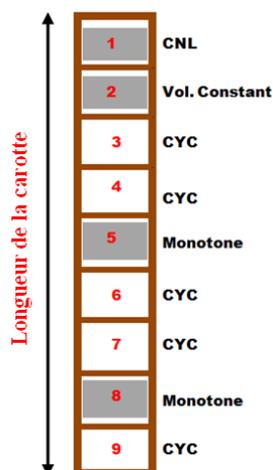


Figure 5.1 : répartition des essais au long de carotte n° 1.

Il s'agit ici d'identifier de possibles hétérogénéités dans les carottes de calcarénite. On choisit pour ce faire un type d'essai monotone de référence (à volume constant) et on effectue un essai monotone de référence sur une tranche de carotte de manière à encadrer systématiquement deux essais cycliques sur des tranches consécutives (voir principe pour la carotte N°1, figure 5.1).

Les deux essais précédents devraient être réalisés sur deux éprouvettes successives dans la même carotte.

En réalité, cette formulation telle que décrite sur la figure 5.1 n'a pas été respectée pour toutes les carottes. Néanmoins, deux essais monotones à volume constant réalisés sur deux carottes différentes ont donné le même résultat mécanique (Essai F2 et F13).

5.2 PRINCIPE DES ESSAIS PSEUDO-STATIQUES (ESSAIS DITS MONOTONES)

Il est de plus en plus couramment admis que l'essai de laboratoire qui simule le mieux le comportement d'une interface sol-pieu est l'essai de cisaillement direct à rigidité latérale constante (dit essai CNS=Constant Normal Stiffness). Ce type d'essai est discuté par ailleurs.

Au stade de cette étude exploratoire, seuls deux cas extrêmes ont été étudiés :

- L'essai à rigidité normale imposée (externe) nulle ou essai à Contrainte Normale Constante (CNC)
- L'essai à rigidité normale imposée (externe) infinie ou essai à Volume Constant (VC)

Remarque : La rigidité normale externe est imposée par la machine, et doit être considérée comme une condition aux limites externe à l'échantillon. Cette rigidité externe ne doit pas être confondue avec la rigidité normale interne à l'échantillon, qui est une quantité rhéologique.

Deux interfaces (deux échantillons) ont été respectivement soumises aux essais l'un CNC (contrainte normale constante) et l'autre VC (volume constant) en pseudo-statique. Ainsi, l'éprouvette 1 (figure 5.1) était réservée à l'essai « monotone » CNC (1 cycle aller et retour) jusqu'à un pic dans chaque sens ($\tau_{pic\ CNC}$). L'éprouvette 2 a subi un essai « monotone » à volume constant (1 cycle aller et retour) jusqu'à un pic dans chaque sens ($\tau_{pic\ Vol\ Ct}$). Ces deux essais (CNC et VC monotones) ont été respectivement nommés F1 et F2.

Un deuxième essai monotone à volume constant (nommé F12) a été réalisé sur une interface calcarénite-coulis plane (calcarénite sans rainurage) afin de déterminer la résistance au cisaillement d'une interface lisse. Cet essai permettra par la suite de déduire la contribution de la rugosité (rainures) à la résistance au cisaillement de l'interface calcarénite – coulis.

Un essai monotone à volume constant (nommé F13) a été réalisé sur une interface provenant d'une carotte différente de celle de l'échantillon utilisé pour l'essai F2 afin d'identifier des effets de l'hétérogénéité de la calcarénite sur le comportement mécanique de l'interface calcarénite - coulis. Cet essai monotone F13 a été suivi d'une série de cycles en petits déplacements appliquée sur la même interface.

Ces essais ont été réalisés à déplacements relatifs tangentiels contrôlés de 2mm d'intervalle dans les sens positif et négatif

L'essai F1 (essai en CNC) a été réalisé sous une contrainte normale constante de 300kPa représentative du niveau typique de contrainte normale qui s'applique sur l'interface roche-pieu dans les cas de pieux forés dans les roches tendres.

Cette contrainte (300kPa) a été appliquée comme contrainte normale initiale lors de tous les autres essais (essais à volume constant).

L'ensemble des essais réalisés en monotone pseudo-statique est résumé dans le tableau 6.1 ci-dessous. Les résultats de ces essais sont présentés dans la section 6.

5.3 PRINCIPE DES ESSAIS CYCLIQUES

Pour étudier le comportement de l'interface calcarénite-coulis sous cisaillement cyclique et axial, 14 échantillons calcarénite-coulis ont été soumis au cisaillement cyclique. Parmi ces essais, quatre (F3, F4, F6 et F7) ont été menés à déplacements relatifs tangentiels contrôlés tandis que les 10 autres ont été réalisés à seuils de contrainte de cisaillement imposés. Tous ces essais cycliques ont été réalisés à volume constant et sous une contrainte normale initiale de 300 kPa (tableau 6.2).

Les cycles réalisés à seuils en contrainte de cisaillement imposés ont été appliqués de manière à ce que l'amplitude des forces de cisaillement oscille autour d'une valeur moyenne appelée F_{ave} . Les oscillations se font d'une valeur minimum F_{min} à une valeur maximum F_{max} correspondant à un pourcentage de la force de cisaillement obtenu en essai monotone pseudo-statique (volume constant), soit $F_{y\ monot}$. Ainsi, deux séries d'essais symétriques et asymétriques ont été réalisés.

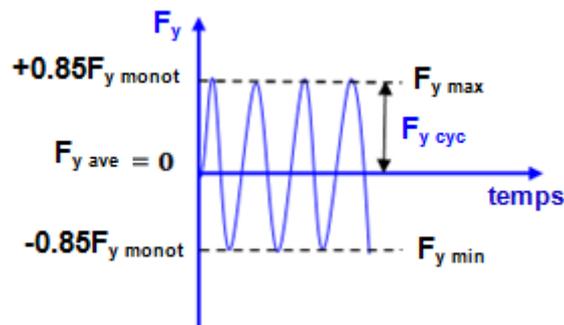


Figure 5.2 : Exemple de l'oscillation cyclique imposée pour un essai cyclique symétrique à niveau de force de cisaillement variant entre -85% et +85% de $F_{y\ monot}$.

Un grand cycle final (à grand déplacement relatif tangential imposé) est appliqué à la fin des essais cycliques en vue de déterminer l'amplitude de contraintes normale et de cisaillement susceptibles d'être mobilisée après le passage des cycles.

Les essais cycliques F3, F4, F6 et F7 réalisés à déplacements relatifs tangentiels contrôlés ont été menés avec l'idée de déterminer le mode opératoire et la conduite de la machine de cisaillement qui étaient adéquats pour la réalisation des essais cycliques. Il faut signaler ici que ces essais sont les premiers essais cycliques réalisés sur la BCR3D du Laboratoire 3SR de Grenoble.

Tableau 6.1 : Récapitulation des essais « monotones » (pseudo-statiques).

ESSAI			INPUT		OUTPUT				OBSERVATIONS	
Nom	Condition limite	Mode opératoire	Déplacements relatifs tangentiels imposés (mm)	Contrainte normale initiale imposée (MPa)	Contrainte de cisaillement max mobilisée (MPa)	Contrainte de cisaillement à la fin d'essai (MPa)	Contrainte normale max mobilisée (MPa)	Contrainte normale à la fin d'essai (MPa)	Angle de frottement au pic ($\phi_{pic.}$)	Angle de frottement résiduel ($\phi_{res.}$)
F₁	C.N.C. – monotone	Déplacements relatifs tangentiels contrôlés	-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6 ...	300kPa	0,57	0,22	-----	-----	-----	-----
F₂	V.C. – monotone				3	0,5	2,70	0,5	62°	42°
F₁₂	V.C. – monotone (lisse)				1,70	0,02	1,31	0,005	60°	45°
F₁₃	V.C. – monotone(+cyclique)				3,10	0,1	3,70	0	45°	43°

Tableau 6.2 : Récapitulation des essais cycliques (pseudo-statiques).

ESSAI			INPUT		OUTPUT			OBSERVATION		
Nom	Type	Mode opératoire	Déplacements relatif tangentiel imposés (mm)	Contrainte normale initiale imposée (MPa)	Seuils en force de cisaillement imposés		Nombre de cycles réalisé	Contrainte normale max mobilisée après passage des cycles (MPa)	Angle de frottement palier positif ($\phi_{res.}$)	Angle de frottement palier négatif ($\phi_{res.}$)
					F _{min}	F _{max}				
F3	V.C. - cyclique	Déplacements relatifs tangentiels contrôlés	-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6 ...	300kPa	-----	-----	02	-----	34°	53°
F4	V.C. - cyclique				-----	-----	-----	-----	-----	-----
F6	V.C. - cyclique				-----	-----	03	0,94	46°	46°
F7	V.C. - cyclique				-----	-----	02	0,026	45°	52°
F5	V.C. - cyclique	Seuils en forces de cisaillement contrôlés	-----	300kPa	0	+0.35 F _{y monot}	60	-----	-----	-----
F8	V.C. - cyclique		-----		-0.40 F _{y monot}	+0.40 F _{y monot}	64	0,017	49°	43°
F9	V.C. - cyclique		-----		-0.85 F _{y monot}	+0.85 F _{y monot}	30	-----	45°	45°
F10	V.C. - cyclique		-----		-0.70 F _{y monot}	+0.70 F _{y monot}	113	3	45°	34°
F11	V.C. - cyclique		-----		+0.35 F _{y monot}	+0.85 F _{y monot}	10	0	45°	34°
F14	V.C. - cyclique		-----		-0.55 F _{y monot}	+0.55 F _{y monot}	209	2,4	49°	49°
F15	V.C. - cyclique		-----		-0.30 F _{y monot}	+0.80 F _{y monot}	1	0,16	47°	-----
F16	V.C. - cyclique		-----		0	+0.55 F _{y monot}	1500	0,05	37°	-----

N.B : La force de cisaillement maxima déduite des essais monotones à volume constant (F₂ et F₁₃) , F_{y monot} vaut 23,6 kN

6 RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS

6.1 CALCARENITE LISSE - COULIS [VC] : ESSAI F12

Cet essai a été réalisé en vue de déterminer la résistance au cisaillement de l'interface lisse et d'en déduire la contribution des aspérités (dents de scie créées par rainurage sur la surface de la calcarénite) à la résistance au cisaillement de l'interface.

Cet essai mené à seuils de déplacements relatifs tangentiels imposés et contrôlés ($\pm 6\text{mm}$) [voir figure 6.1.a] et à volume constant a produit une contrainte normale maximale de 1.31MPa et une contrainte de cisaillement de 1.70MPa (points D et D' respectivement sur la figure 6.1.b et 6.1.c).

Avant le démarrage du cisaillement proprement dit, la contrainte normale initiale (300kPa) est appliquée sur l'axe vertical (l'axe Z de la BCR3D). Cette phase de chargement en contrainte normale correspond à la première montée (jusqu'au point B) de la courbe d'évolution de contrainte normale sur la figure 6.1.b.

Au démarrage du cisaillement de l'interface, la contrainte normale augmente, accompagnée d'une augmentation de la contrainte de cisaillement.

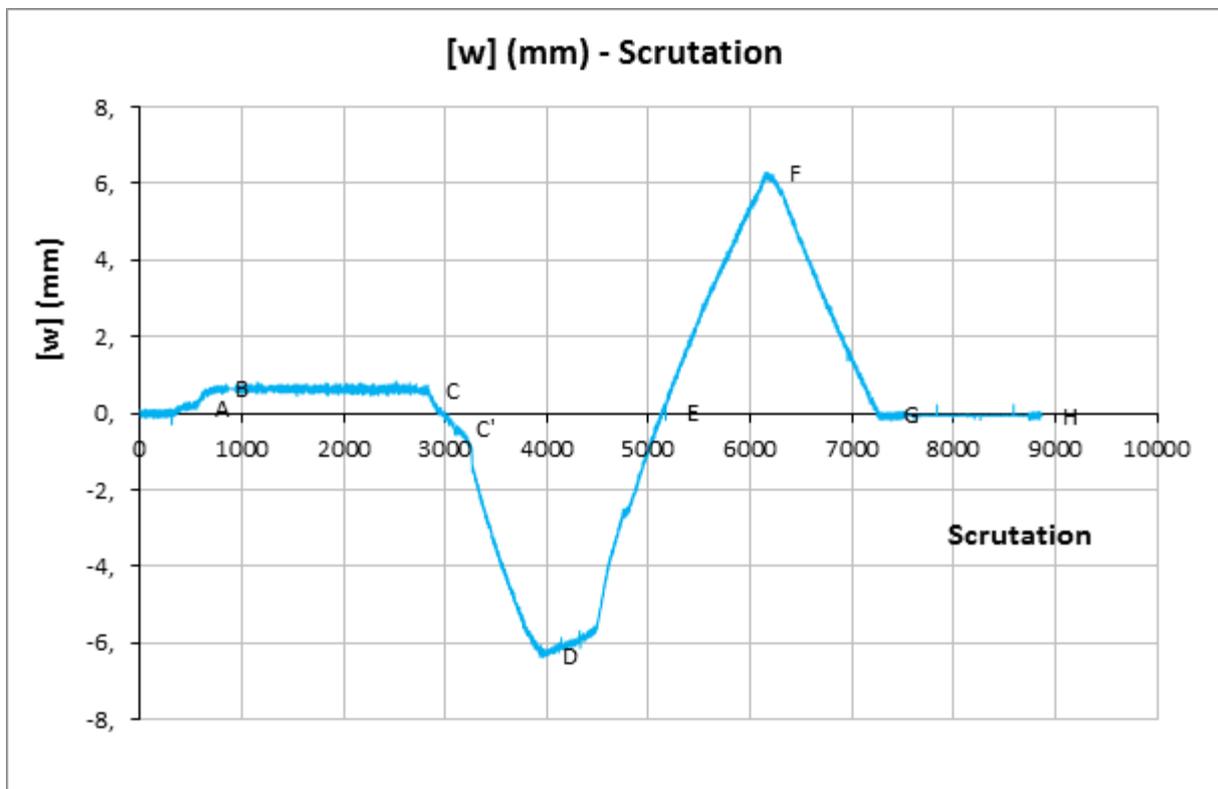


Figure 6.1.a : F12, Déplacements tangentiels imposés en cours d'essai.

A une contrainte de cisaillement de 1,26 MPa et une contrainte normale de 0,8 MPa, l'interface se décolle (point C'). Ce phénomène se traduit par un bruit sec produit par la rupture de l'adhérence du joint. Cette rupture est accompagnée par une chute des contraintes sur les courbes de contraintes présentées (figure 6.1.b à 6.1.e). Le deuxième pic observé sur les courbes de contraintes (points D et D') correspond probablement au frottement des particules extraites et roulées les unes sur les autres pendant et juste après la rupture, avant leur broyage.

Au cours du cisaillement, les particules s'écrasent fortement, ce qui provoque la chute des contraintes observée sur l'interface. Cette chute intervient à partir du point E'. Aux points F, G, et H, les contraintes sont quasiment nulles.

En observant les chemins de contraintes (Figure 6.1.e), on constate un angle de frottement de pic de 60° et un angle de frottement résiduel de 45°.

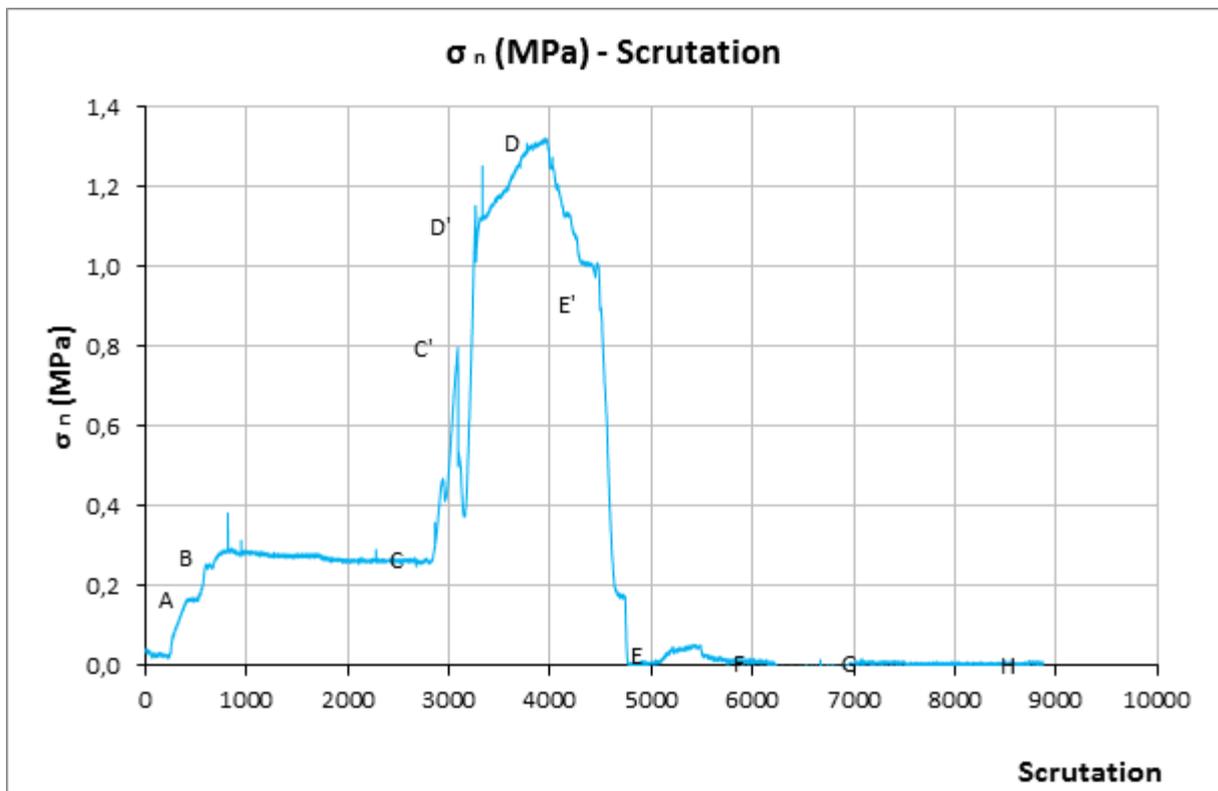


Figure 6.1.b : F12, contrainte normale au cours de l'essai.

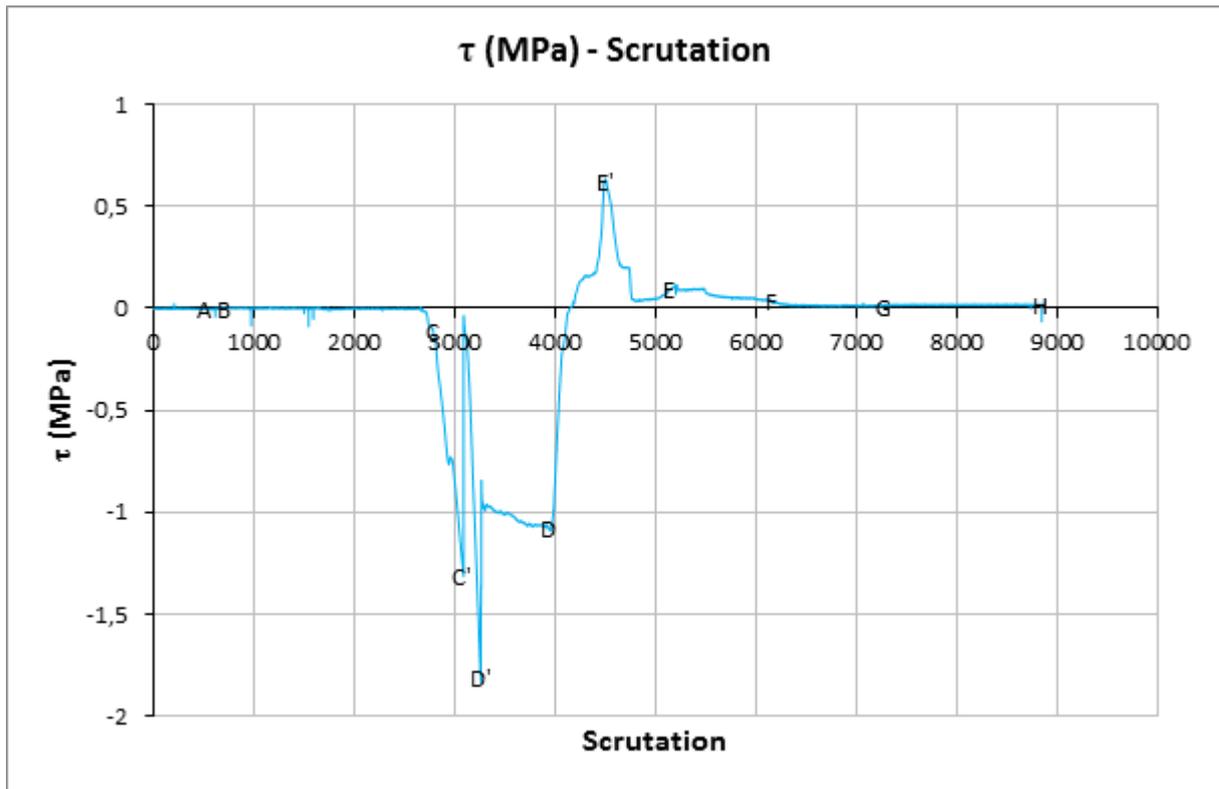


Figure 6.1.c : F12, Contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

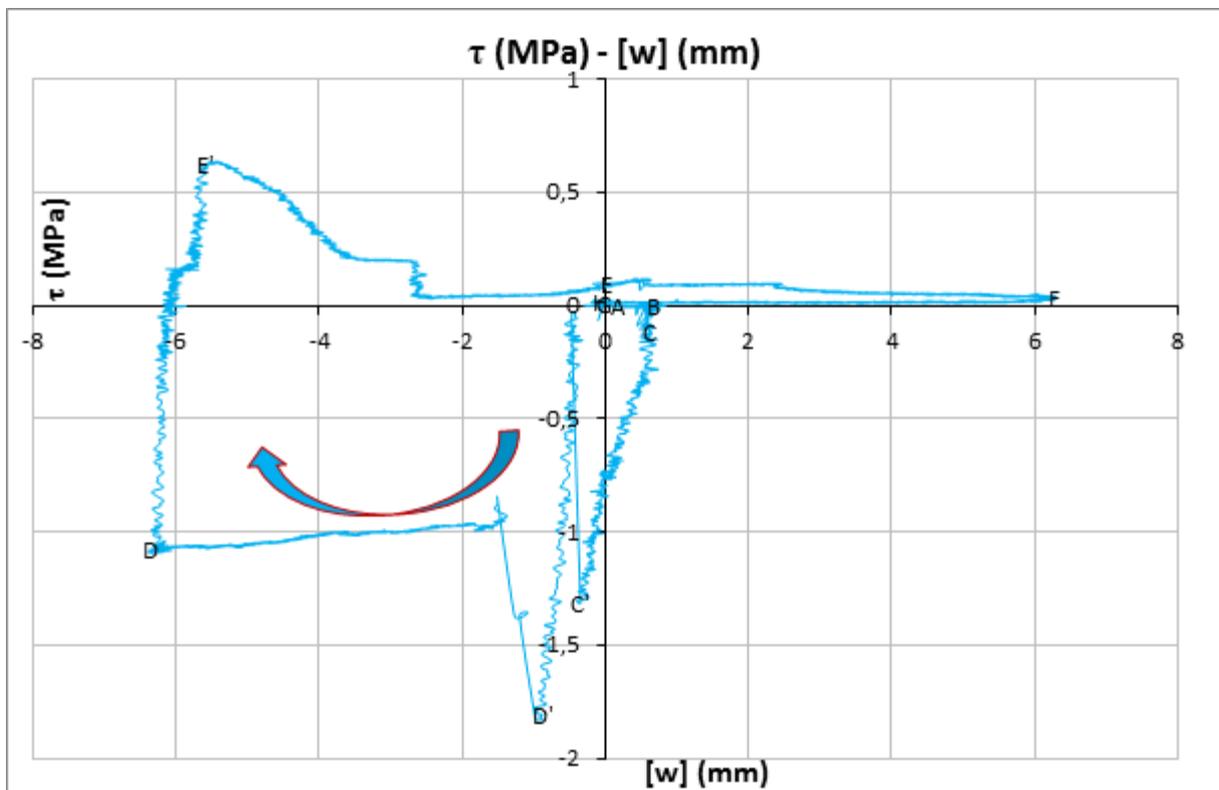


Figure 6.1.d : F12, Mobilisation du cisaillement au cours de l'essai.

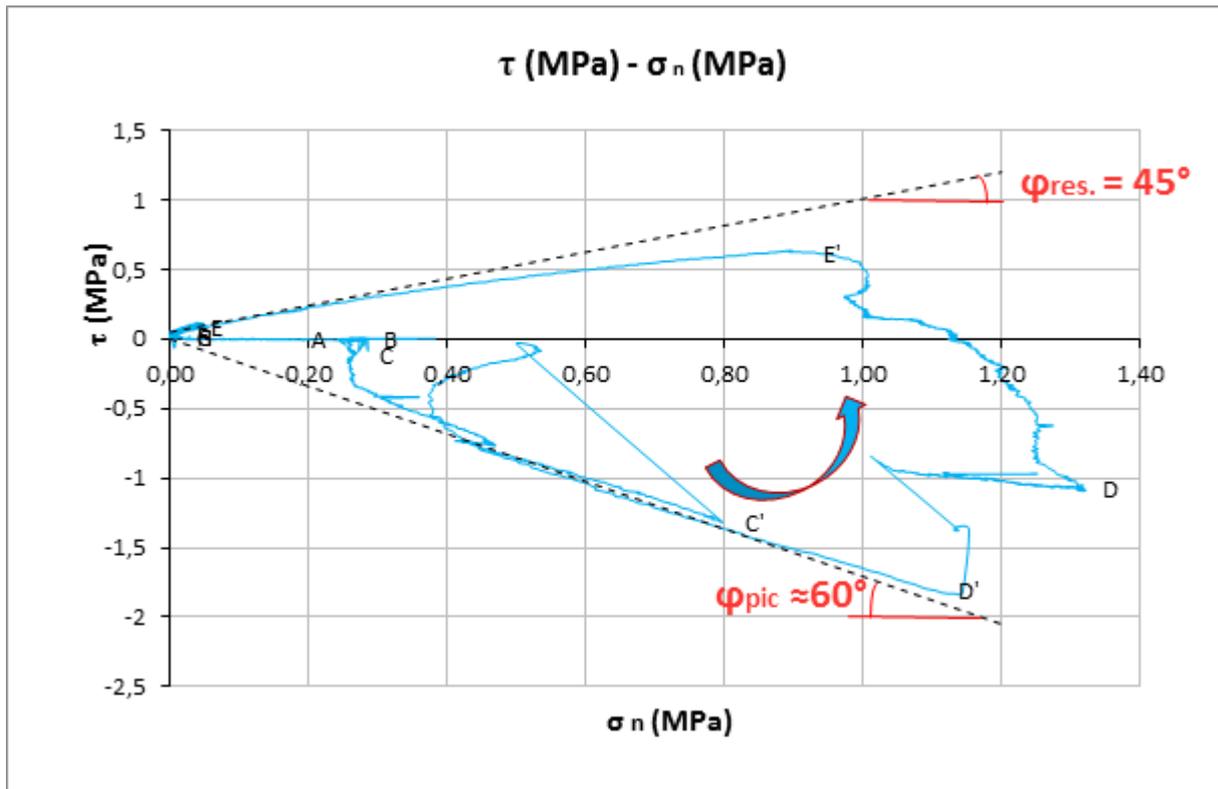


Figure 6.1.e : F12, Chemin de contraintes au cours de l'essai. Echelles horizontale et verticale différentes.

6.2 CALCARENITE RAINUREE-COULIS [CNC]: ESSAI F₁

Réalisé sous une contrainte normale imposée constante de 300kPa et à seuils de déplacement relatifs tangentiels imposés, cet essai permet librement le déplacement relatif normal entre épontes, sous réserve de conserver la contrainte normale constante.

Le déplacement relatif tangential imposé fait l'objet de la figure 6.2.a, tandis que le déplacement relatif normal est présenté figure 6.2.b. On observe les phases suivantes :

Phase 0 : la contrainte normale initiale est appliquée sur l'interface. Cette contrainte reste constante pendant tout l'essai.

Phase 0-A: Cette phase correspond à la phase initiale du cisaillement. Au début du cisaillement, l'interface est sollicitée en cisaillement. Les déplacements relatifs sont plus ou moins élastiques et la résistance aux forces de cisaillement est fournie par l'adhérence du joint. L'application des contraintes de cisaillement induit une réponse contractante (Figure 6.2.c) et raide (Figure 6.2.d) de l'interface. Pendant cette phase de cisaillement, la contrainte de cisaillement augmente jusqu'à la rupture de l'adhérence de l'interface. La rupture de l'adhérence de l'interface semble intervenir au point A, à une contrainte de cisaillement $\tau = 0.07 \text{ MPa}$ et à un déplacement relatif tangential de 0.05mm (Figures 6.2.c et Figure 6.2.d).

Phase A-A': La rupture de l'interface qui se produit au point A provoque le décollage du joint. Des particules « cassées » produites par cette rupture s'écrasent et provoquent de plus une contraction et une légère baisse de raideur sur l'interface juste après le point A (Figure 6.2.c et Figure 6.2.d). Cette baisse de raideur est rapidement limitée par la pente des aspérités triangulaires.

Phase A'-C : L'interface étant décollée, les deux parties de l'interface frottent l'une contre l'autre au cours du cisaillement. Les dents triangulaires sur la moitié supérieure tendent à glisser sur la pente des aspérités de la partie inférieure de l'interface. Le passage le long des aspérités initie un déplacement vertical de l'interface et provoque ainsi le phénomène de dilatation sur l'interface. L'augmentation du déplacement relatif tangentiel, $[w]$, produit une augmentation de volume de l'interface (déplacement vertical). La contrainte de cisaillement se voit donc maintenue à une valeur quasi-constante jusqu'au passage des sommets (en G) des dents d'aspérités. Une contrainte de cisaillement de 0,57MPa est enregistrée à ce moment pour un déplacement relatif tangentiel de 4mm.

Phase C-D : Cette partie correspond à la descente le long des dents d'aspérités après leur passage aux sommets. Cette descente provoque une réponse contractante de l'interface et une chute de la contrainte de cisaillement. Au point D, les contraintes de cisaillement restent quasiment stables à une valeur de 0,30MPa. Cette valeur est supposée représenter la contrainte résiduelle en statique pour ce type de cisaillement (CNC).

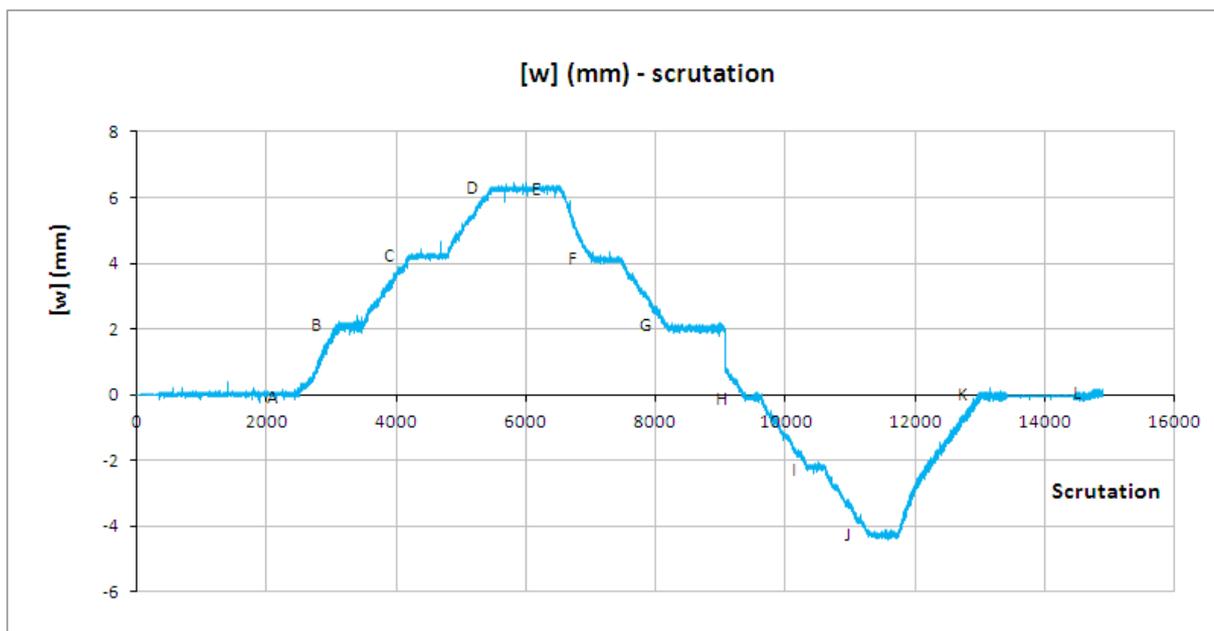


Figure 6.2.a : F1, Déplacements relatifs tangentiels imposés au cours de l'essai.

Phase E-F-G-G'.....K : En changeant la direction de déplacement relatif tangentiel, $[w]$, le comportement décrit dans les phases est observé dans le sens opposé mais les amplitudes de déplacement relatif normal, $[u]$, observées sont légèrement inférieures à celles observées dans les

phases précédentes (usure des dents et hystérésis). Les contraintes de cisaillement sont également inférieures à celles obtenues précédemment. Cette dégradation des propriétés mécaniques de l'interface est très probablement due à un mécanisme de « cassure et écrasement » progressif des particules de calcarénite sur l'interface au cours du cisaillement. Ainsi au point K, la contrainte de cisaillement résiduelle mesurée est de 0.22MPa.

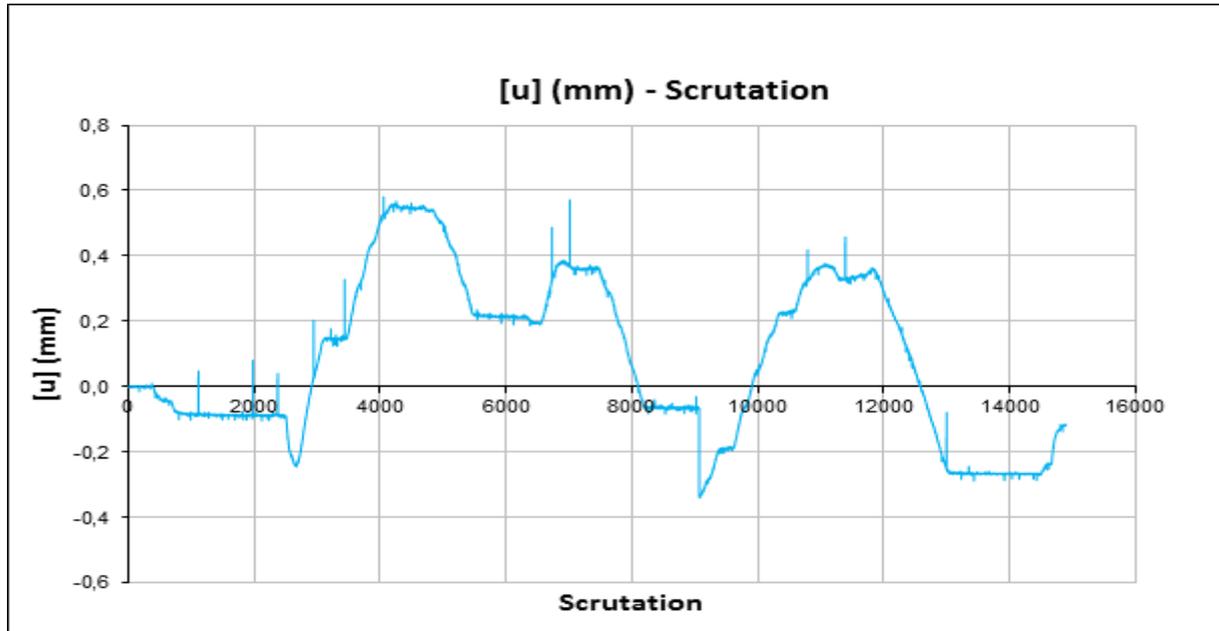


Figure 6.2.b : F1, Déplacement relatif normal au cours de l'essai.

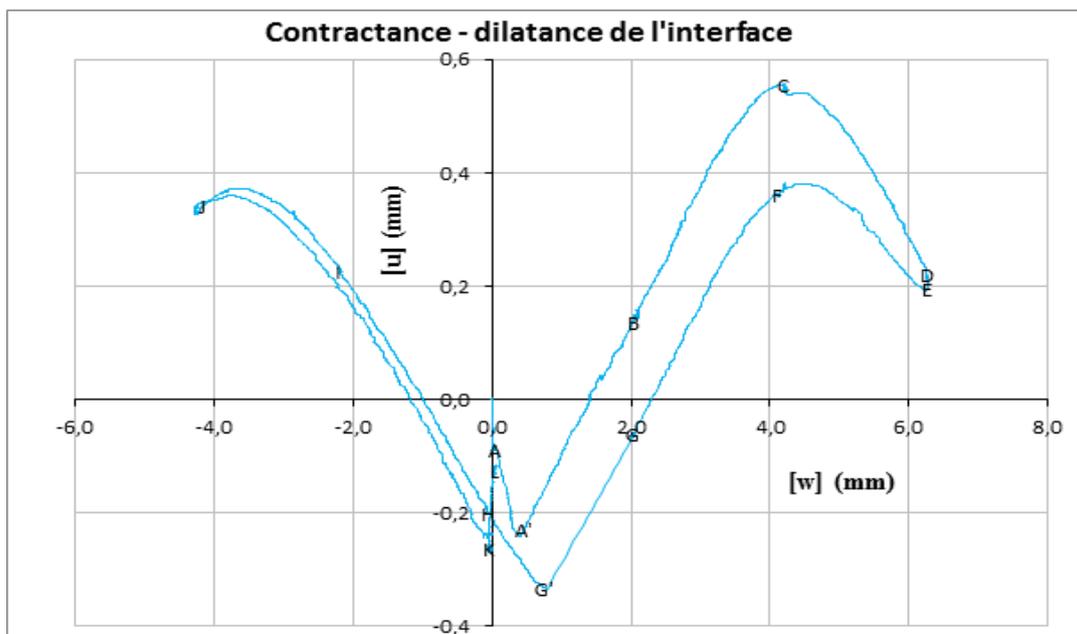


Figure 6.2.c : F1, Mobilisation du déplacement relatif au cours de l'essai.

Phase K-L-0 : Au point K, le cisaillement est stoppé. La phase K-L-0 correspond au déchargement de la contrainte normale imposée depuis le début de l'essai.

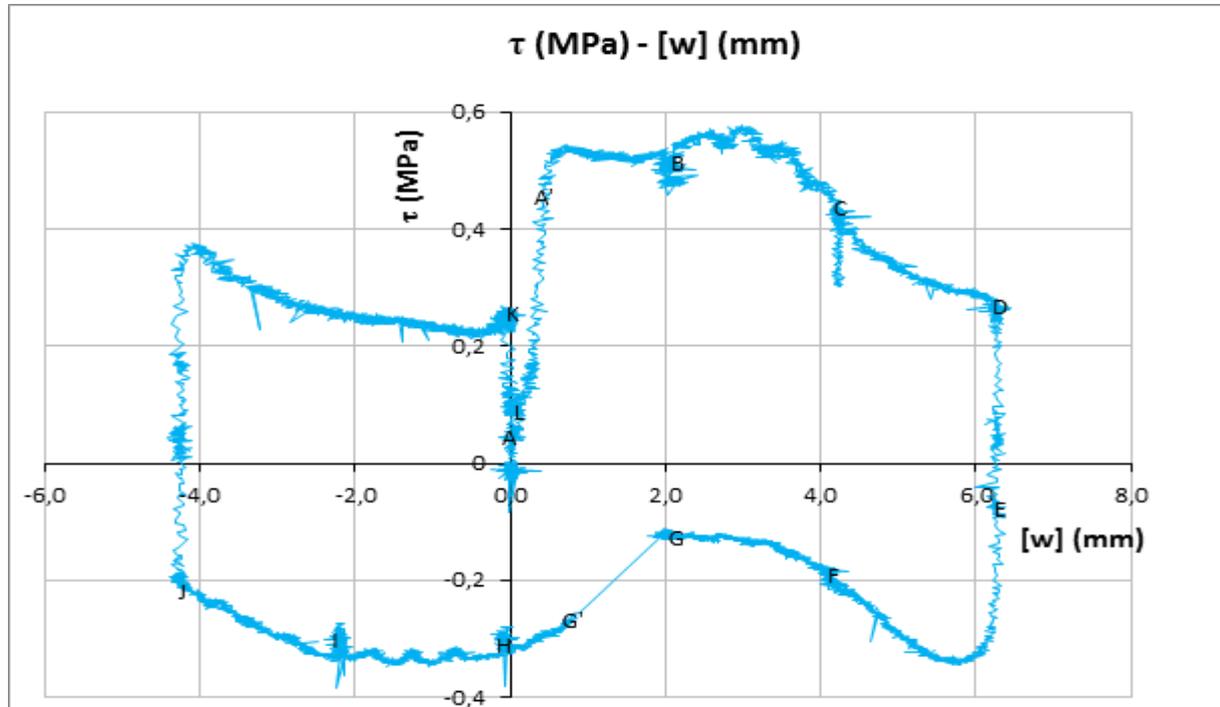


Figure 6.2.d : F1, Mobilisation du cisaillement (frottement) au cours de l'essai.

6.3 CALCARENITE RAINUREE- COULIS (VC)

Contrairement à l'essai précédent (F1, CNC, figures 6.2.a à 6.2.c) dans lequel le déplacement relatif normal était autorisé, sous réserve de contrainte normale constante, les essais qui suivent, à volume constant, ne permettent aucun déplacement relatif normal entre épontes de l'interface.

La rupture du joint permet aux aspérités de l'interface la « liberté » de se déplacer l'un contre l'autre. Les déplacements de dents (aspérités) provoquent une tendance à la dilatation de l'interface. Mais ce phénomène est restreint par la condition limite (Volume Constant) imposée pendant l'essai. L'interface étant bloquée de tout changement de volume (déplacement vertical), le phénomène provoquant la dilatation est compensé par une augmentation de la contrainte normale et de cisaillement sur l'interface. A une certaine amplitude des contraintes, la résistance de la calcarénite au cisaillement est atteinte et elle finit par se casser. La rupture de la calcarénite crée des particules qui s'écrasent au cours du cisaillement. En s'écrasant, l'interface tend à diminuer en volume (contraction), mais compte tenu de la condition de non changement de volume, la tendance à la contraction est immédiatement compensée par une baisse des contraintes sur l'interface.

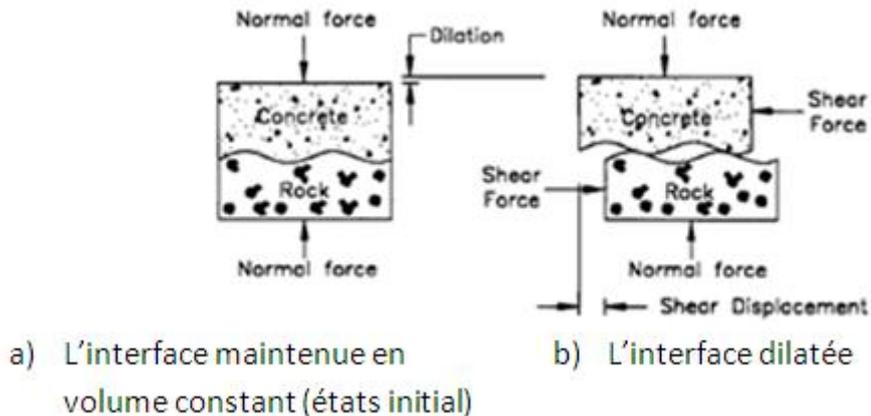


Figure 6.3.0 : Comportement de l'interface coulis-roche selon les conditions limite (VC ou CNC)

6.3.1 ESSAIS « MONOTONES » [VC] A SEUILS DE DEPLACEMENT RELATIF TANGENTIEL IMPOSES

6.3.1.1 Essai F2

Cet essai est réalisé en seuils de déplacement relatif tangentiel imposés de l'ordre de 2mm, 4mm, 6mm, 0mm, -6mm, -10mm et puis 0mm comme indiqué par les points A à J sur la figure 6.3.1.a.

Les différentes phases déterminantes de l'essai sont décrites ci-dessous :

Phase 0-O: Cette phase initiale correspond au chargement en axe vertical de la contrainte normale initiale. Cette contrainte est de l'ordre de 300kPa et, contrairement à l'essai CNC décrit précédemment, la contrainte normale initiale est libre d'évoluer au cours du cisaillement pour les essais en volume constant (Figure 6.3.1.b).

Phase A-B: Le point A correspond au démarrage du cisaillement. Le cisaillement est contrôlé par l'application des seuils de déplacements relatifs tangentiels [w]. Cette phase de cisaillement est obtenue pour un déplacement relatif tangentiel [w] de 2mm (Figure 6.3.1.a). En appliquant le déplacement relatif tangentiel, l'interface est sollicitée en contraintes de cisaillement (Figure 6.3.1.c). Au point B, la résistance limite au cisaillement de la calcarénite est atteinte et l'interface se casse en créant une ligne de rupture dans la surface de la calcarénite. Cette résistance limite est atteinte à un déplacement relatif tangentiel [w] de 2mm, une contrainte normale de 1.6MPa et une contrainte de cisaillement de 2.4MPa (Figures 6.3.1.a - d).

Phase B-C : La rupture de l'interface au point B incite les deux parties de l'interface à glisser l'une contre l'autre jusqu'à engager le passage des sommets des dents. Ce passage provoque une augmentation des contraintes dans l'interface due à la tendance de l'interface à se dilater. Ceci explique la deuxième montée en pic de contrainte observée sur les courbes de contraintes (Point C et B' des Figures 6.3.1.b et 6.3.1.c respectivement). Les pics de contraintes observés à ce stade sont de l'ordre de 2,70MPa en contrainte normale et 3MPa en contrainte de cisaillement. Ces pics interviennent à un déplacement relatif tangentiel [w] de 4mm.

Phase C-D : Cette phase suit le passage des sommets des dents dans l'interface. Une chute des contraintes est observée après le passage des sommets des dents. Cette chute est justifiée par la tendance de l'interface à se contracter pendant la descente des sommets.

Phase E-...-H : A partir du point E, le sens du cisaillement est inversé. Le cisaillement se fait donc suivant la direction opposée aux phases précédant (Figure 6.3.1.a). Pendant cette phase, le passage de sommets des dents génère à nouveau une légère augmentation des contraintes normales, mais l'amplitude des contraintes générées n'atteint plus les pics initialement obtenus. Ceci est dû à la dégradation des propriétés mécaniques de l'interface pendant les phases du cisaillement précédant. La dégradation en propriétés mécaniques de l'interface résulte de l'écrasement des particules « cassées » de calcarénite pendant le cisaillement. La contrainte de cisaillement reste quasiment stable pendant cette phase du cisaillement. Une contrainte normale de 1,3MPa et une contrainte de cisaillement de 1MPa sont mesurées à la fin de cette phase.

Phase H-I : En inversant à nouveau le sens du cisaillement à partir du point H, une chute des contraintes est à nouveau observée. Ainsi une contrainte de cisaillement résiduelle de 0,5MPa et une contrainte normale finale de 0,5MPa sont observées à la fin de cet essai.

Phase I-J : Il s'agit ici d'une phase de déchargement de la contrainte normale en axe vertical.

Remarque : En observant les chemins de contraintes (Figure 6.3.1.e), on observe que la dégradation post-pic des contraintes se fait selon un angle de frottement résiduel $\varphi_{res} = 44^\circ$. La montée pré-pic en contraintes se fait suivant un angle de frottement $\varphi_{pic} = 62^\circ$.

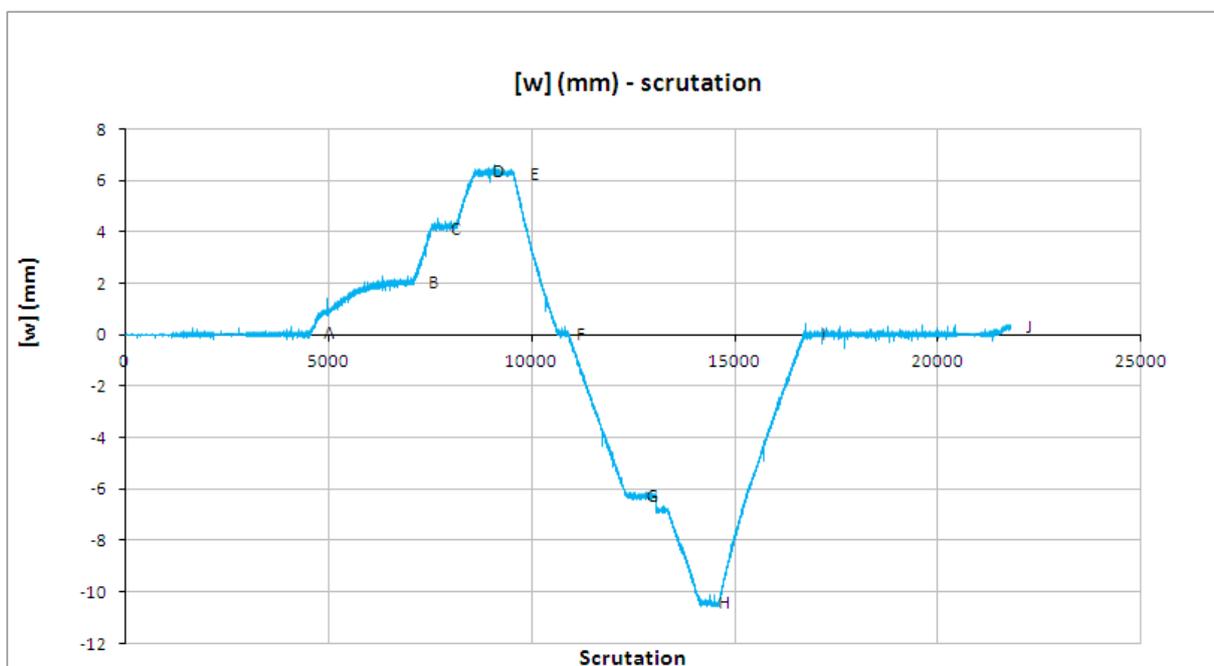


Figure 6.3.1.a : F2, déplacements relatifs tangentiels imposés au cours de l'essai.

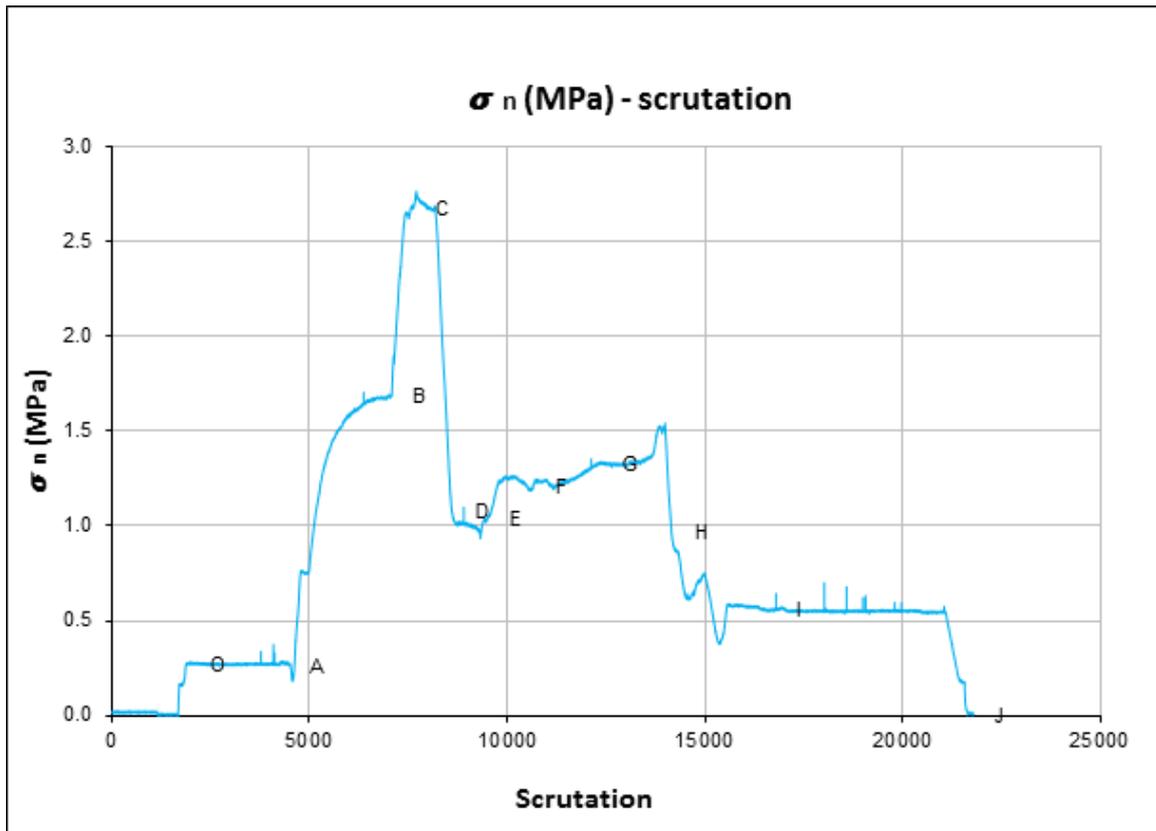


Figure 6.3.1.b : F2, contrainte normale au cours de l'essai.

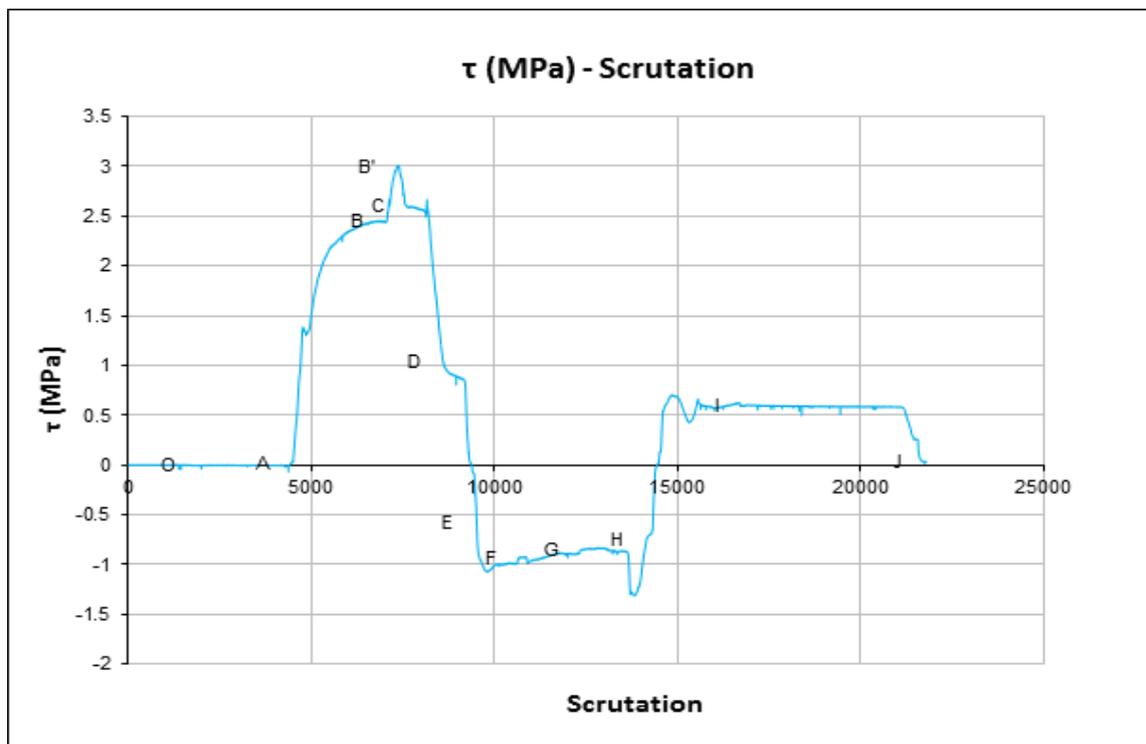


Figure 6.3.1.c : F2, contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

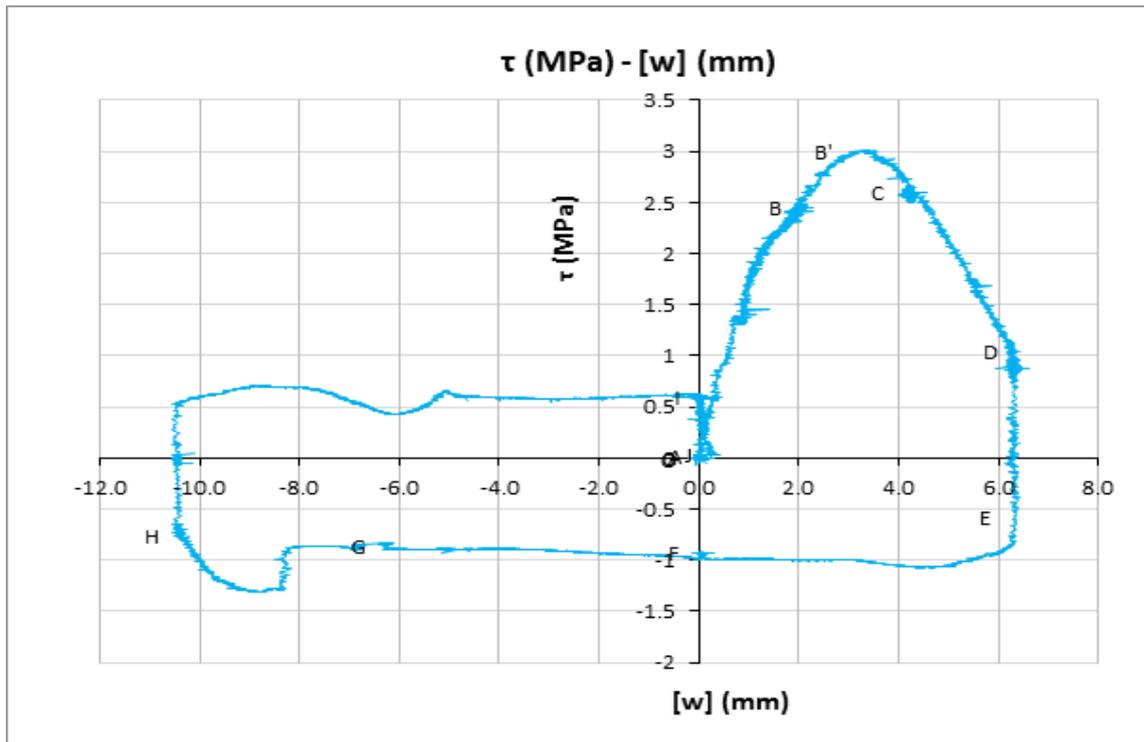


Figure 6.3.1.d : F2, mobilisation du frottement au cours de l'essai.

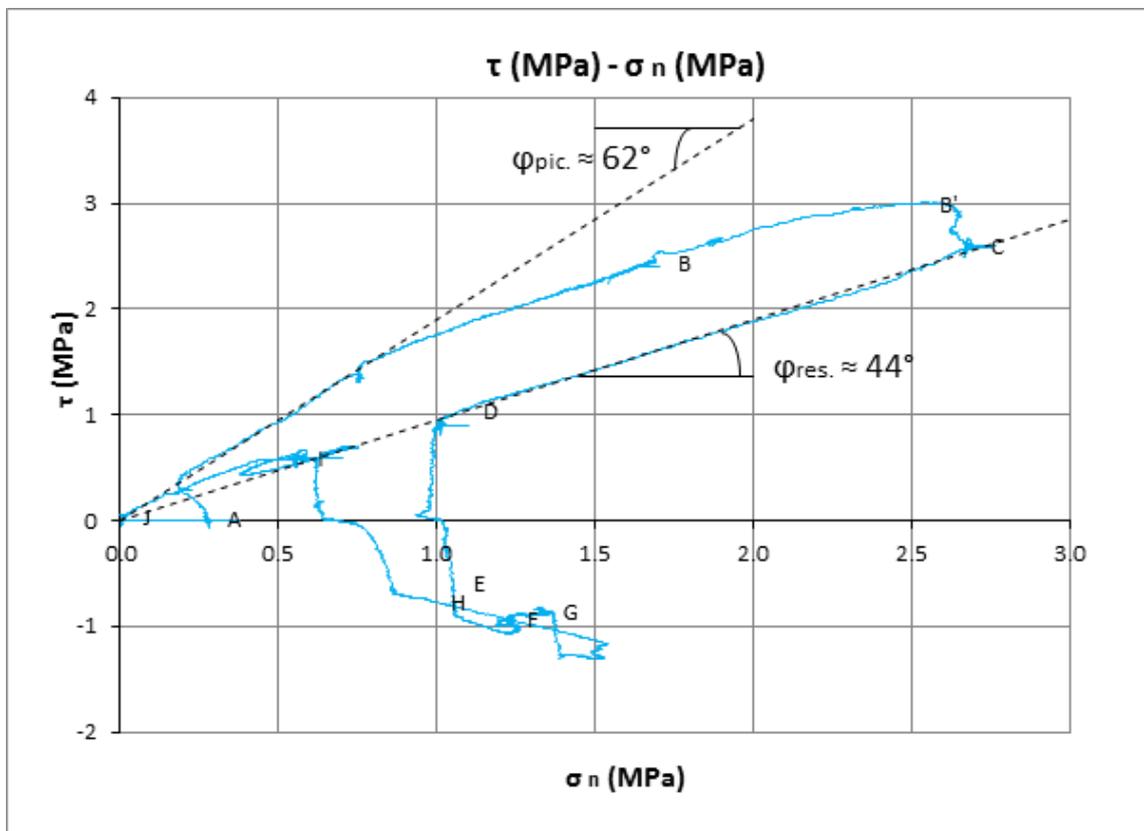


Figure 6.3.1.e: F2, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.1.2 Essai F13

L'objectif de cet essai (F13) est de :

- Confirmer la résistance statique de l'interface au cisaillement en volume constant en comparant le résultat obtenu de cet essai à celui obtenu dans l'essai F2.
- Vérifier éventuellement les impacts de l'hétérogénéité de la calcarénite sur les résultats des essais obtenus en comparant les résultats obtenus à ceux de l'essai F2. La calcarénite utilisée pour cet essai provient d'une carotte et d'un forage différents de celle utilisé pour l'essai F2.
- D'observer soigneusement la dégradation des propriétés mécanique de l'interface post-pic au cours des premiers cycles. Après l'essai monotone, plusieurs cycles à faible déplacement relatif tangentiel [w] contrôlé sont appliqués en vue d'inciter la dégradation progressive des propriétés résiduelles de l'interface.

Pour obtenir ces objectifs, l'essai F13 a été réalisé en seuils de déplacement relatif tangentiel contrôlés suivant les différentes phases de la Figure 6.3.1.f. Les phases pertinentes sont décrites ci-dessous :

Phase 0-O: Phase initiale de chargement de l'axe verticale en contrainte normale initiale

Phase O-A-B-C: Cette phase correspond à l'essai monotone réalisé par l'application d'un « grand cycle » symétrique et alterné. Le cycle est réalisé en appliquant un seuil en déplacement relatif tangentiel [w] de $\pm 10\text{mm}$ (Figure 6.3.1.f). Au cours de cette phase de cisaillement, une contrainte normale maximale de 3.70MPa et une contrainte de cisaillement maximale de 3.10MPa sont observées au point O'. Ces valeurs interviennent pour un déplacement relatif tangentiel de 3mm. En inversant le sens du cisaillement, ces valeurs se dégradent respectivement à 3MPa et 2,50MPa, puis à 1,2MPa et 1MPa au point C lors du prochain changement de direction de cisaillement (Figure 6.3.1.g-i).

Phase C-D-E-F: Cette phase correspond au cisaillement post-rupture réalisé par l'application d'un « cycle moyen » symétrique et alterné. Le cycle est réalisé en appliquant un seuil en déplacement relatif tangentiel [w] de $\pm 6\text{mm}$ (Figure 6.3.1.f). Au cours de cette phase de cisaillement, une contrainte normale maximale de 1,4MPa et une contrainte de cisaillement maximale de 1.4MPa sont observées entre les points C et D. Ces valeurs interviennent pour un déplacement relatif tangentiel de 3mm. En inversant le sens du cisaillement ces valeurs se dégradent fortement (Figure 6.3.1.g à 6.3.1.i). Le pic en contrainte normale observé entre E-F-G est dû à une erreur liée à la chute d'une pièce métallique de la boîte de cisaillement à ce moment de l'essai.

Phase F-G-H: il s'agit de l'application de quatre (4) « petits cycles » symétriques et alternés en seuil de déplacement relatif tangentiel de $\pm 2\text{mm}$. Pendant cette phase du cisaillement les contraintes restent très faibles et proches de zéro.

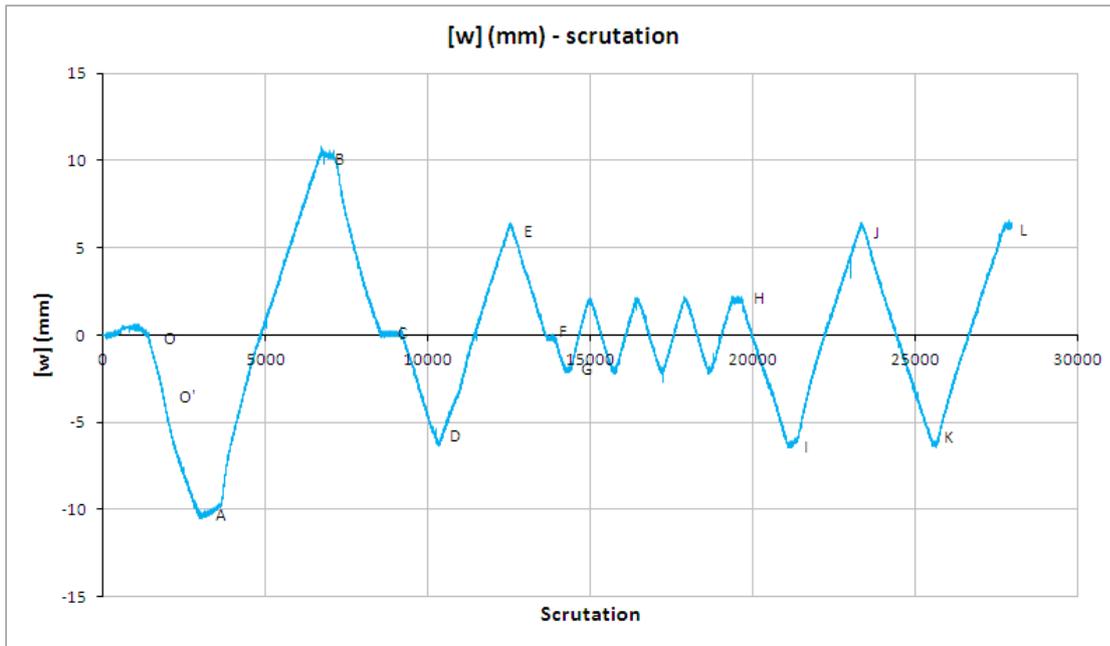


Figure 6.3.1.f : F13, déplacement relatif tangentiel imposé au cours de l'essai.

Phase H-I-J-K-L: il s'agit de l'application de deux (2) « cycles moyens » symétriques et alternés en seuil de déplacement relatif tangentiel de $\pm 6\text{mm}$. Ces cycles sont réalisés en vue d'observer de possibles augmentations en contrainte dans l'interface. Pendant cette phase du cisaillement, les contraintes restent très faibles, stables et proches de zéro. Cette phase de l'essai permet de confirmer la dégradation complète des propriétés mécanique de l'interface.

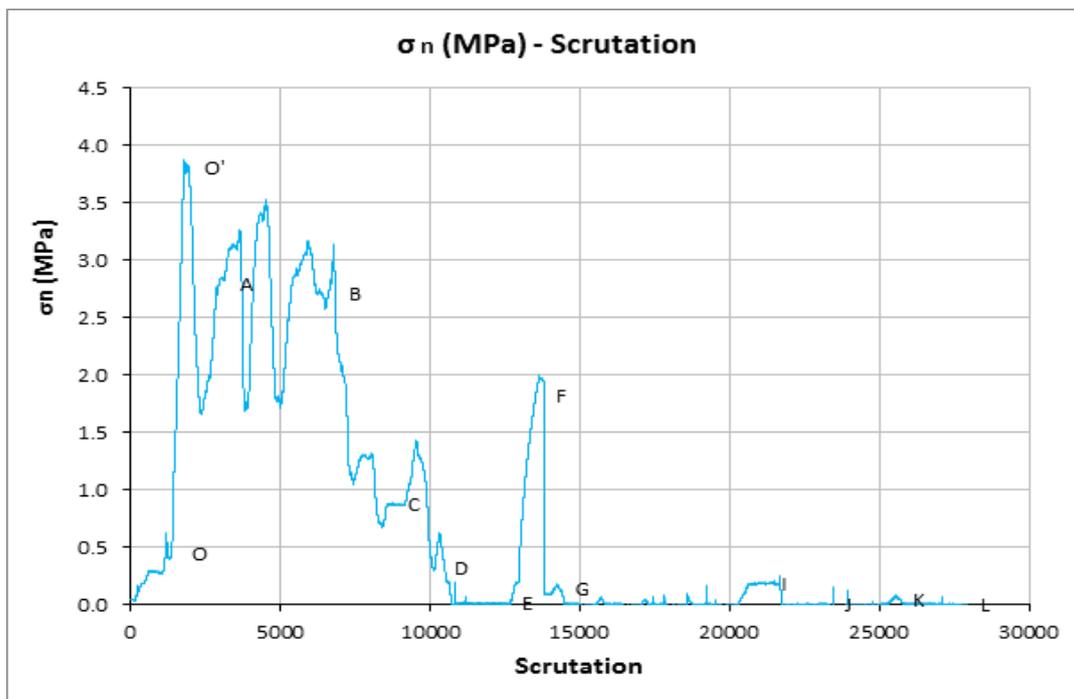


Figure 6.3.1.g : F13, contrainte normale au cours de l'essai.

Remarques :

- En observant les chemins de contraintes (Figure 6.3.1.j), on observe que la dégradation post-pic des contraintes se fait selon un angle de frottement $\varphi_{rés} = 43^\circ$. La montée pré-pic en contraintes se fait suivant un angle de frottement $\varphi_{pic} = 45^\circ$.
- La chute des contraintes au cours du cisaillement est accélérée lors du changement du sens de cisaillement. Les cycles alternés pourraient avoir des effets dévastateurs sur les propriétés mécaniques de l'interface. Les chutes de contraintes sont provoquées par un phénomène de « rasage » progressif des aspérités de l'interface.

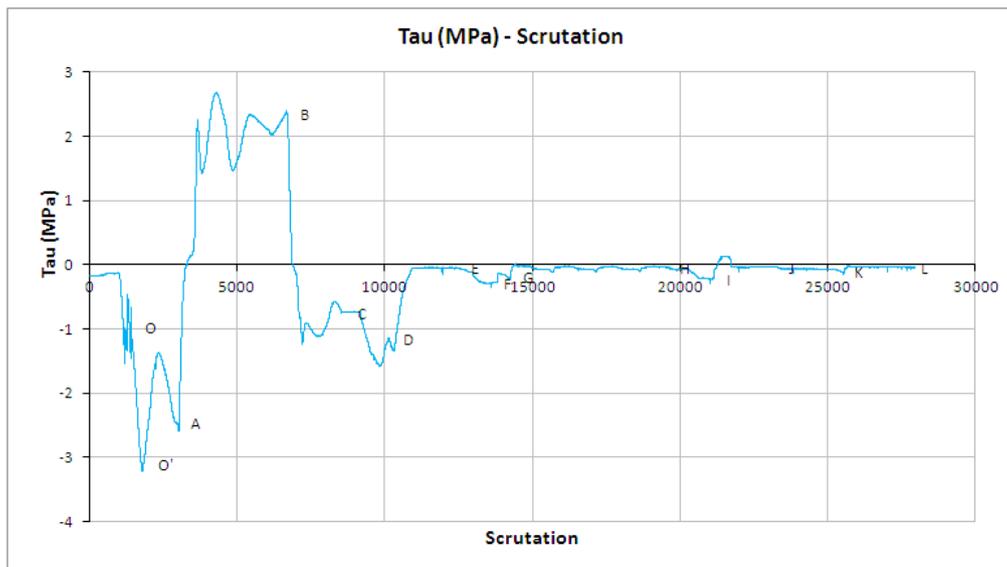


Figure 6.3.1.h : F13, contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

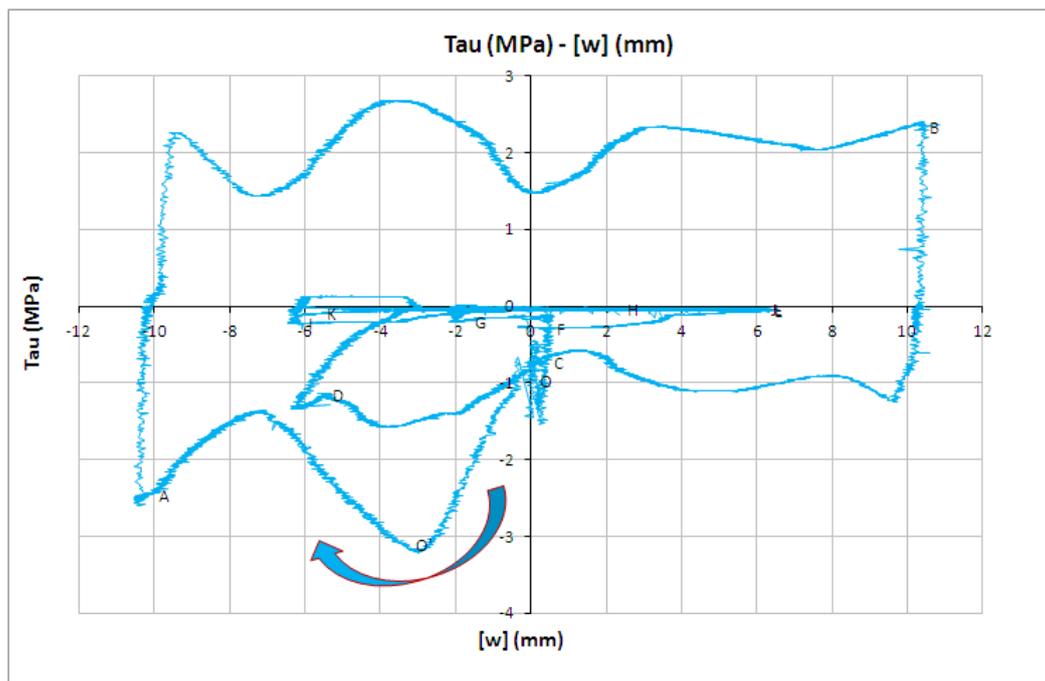


Figure 6.3.1.i : F13, mobilisation du frottement au cours de l'essai.

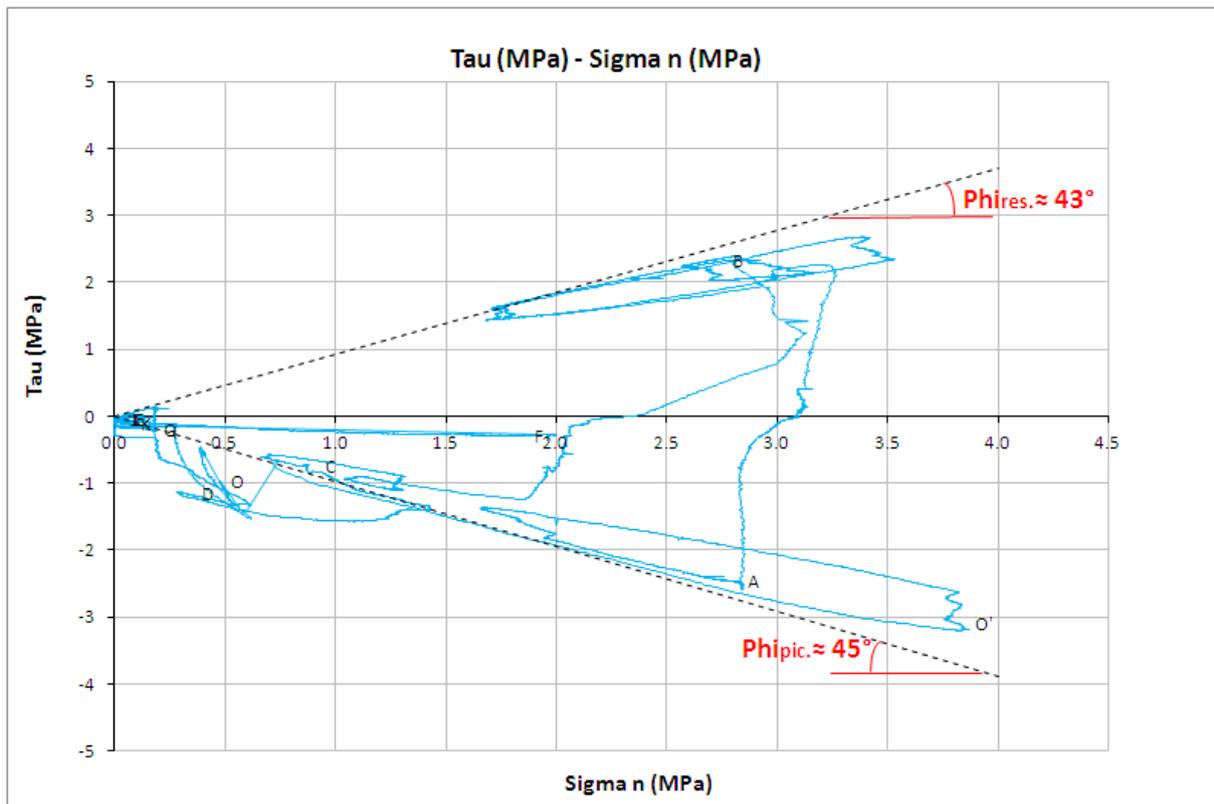


Figure 6.3.1.j : F13, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.2 ESSAIS CYCLIQUES [VC] A SEUILS DE DEPLACEMENT RELATIF TANGENTIEL IMPOSES

Il s'agit des essais F3, F4, F6 et F7.

6.3.2.1 Essai F3

Cet essai a été réalisé dans le but d'appliquer à l'interface des cycles à grandes amplitudes de contrainte de cisaillement. Des seuils de contrainte de cisaillement symétriques, de l'ordre de $\pm 85\%$ de la contrainte de cisaillement de rupture en monotone étaient visés. Cet essai s'est arrêté en cours de cisaillement suite à un dysfonctionnement de l'ordinateur de commande. Malgré l'arrêt prématuré de l'essai, des enseignements peuvent en être tirés. La figure 6.3.2.d illustre l'impossibilité d'obtenir les valeurs extrêmes de contraintes de cisaillement ciblées. Une tentative de description des phases pertinentes de l'essai pourrait être la suivante :

Phase O-A : chargement initial en contrainte normale (300 kPa).

Phase A-K : Cette phase correspond à l'application du premier cycle. Le cisaillement démarre au point A par l'imposition des seuils de déplacement relatif tangentiel [w]. Un seuil en déplacement [w] de $\pm 2,55$ mm est imposé comme condition limite. Il s'agit du déplacement relatif tangentiel pré-calculé

pour obtenir un seuil en contrainte de cisaillement de $\pm 2,55\text{MPa}$ ($\pm 85\%$ de la contrainte de rupture en monotone). Comme illustré sur la figure 6.3.2.d, les seuils de contraintes ciblées ont été observés pour des déplacements relatifs tangentiels inférieurs aux valeurs imposées.

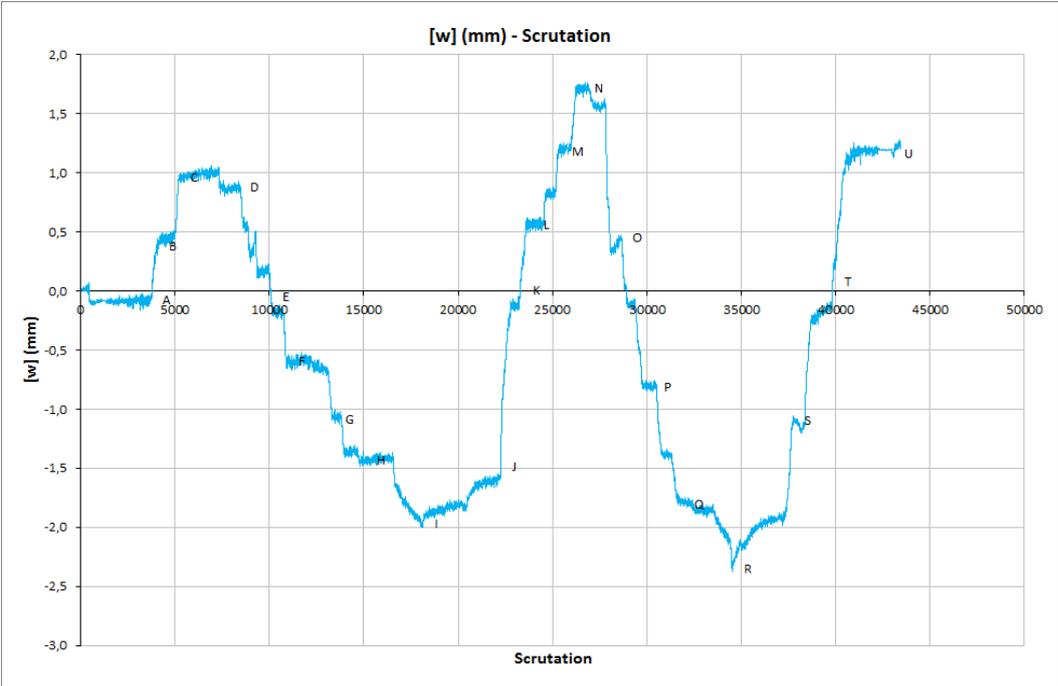


Figure 6.3.2.a : F3, déplacements relatifs tangentiels de imposés au cours de l’essai

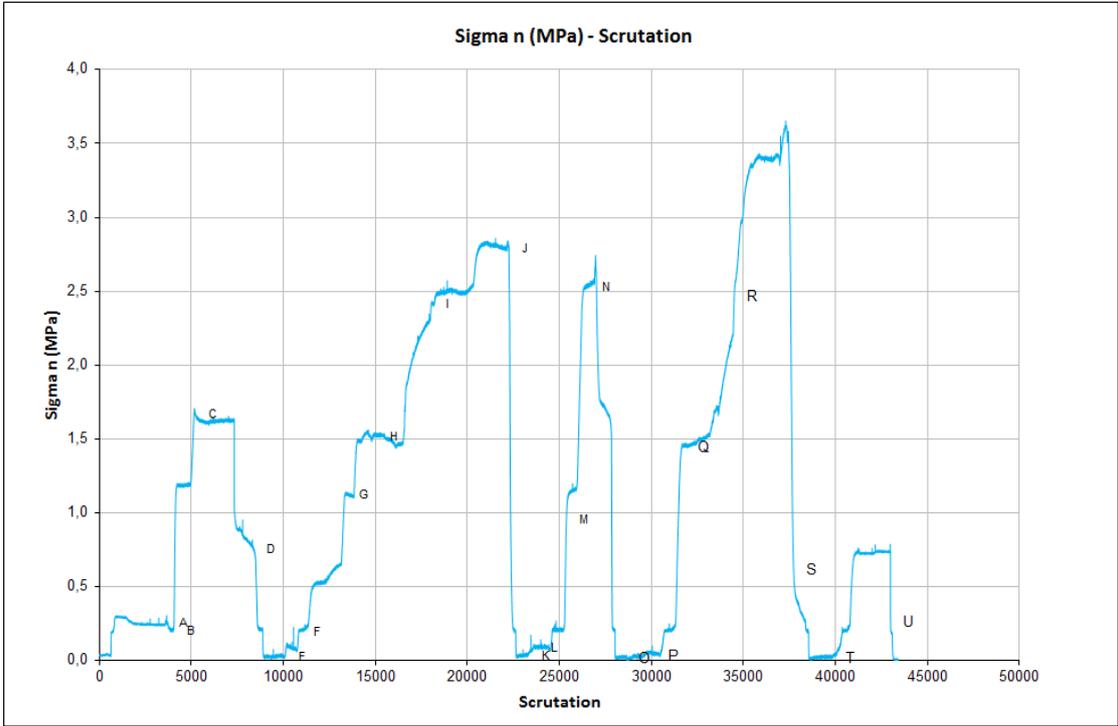


Figure 6.3.2.b : F3, contrainte normale au cours de l’essai

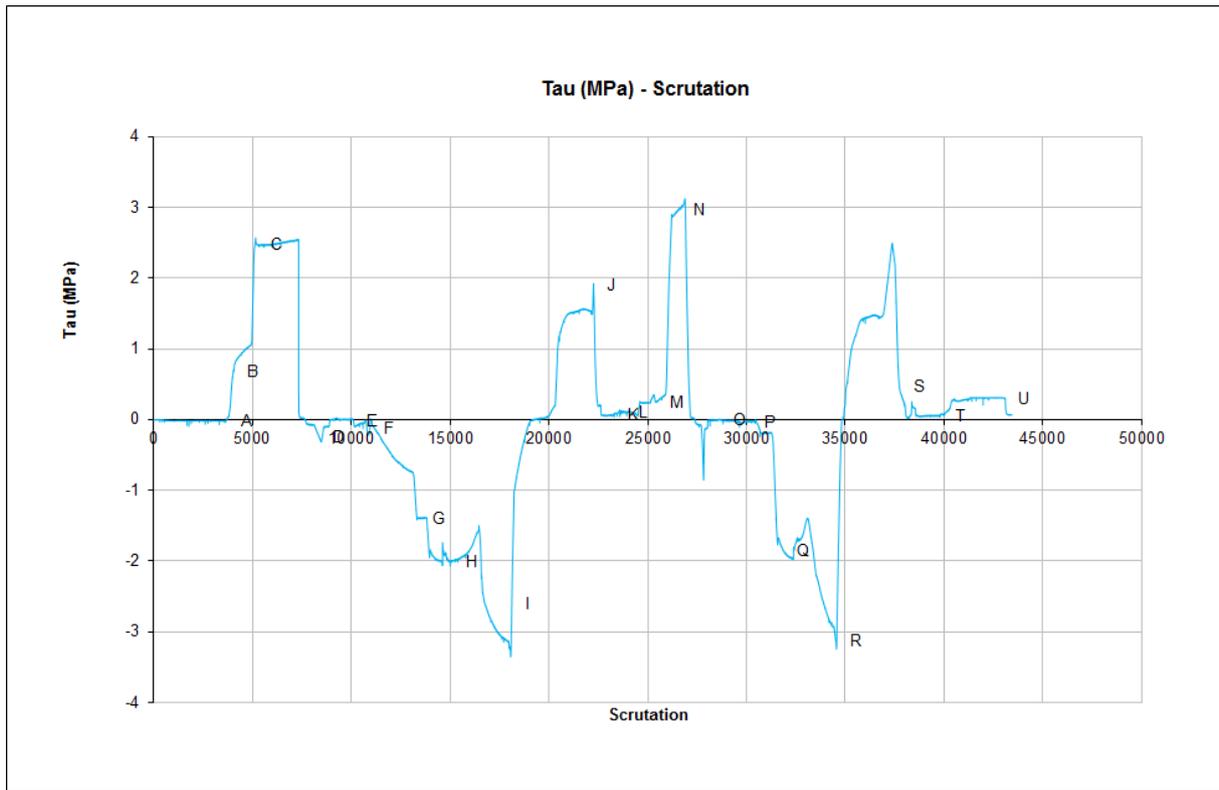


Figure 6.3.2.c : F3, contrainte de cisaillement au cours de l'essai

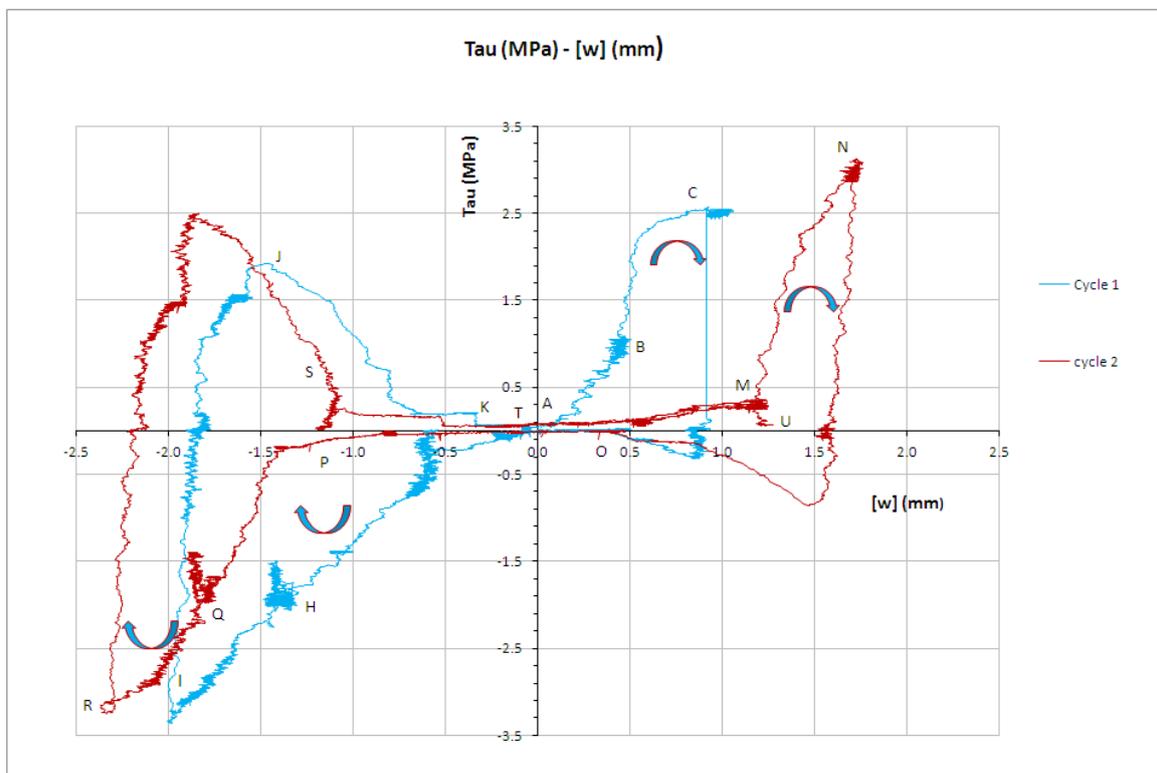


Figure 6.3.2.d : F3, mobilisation du frottement au cours de l'essai

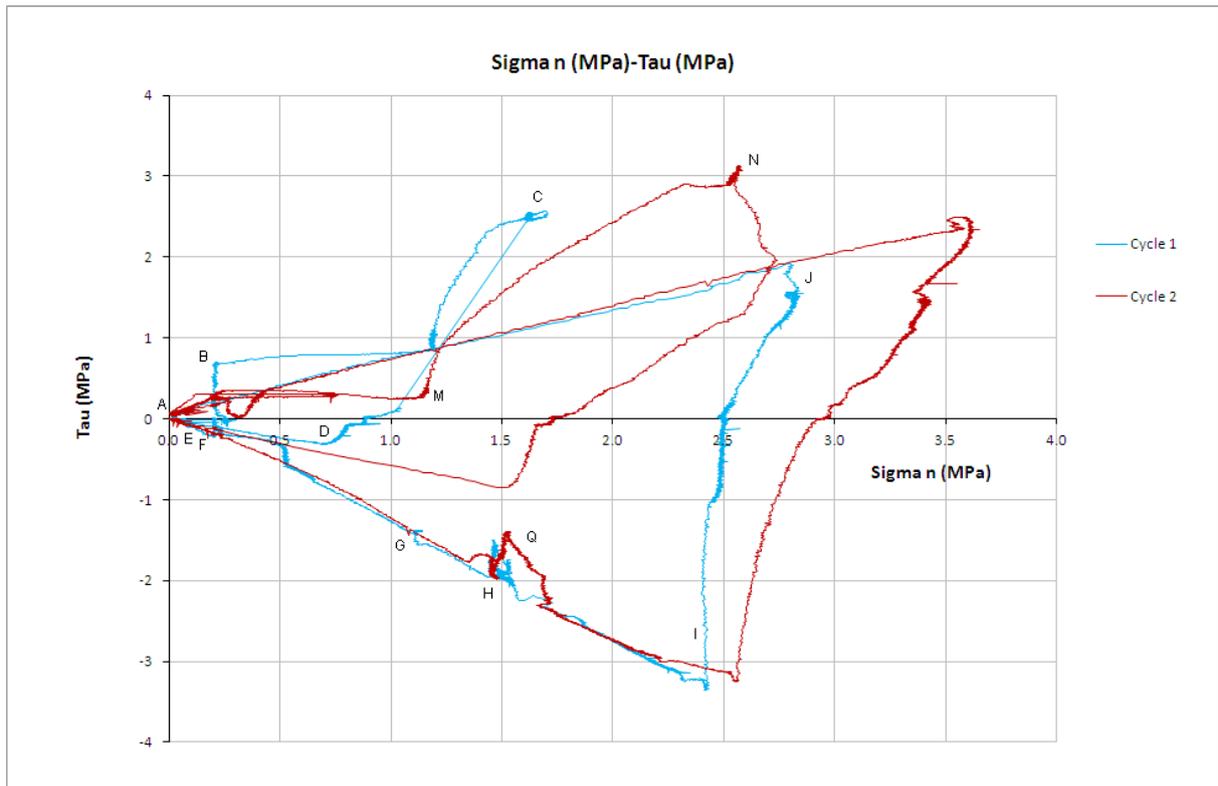


Figure 6.3.2.e : F3, chemin de contraintes au cours de l'essai.

Phase K-T : Il s'agit de l'application du deuxième cycle symétrique alterné. Pour cette phase, les contraintes extrêmes visées sont aussi observées pour des déplacements relatifs tangentiels inférieurs à ceux attendus, mais toutefois supérieurs aux déplacements observés pendant le premier cycle (Figure 6.3.2.d).

Remarques :

- L'essai a été arrêté prématurément suite au mauvais fonctionnement de l'unité de commande.
- Une comparaison des déplacements relatifs tangentiels $[w]$ auxquels interviennent les contraintes de cisaillement maxima visées, au cours de deux cycles appliqués, démontre à la fois une rigidité supérieure, et une mobilisation du frottement plus rapide que lors du cisaillement monotone.
- Il est difficile d'obtenir les seuils de contraintes ciblés par un pilotage de l'essai en déplacements contrôlés.
- On doit admettre l'existence d'une hétérogénéité importante entre les échantillons prélevés dans une même carotte.

Après l'arrêt accidentel de l'essai F3, et afin de vérifier les conclusions découlant de cet essai, d'autres échantillons (F4, F6 et F7) ont été soumis au même type de cisaillement cyclique à déplacements relatifs tangentiels contrôlés.

6.3.2.2 Essai F4

Il s'agit toujours d'un cisaillement à volume constant (VC), contrôlé en déplacement relatif tangential, pour un très petit nombre de cycles. L'idée était ici d'imposer à l'interface calcarénite coulis, une série croissante de cycles pseudo-symétriques (c'est-à-dire alternativement positifs et négatifs en cisaillement, et d'amplitude croissante). Cet essai n'a pas très bien fonctionné, car l'asservissement du déplacement relatif normal, devant être maintenu constant après application de la contrainte normale initiale (300 kPa), n'a pas été complètement satisfaisant. Néanmoins, des enseignements intéressants sont visibles quant aux tous premiers cycles. La figure 6.3.2.f donne les étapes successives de cette sollicitation en termes de pic de cisaillement : 0,4MPa (13 % de $\tau_{maxstat VC}$), -0,7MPa (-23 % de $\tau_{maxstat VC}$), et 1,0 MPa (33 % de $\tau_{maxstat VC}$). La figure 6.3.2.g donne le résultat en contrainte normale. Les pics de celle-ci sont croissants : 0,65MPa (24 % de $\sigma_{n maxstat VC}$), 0,9MPa(33 % de $\sigma_{n maxstat VC}$), et 1,0MPa (37 % de $\sigma_{n maxstat VC}$). Le déplacement relatif tangential est curieusement très dissymétrique (figure 6.3.2.h). Mais l'on constate que la contrainte normale mobilisée aux pics augmente, évidemment moins vite que la contrainte de cisaillement aux pics, mais la résistance de l'interface augmente, grâce à l'augmentation de contrainte normale (figure 6.3.2.i). Ce caractère différencie notablement l'interface calcarénite rainurée - coulis d'une interface sable-structure, dans laquelle la contrainte normale, en cisaillement à volume constant, décroît dès les premiers cycles.

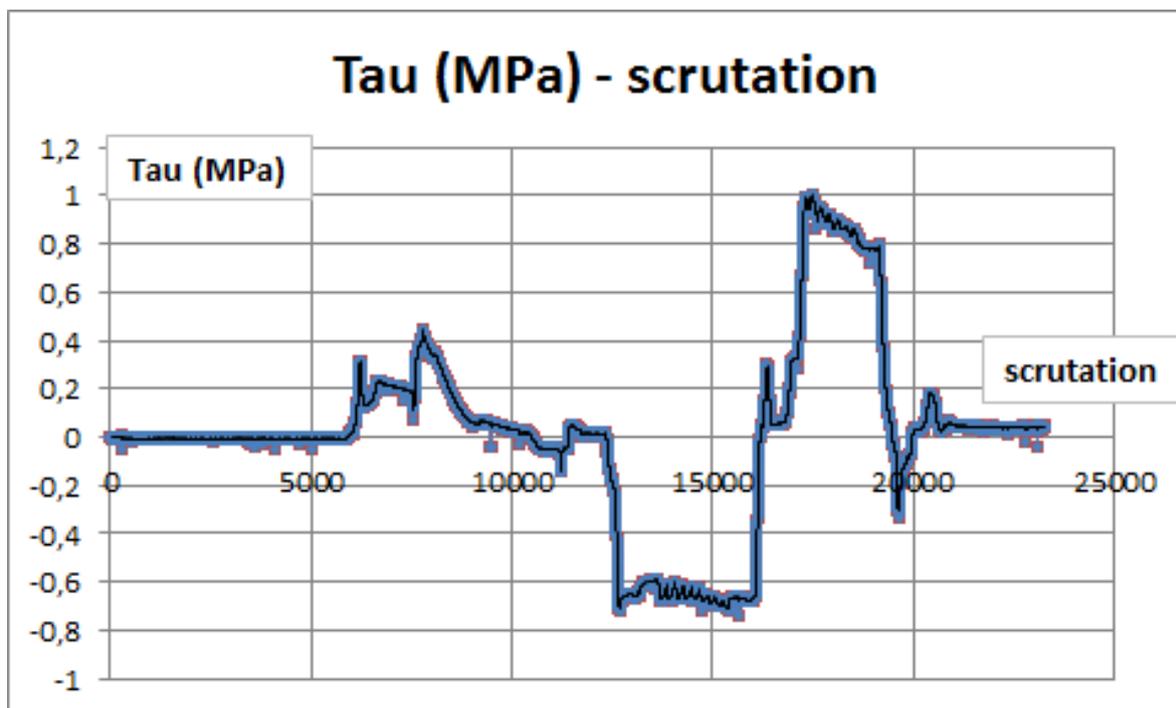


Figure 6.3.2.f : F4, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai.

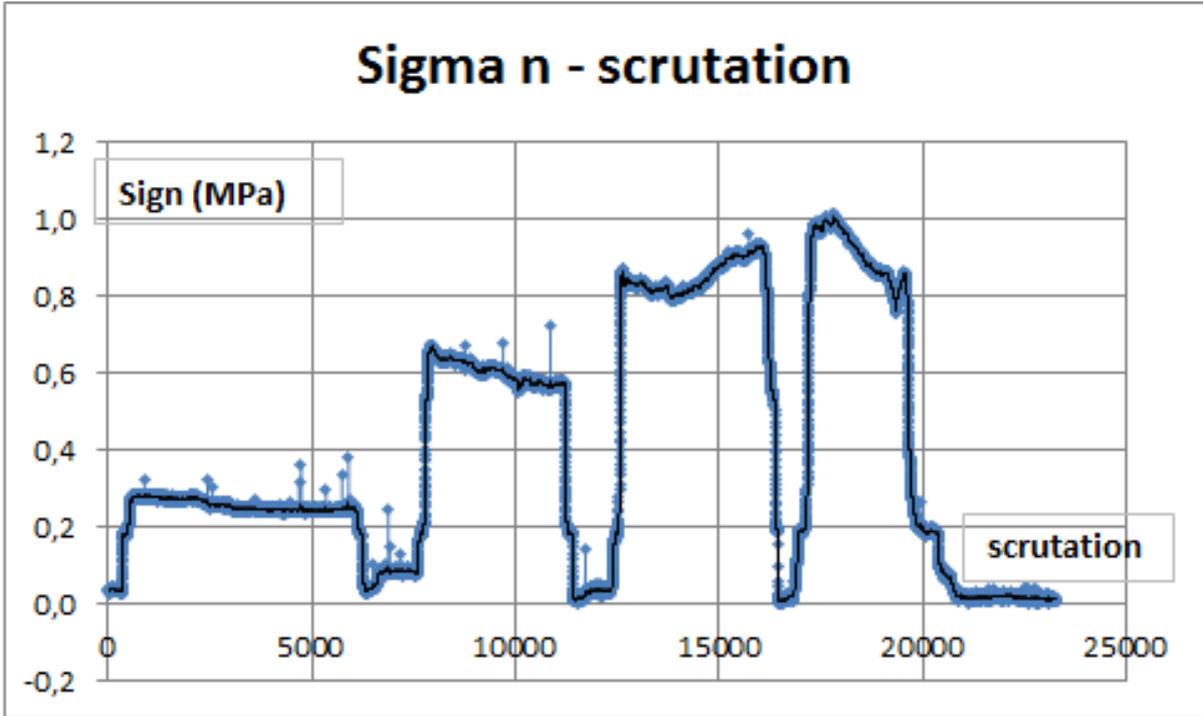


Figure 6.3.2.g : F4, évolution de la contrainte normale au cours de l'essai.

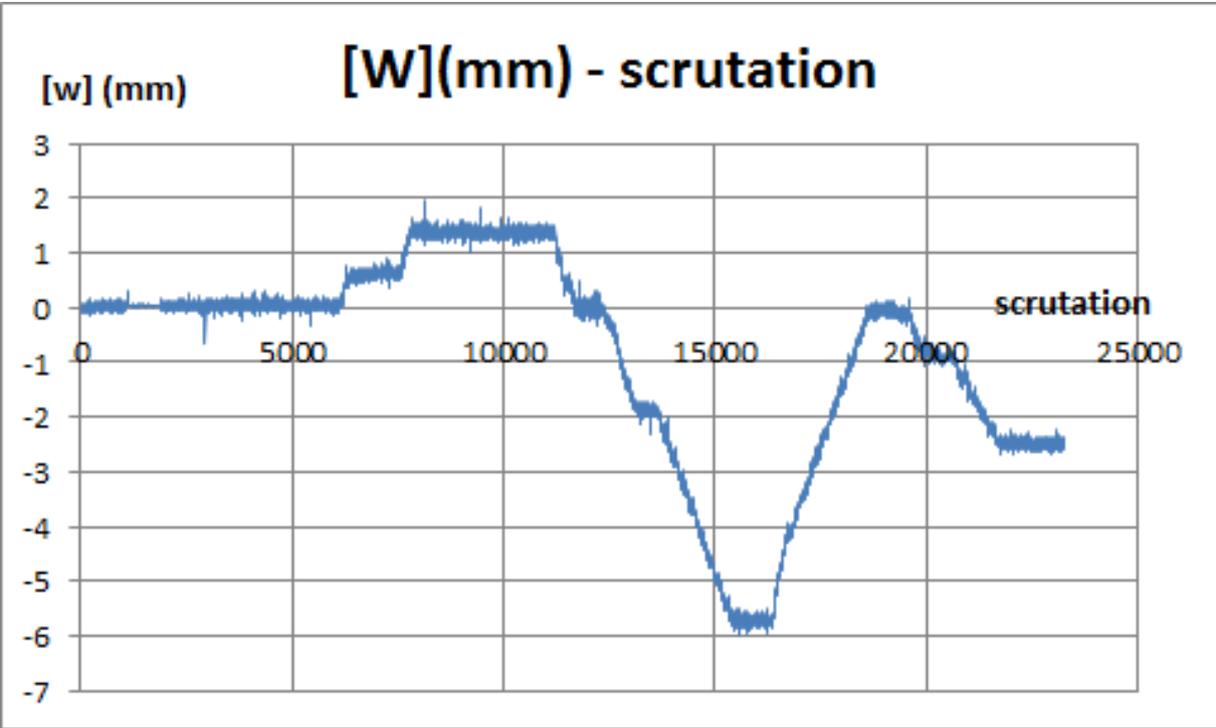


Figure 6.3.2.h : F4, évolution du déplacement relatif tangentiel au cours de l'essai.

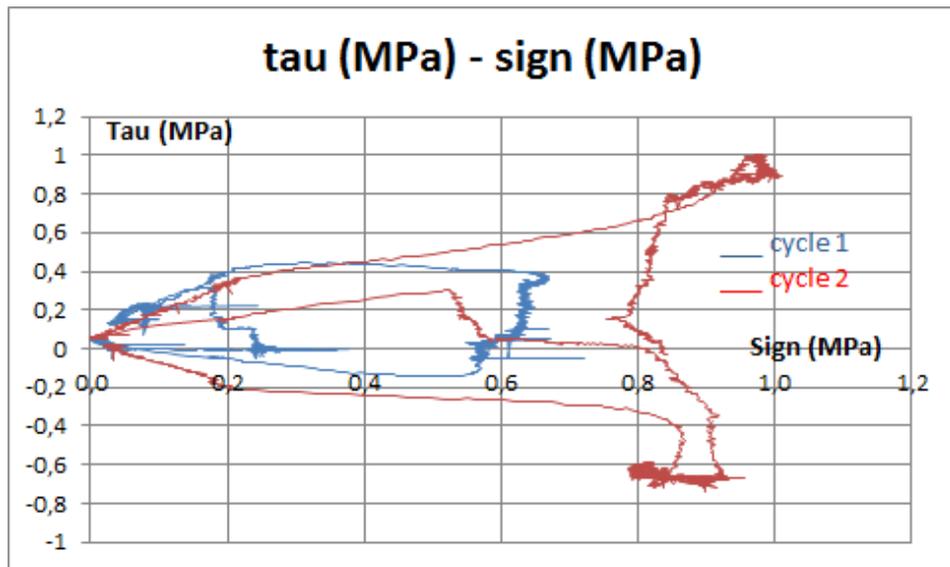


Figure 6.3.2.h : F4, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.2.3 Essai F6

Il s'agit toujours d'un cisaillement à volume constant (VC), contrôlé en déplacement relatif tangentiel, pour un très petit nombre de cycles. L'idée était toujours ici d'imposer à l'interface calcarénite coulis, une série de petits cycles (jusqu'à un déplacement relatif tangentiel de 4mm), puis un grand cycle (jusqu'à un déplacement relatif tangentiel de 10mm), ces cycles étant pseudo-symétriques (c'est-à-dire alternativement positifs et négatifs en cisaillement). Cet essai a mieux fonctionné que le précédent (F4), en termes d'asservissement du déplacement relatif normal, devant être maintenu constant après application de la contrainte normale initiale (300 kPa). La figure 6.3.2.j donne les étapes successives de cette sollicitation en termes de déplacement relatif tangentiel imposé.

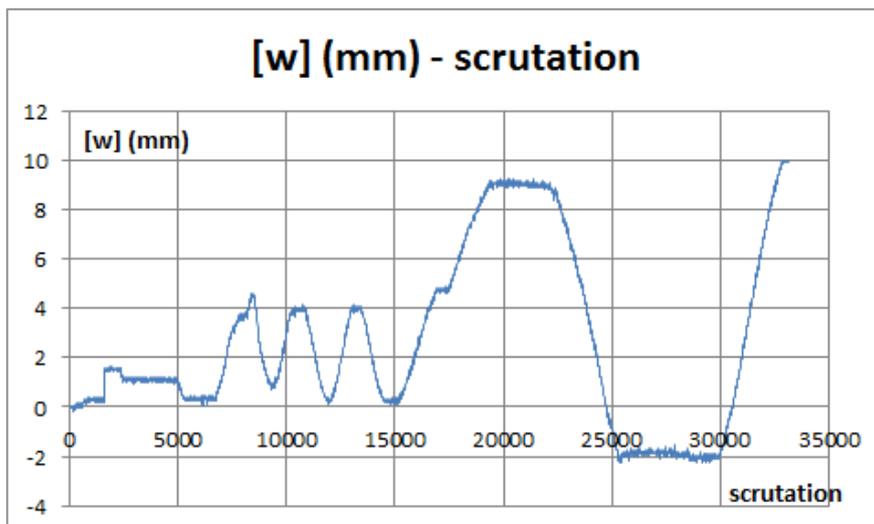


Figure 6.3.2.j : F6, déplacements relatifs tangentiels imposés au cours de l'essai

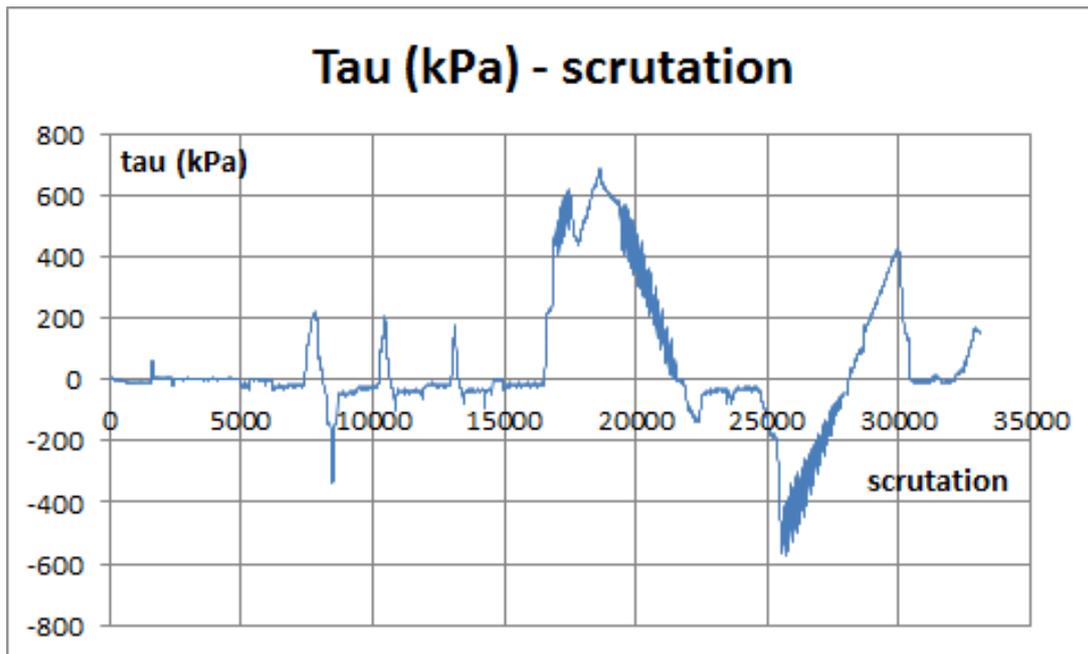


Figure 6.3.2.k : F6, évolution de la contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

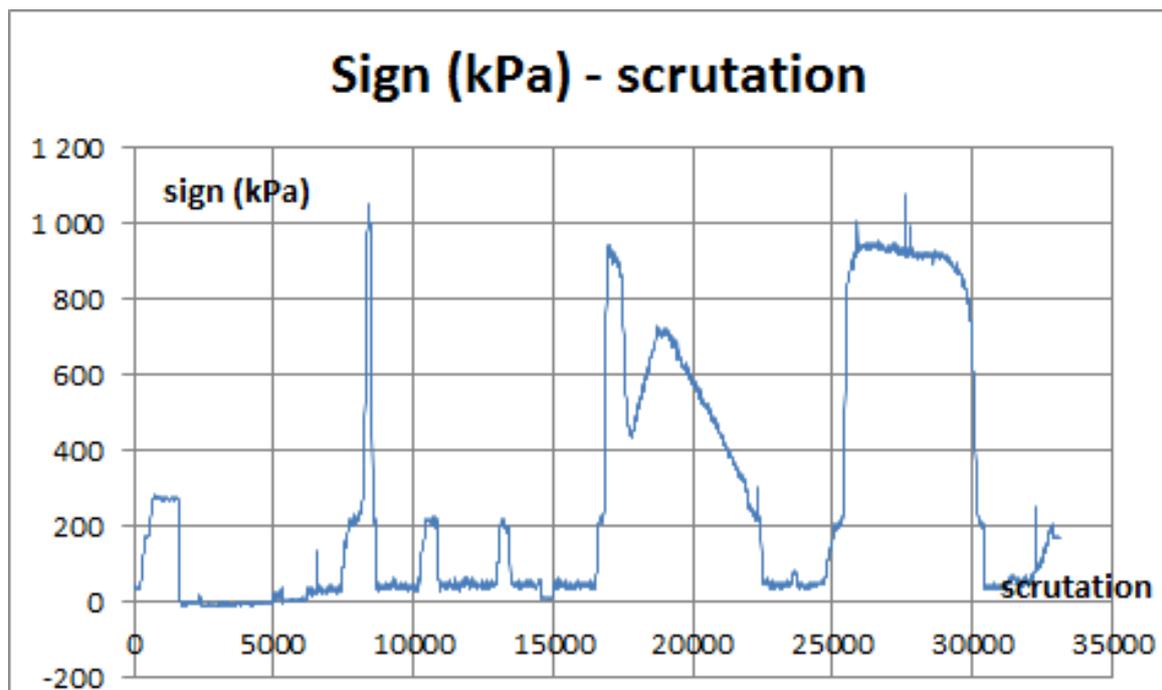


Figure 6.3.2.l : F6, évolution de la contrainte normale au cours de l'essai.

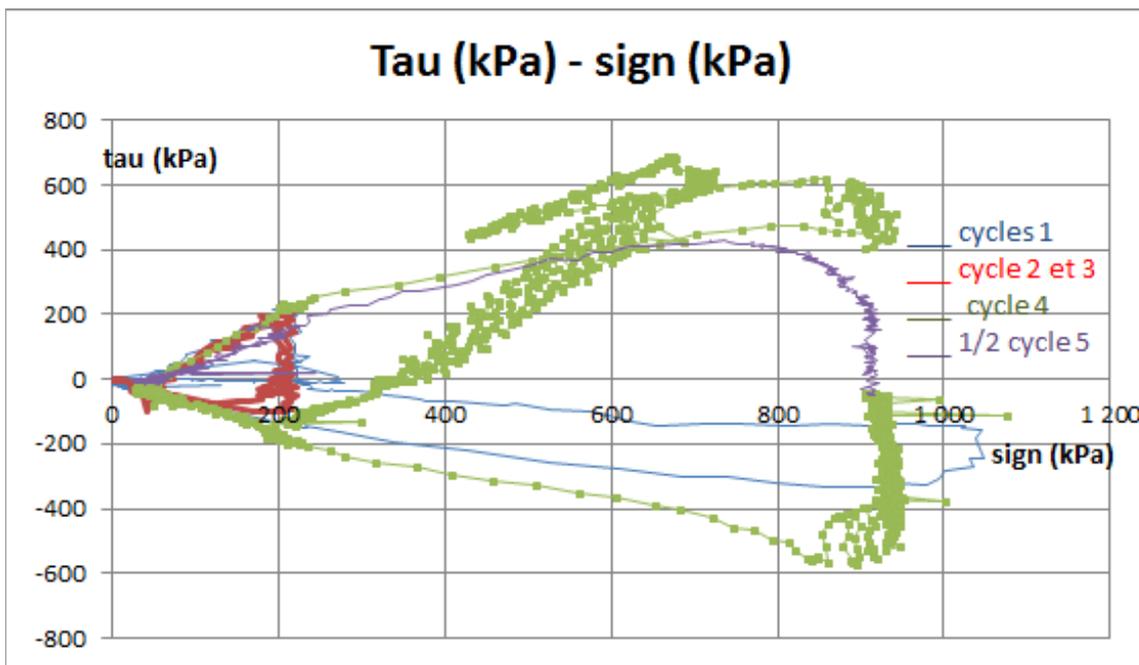


Figure 6.3.2.m : F6, chemin de contraintes au cours de l'essai.

Ce chargement conduit à des cycles presque symétriques en contraintes de cisaillement (figure 6.3.2.k). L'évolution de la contrainte normale se lit sur la figure 6.3.2.l. On remarque (figure 6.2.3.m) que le premier cycle, modeste en déplacement relatif tangentiel imposé (4 mm) a dû aboutir à une rupture partielle d'aspérités (pic en contrainte normale). Les 2 cycles suivants, de même amplitude, ne mobilisent que peu de cisaillement, probablement en raison de cette première rupture. Le quatrième, de grande amplitude de déplacement relatif tangentiel, remobilise de la résistance au cisaillement, ce qui signifie que toutes les aspérités ne se sont pas rompues en début d'essai. Il en est de même pour le dernier demi-cycle.

6.3.2.4 Essai F7

Il s'agit toujours d'un cisaillement à volume constant (VC), contrôlé en déplacement relatif tangentiel, pour un très petit nombre de cycles (2 cycles). L'idée est maintenant d'imposer à l'interface calcarénite-coulis, une série de petits cycles de très grande amplitude (jusqu'à un déplacement relatif tangentiel de 10 mm), ces cycles étant symétriques (c'est-à-dire alternativement positifs et négatifs en cisaillement), mais symétriques en déplacement relatif tangentiel (figure 6.3.2.n). Il est clair que cette amplitude de déplacement relatif tangentiel détruit entièrement les aspérités, avec une nette tendance contractante, ainsi qu'en témoignent les figures 6.3.2.o (contrainte de cisaillement pendant l'essai) et 6.3.2.p (contrainte normale pendant l'essai). Le premier pic de contrainte de cisaillement à 2000kPa (angle de frottement de 51°) provient sans doute de la rupture d'une aspérité très résistante. Après cet événement, l'angle de frottement se cantonne autour de 45°, et la contrainte normale finit par s'annuler (tendance très contractante), l'interface a alors perdu toute résistance.

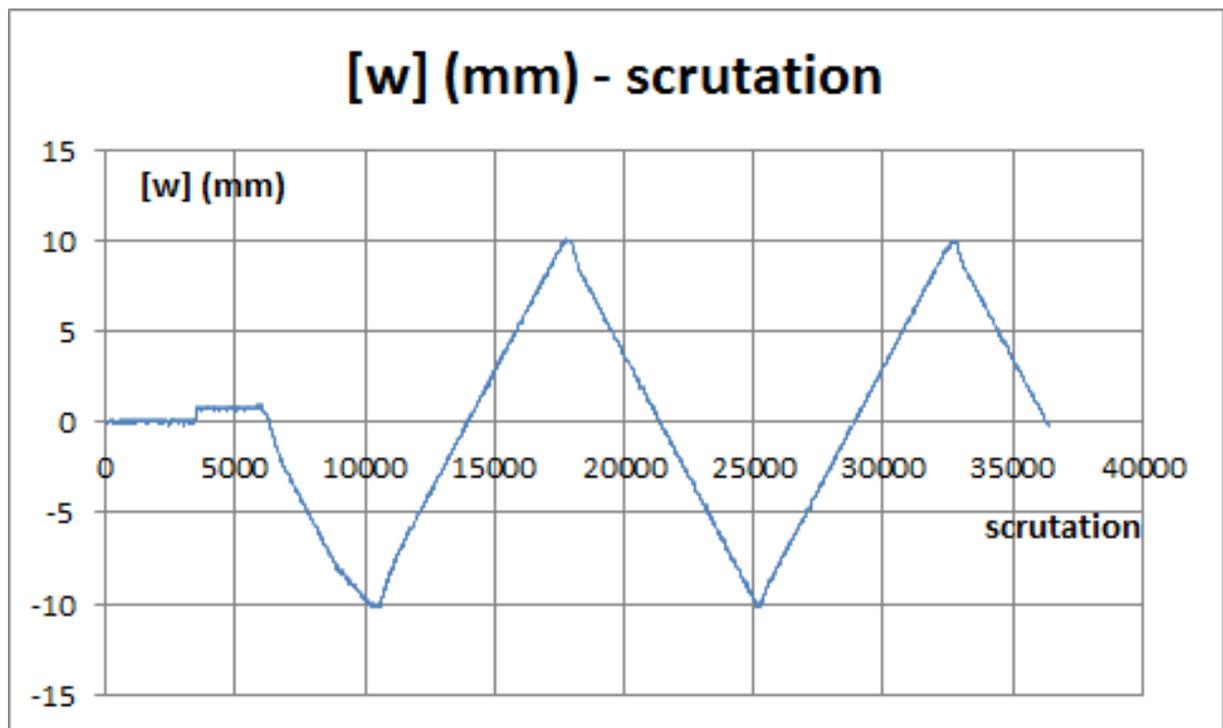


Figure 6.3.2.n : F7, déplacements relatifs tangentiels imposés au cours de l'essai.

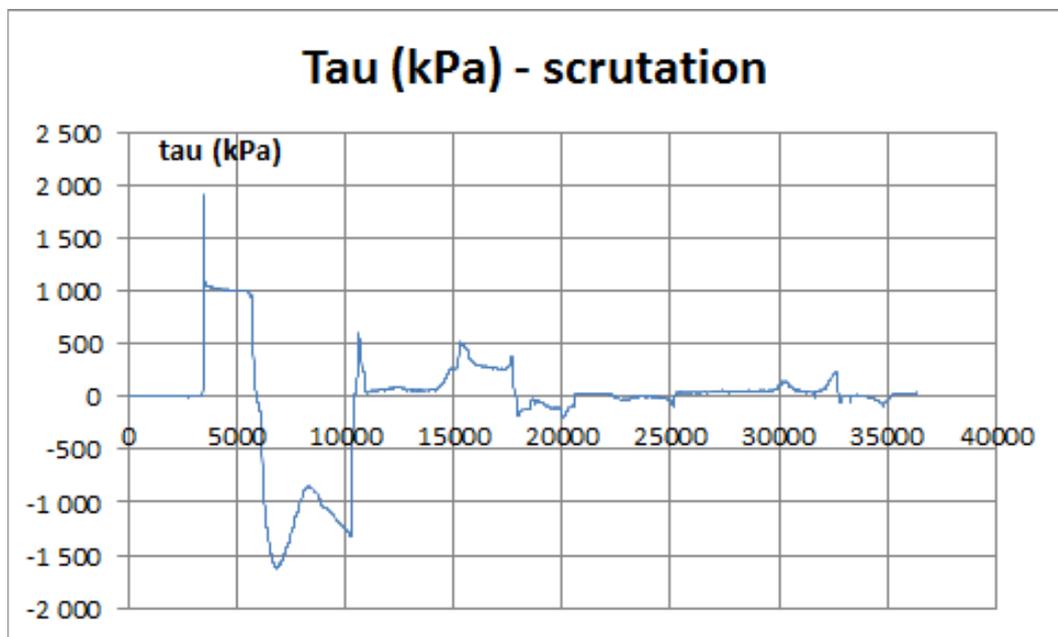


Figure 6.3.2.o : F7, évolution de la contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

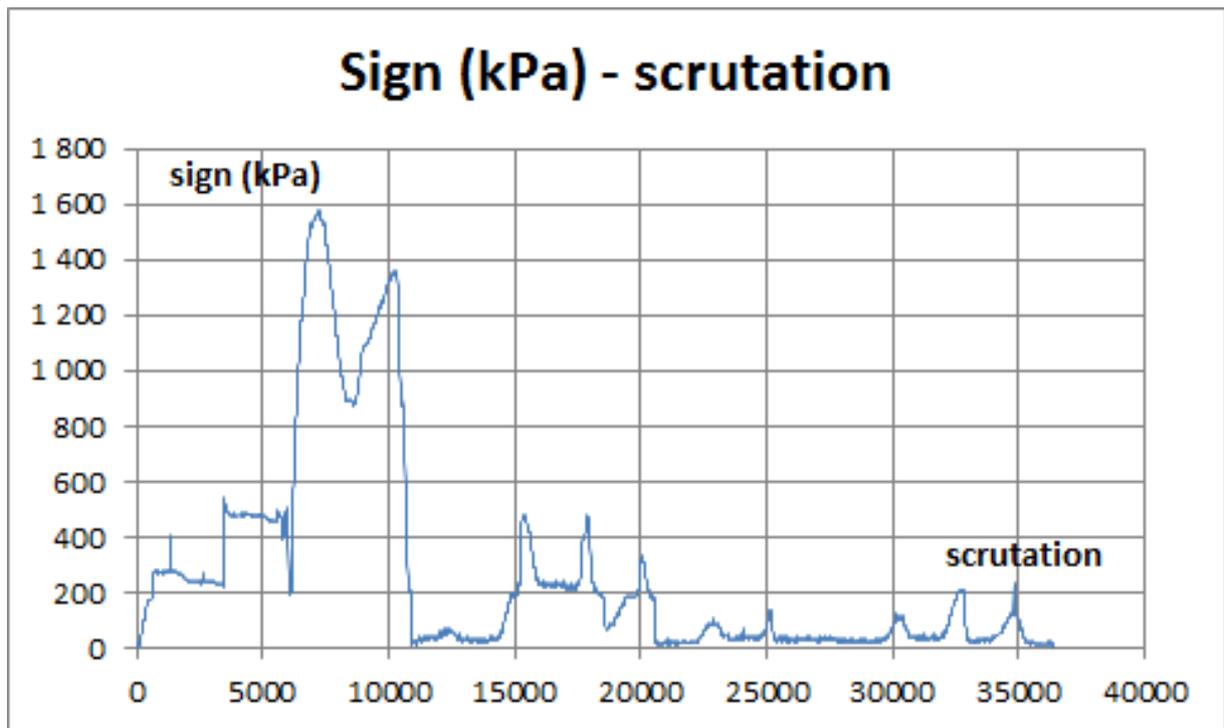


Figure 6.3.2.p : F7, évolution de la contrainte normale au cours de l'essai.

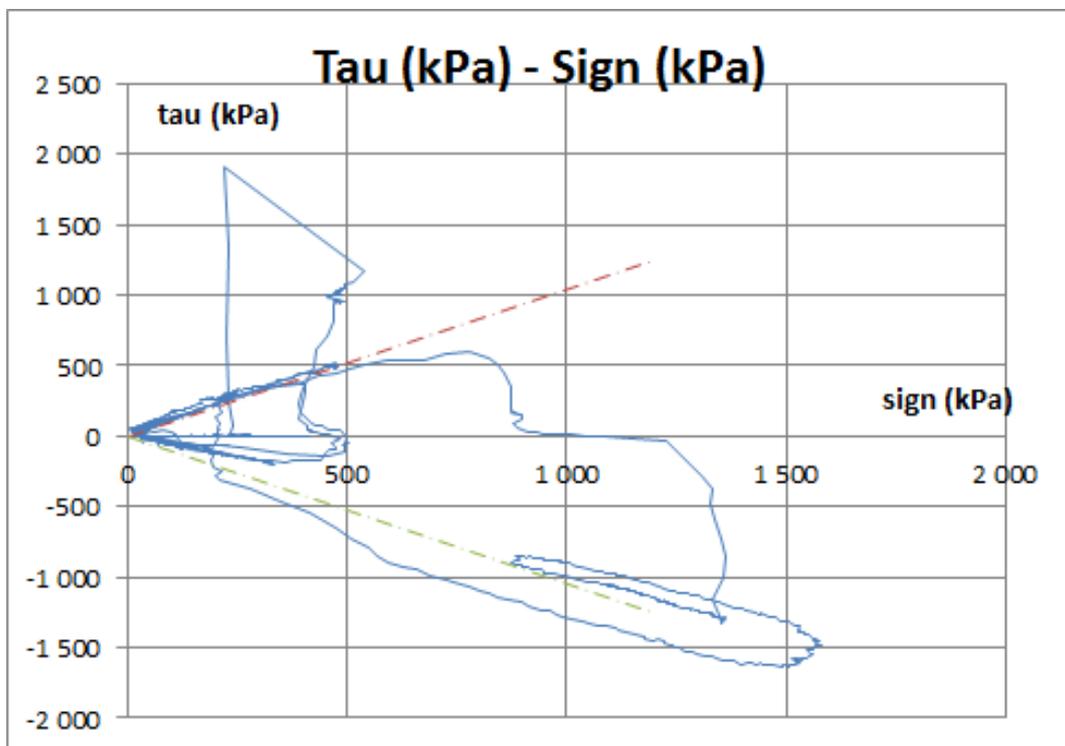


Figure 6.3.2.q : F7, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.3 ESSAIS CYCLIQUES [VC] A SEUILS IMPOSES EN CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

6.3.3.1 Essai F5

C'est un essai asymétrique en cycles de contrainte de cisaillement. Les seuils imposés en forces sont:

$$F_{y \max} = + 0.35 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \min} = 0$$

Type d'essai : **essai cyclique asymétrique (one-way)**

Nombre de cycles réalisés: **N=60 cycles**

Cet essai est contrôlé en force de cisaillement. Les contraintes et les déplacements relatifs sont mesurés au cours du cisaillement. Le déroulement de l'essai n'a pas tout à fait été celui qui était prévu. Les phases suivantes décrivent le comportement de l'interface depuis le début de l'essai :

Phase O-A : chargement de l'échantillon jusqu'à la contrainte normale initiale. Pendant cette phase, la force normale appliquée sur l'interface provoque évidemment une contraction (Figure 6.3.3.a). La montée en contrainte normale se stabilise au point A vers 300 kPa (Figure 6.3.3.c).

Phase A-B : La contrainte normale nominale étant appliquée (sur l'axe Z), les forces de cisaillement sont appliquées sur l'axe horizontal (l'axe Y). Il s'agit du démarrage du cisaillement proprement dit. Dès le démarrage du cisaillement au point A, on assiste à une véritable discontinuité dans tous les paramètres de l'essai (déplacements relatifs tangentiel et normal, contrainte normale et de cisaillement). On pourrait suspecter un mauvais blocage de l'échantillon dans la machine.

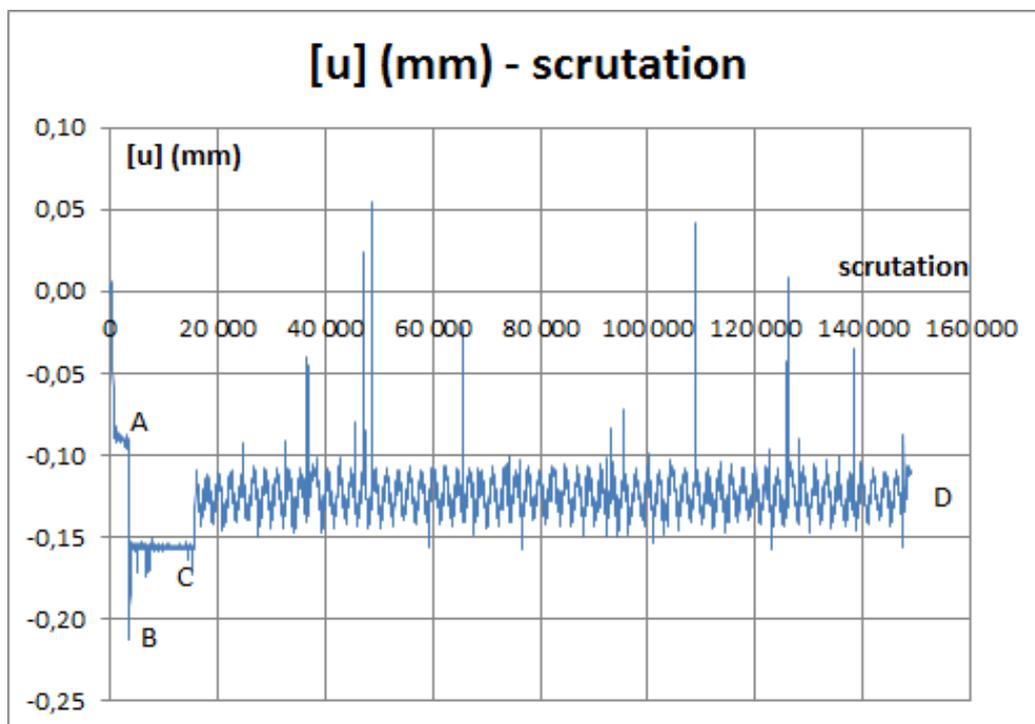


Figure 6.3.3.a : F5, déplacement relatif normal au cours de l'essai

Phase B-C : L'essai se déroule de manière « monotone », à volume constant, mais à un déplacement relatif normal très supérieur à ce qu'il aurait dû être. Ce déplacement est atteint au point A, soit après une contractance de 0,09 mm. Pendant cette phase, on observe une dégradation du frottement de 1400 à 1340kPa, et de la contrainte normale de 900 à 850kPa, avec un incrément de déplacement relatif tangentiel modeste de 0,03mm (figure 6.3.3.b). L'essai atteint le point C après une nouvelle discontinuité en déplacement relatif normal (0,03 mm dilatant), en contrainte de cisaillement (chute de 860 kPa), et en contrainte normale (chute de 150kPa).

Phase C-D : Le véritable chemin cyclique commence au point C, à partir duquel est respecté le chargement en contrainte de cisaillement entre des seuils de 0 et 800kPa (figure 6.3.3.d), avec une contrainte normale initiale de 699kPa, et un déplacement relatif normal de -0,12 mm (50 % de plus que celui prévu). On observe, sur les 60 cycles, une tendance contractante et une lente érosion du frottement, à vitesse de plus en plus lente (sur chemin cyclique moyen, chute de contrainte normale de 73kPa), Il semblerait que la contrainte normale soit stabilisée en fin d'essai, mais un plus grand nombre de cycles aurait permis d'être plus affirmatif. Quant au déplacement relatif tangentiel, il subit un incrément très faible (0,02 mm) au cours des cycles.

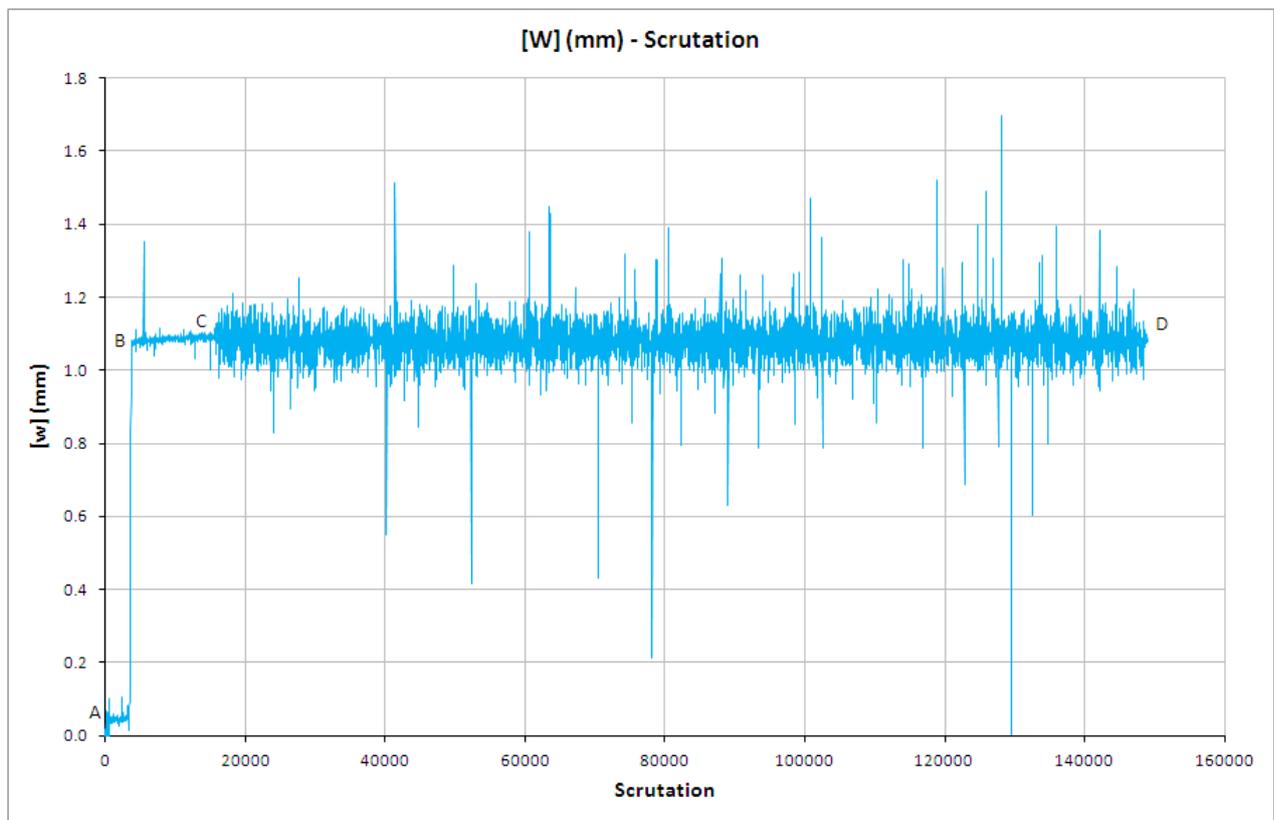


Figure 6.3.3.b : F5, déplacement relatif tangentiel au cours de l'essai

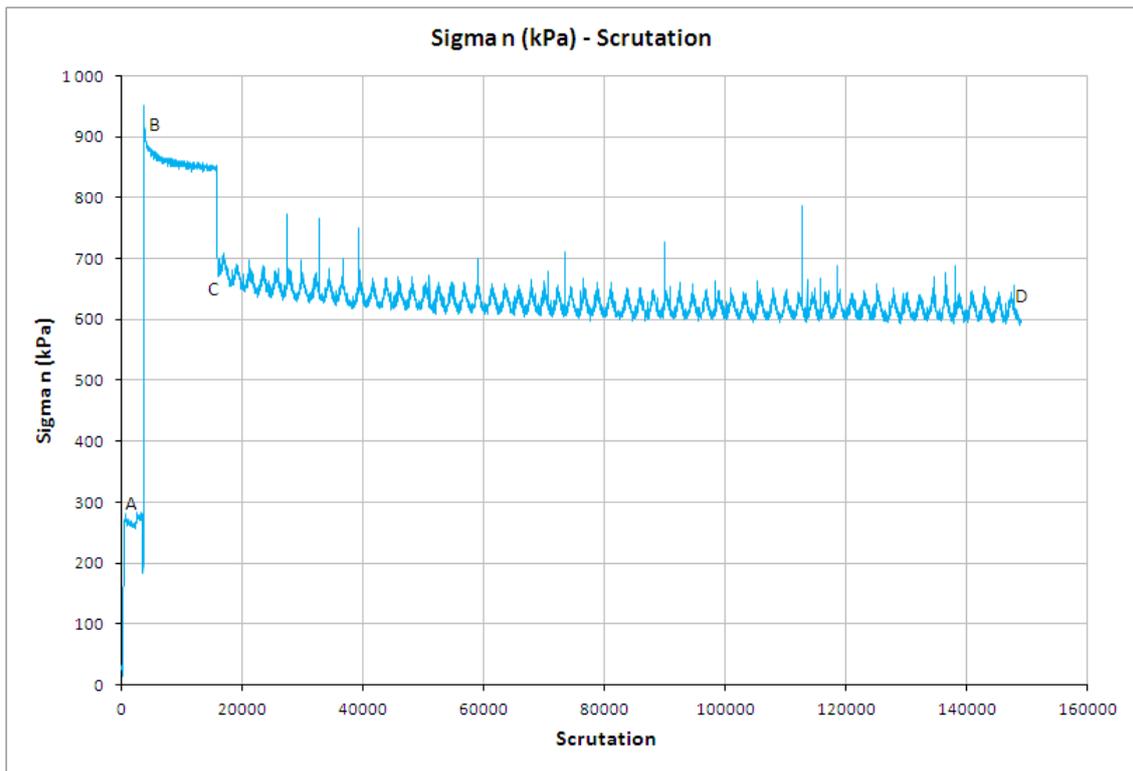


Figure 6.3.4.c: F5, contrainte normale au cours de l'essai

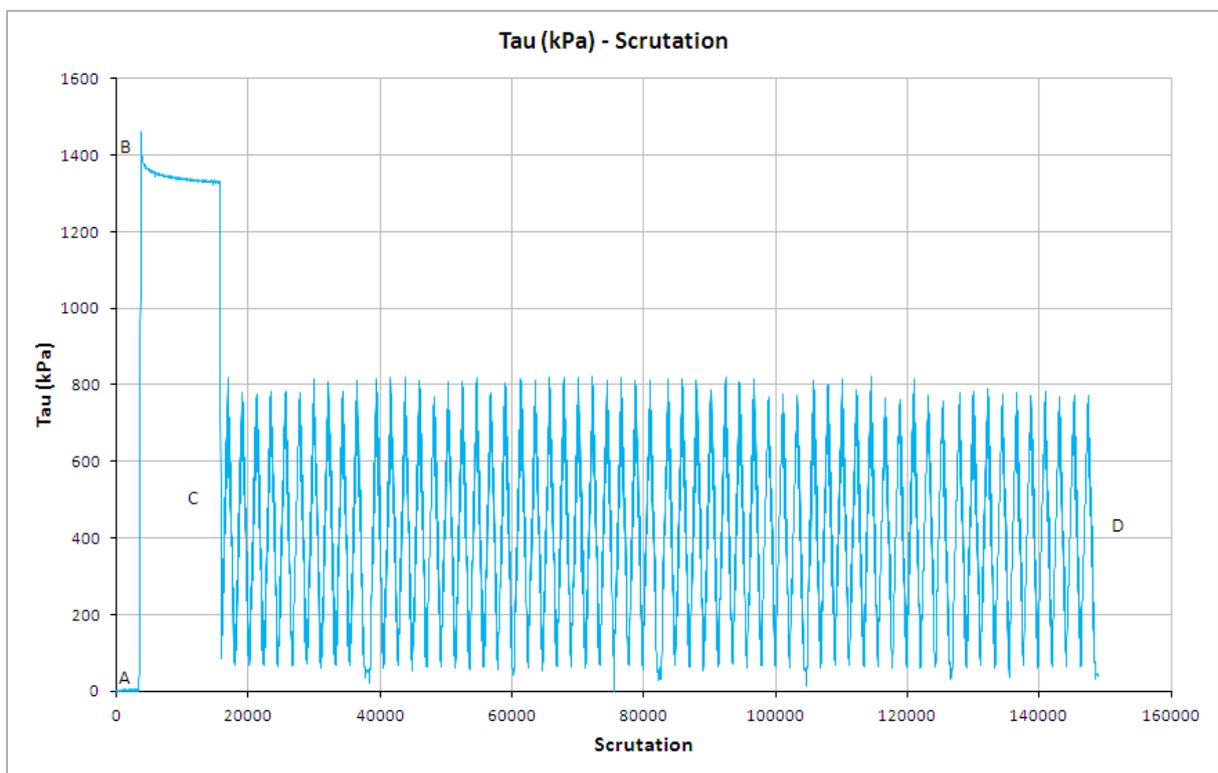


Figure 6.3.3.d : F5, contrainte de cisaillement au cours de l'essai

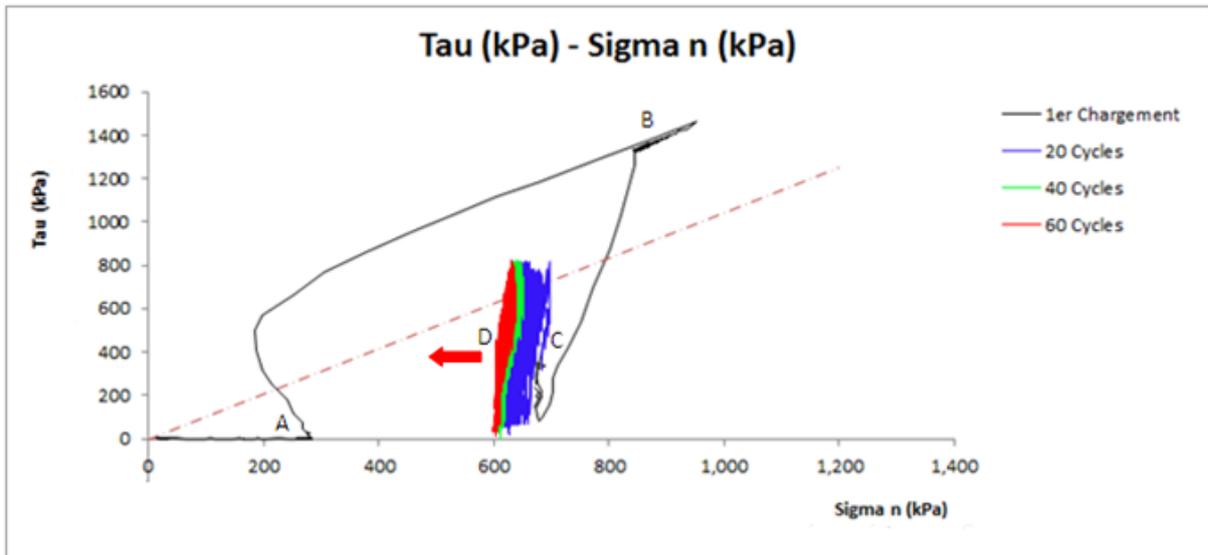


Figure 6.3.3.e : F5, chemin de contraintes au cours de l'essai

Remarque :

La Figure 6.3.3.e illustre le phénomène de dégradation progressive de la contrainte normale au cours des cycles, lente reptation des boucles cycliques vers les faibles contraintes normales. La mobilisation du frottement est traduite par la figure 6.3.3.f.

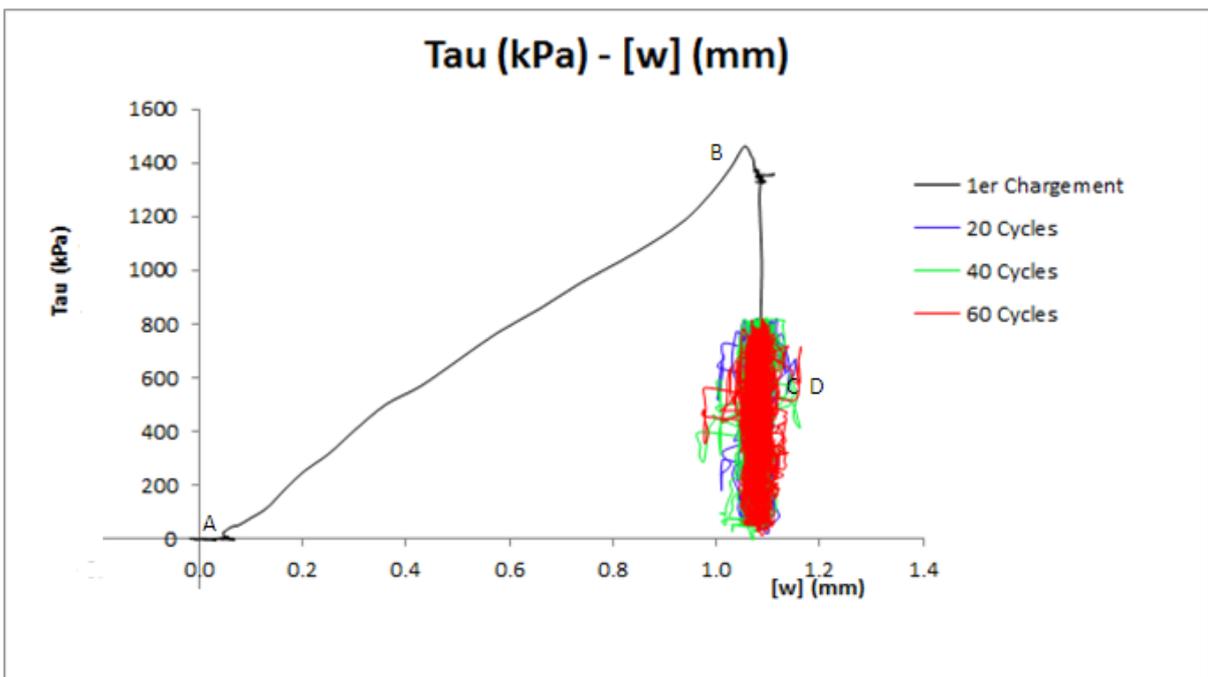


Figure 6.3.3.f : F5, mobilisation du frottement au cours de l'essai

6.3.3.2 Essai F10

Seuils en forces de cisaillement imposées :

$$F_{y \max} = + 0.70 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \min} = - 0.70 \times F_{y \text{ monot}}$$

Type d'essai: **essai cyclique symétrique (two-way)**

Nombre de cycles réalisés: **N=113 cycles**

Les cycles imposés à l'échantillon en contrainte de cisaillement, ainsi que le grand cycle final, sont présentés à la figure 6.3.3.g. Les cycles sont légèrement dissymétriques (valeur absolue des contraintes négatives légèrement supérieures aux positives).

Il en résulte, à volume constant, les variations de contrainte normale de la figure 6.3.3.h, qui montrent une dégradation progressive de cette contrainte normale au cours des cycles. Cette dégradation de contrainte normale induit un déplacement des boucles cycliques vers l'origine comme indiqué sur la Figure 6.3.4.i, (chemin de contraintes).

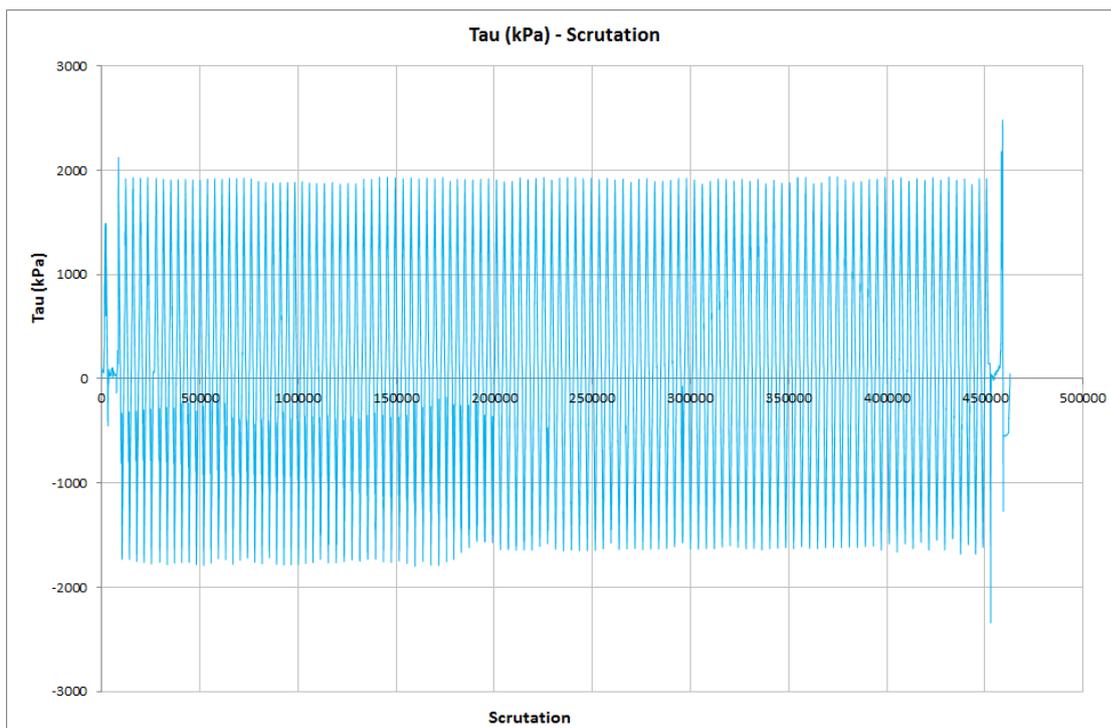


Figure 6.3.3.g : F10, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai.

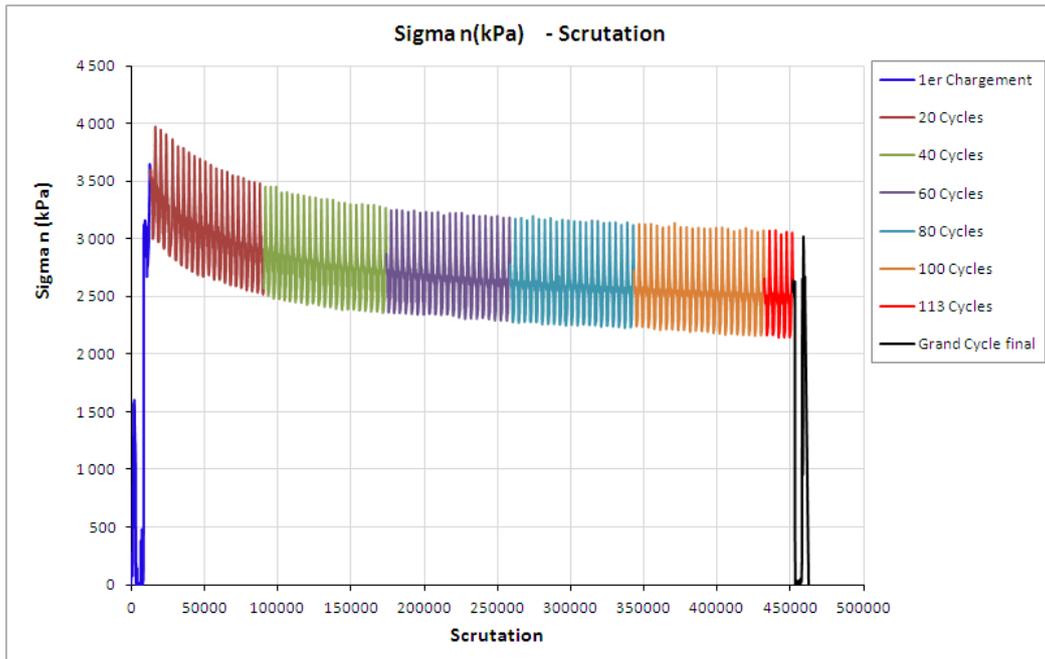


Figure 6.3.3.h : F10, contrainte normale au cours de l'essai

Au bout de 113 cycles, les déplacements relatifs tangentiels restent toujours faibles et le taux de dégradation en contrainte normale est quasiment stable (figure 6.3.4.h). Le déplacement relatif tangential cyclique moyen final est atteint dès les premiers cycles (figure 6.3.3.j). Aucune chute brutale en contrainte normale n'est observée au bout de ces 113 cycles.

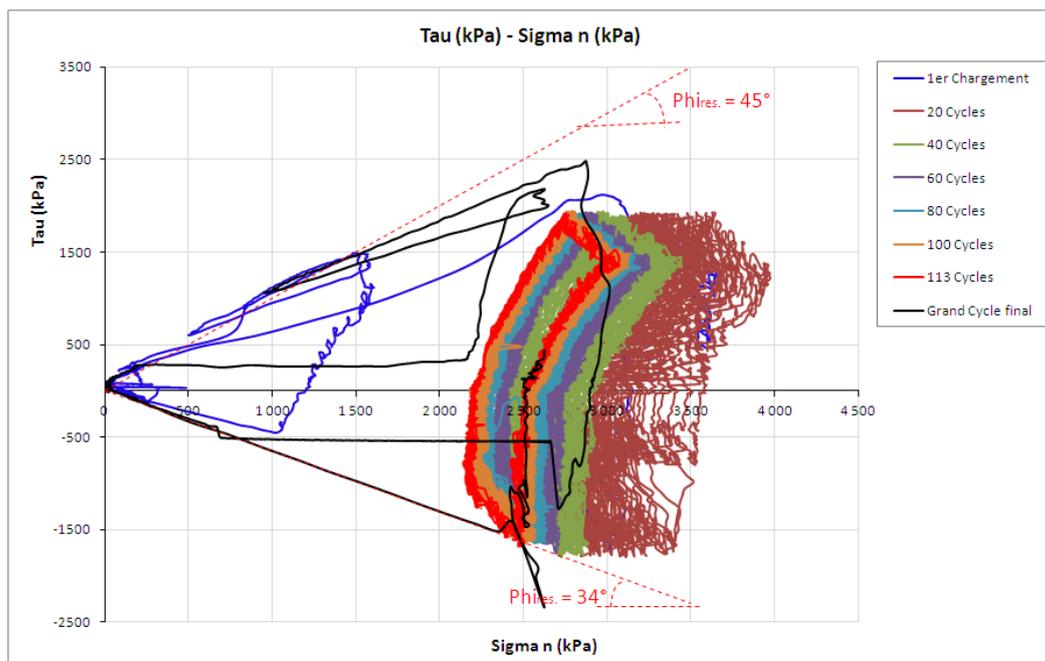


Figure 6.3.3.i : F10, chemin de contraintes au cours de l'essai

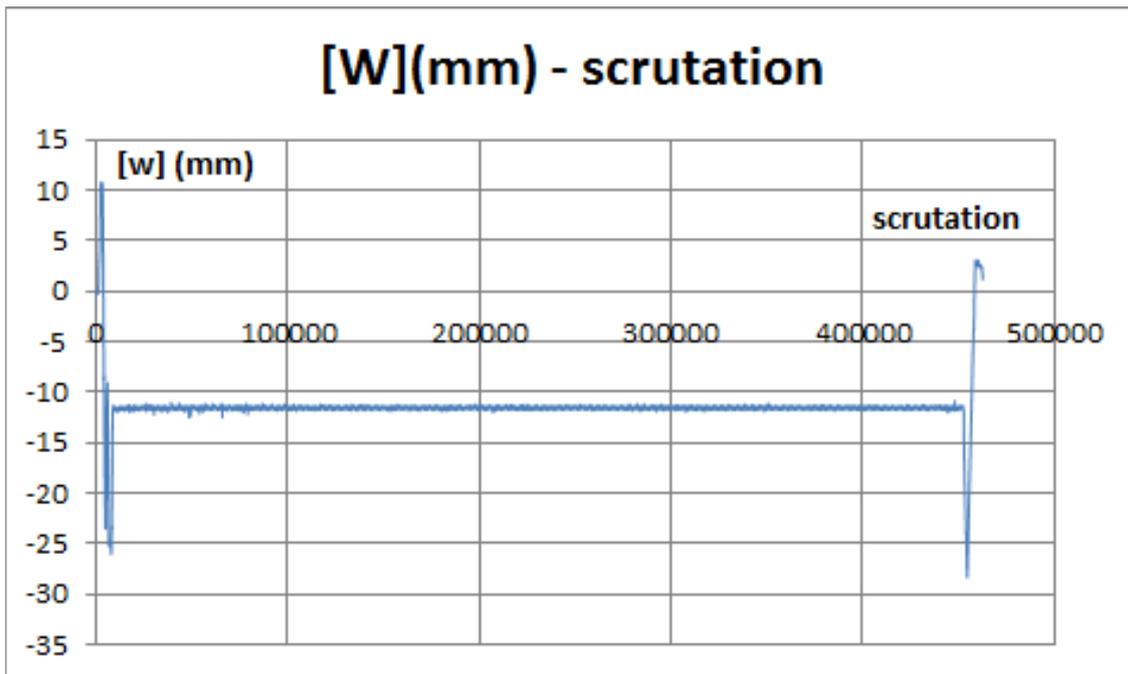


Figure 6.3.3.j : F10, déplacement relatif tangentiel au cours de l'essai

Un cycle final est appliqué en « grand » déplacement relatif tangentiel, qui provoque une chute brutale en contrainte normale (perte de résistance de l'interface). La figure 6.3.3.i montre que sur ce chemin final, le retour vers l'origine s'opère avec un angle de frottement résiduel, $\varphi_{\text{résiduel}}$ de 34° à 45° (Figure 6.3.3.i).

Remarque : Le déplacement relatif tangentiel semble très élevé au cours de cet essai, et surtout pratiquement constant pendant les cycles. Le niveau élevé des seuils de cisaillement en est sans doute la cause mais on s'explique mal ce « blocage » du déplacement relatif tangentiel pendant les cycles.

6.3.3.3 Essai F11

Seuils en forces de cisaillement imposées :

$$F_{y \text{ max}} = + 0.85 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \text{ min}} = + 0.35 \times F_{y \text{ monot}}$$

Type d'essai: **essai cyclique très asymétrique, et proche de la capacité de résistance de l'interface en monotone (one-way).**

Cycles réalisés: N=10 cycles

Au début de cet essai, l'interface subit un grand déplacement relatif tangentiel jusqu'à 5mm. Ce déplacement est provoqué par la forte amplitude de contrainte (85% de la valeur statique) imposée au début de l'essai. Une fois cette amplitude de contrainte atteinte, les déplacements se stabilisent autour de 5mm et les cycles se réalisent en très petits incréments de déplacements relatifs tangentiels.

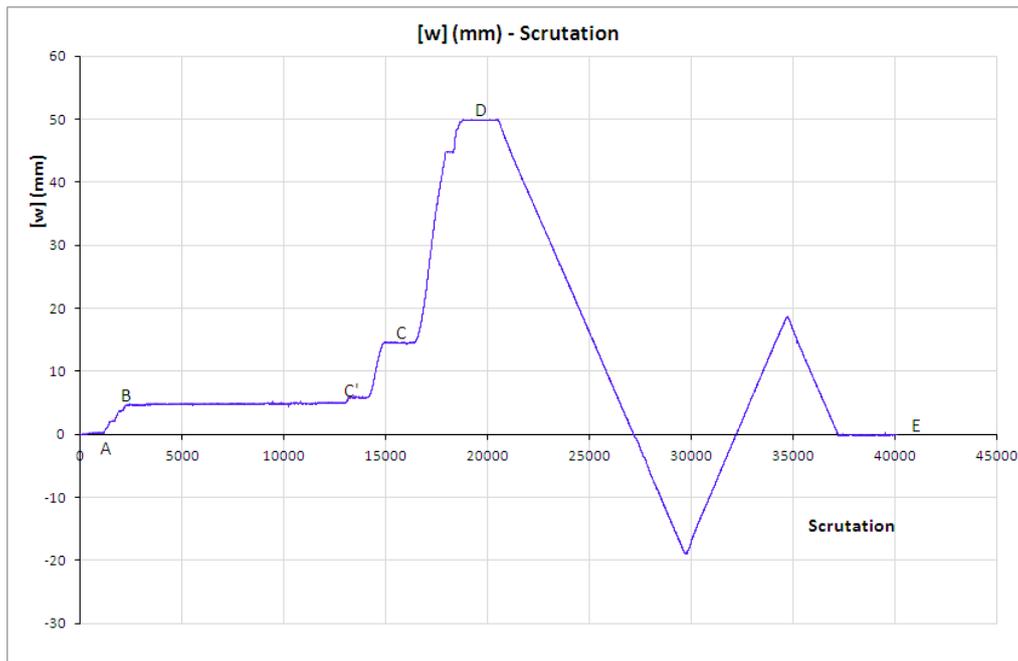


Figure 6.3.3.k : F11, déplacements relatifs tangentiels au cours de l'essai.

Au cours de ces cycles, surtout à leur terme, l'interface se cisaille en créant une chute progressive de contrainte normale. Au bout de 10 cycles l'interface est quasiment rasée et la chute en contrainte normale pratiquement jusqu'à valeur nulle provoque un grand déplacement relatif tangentiel jusqu'à 50mm.

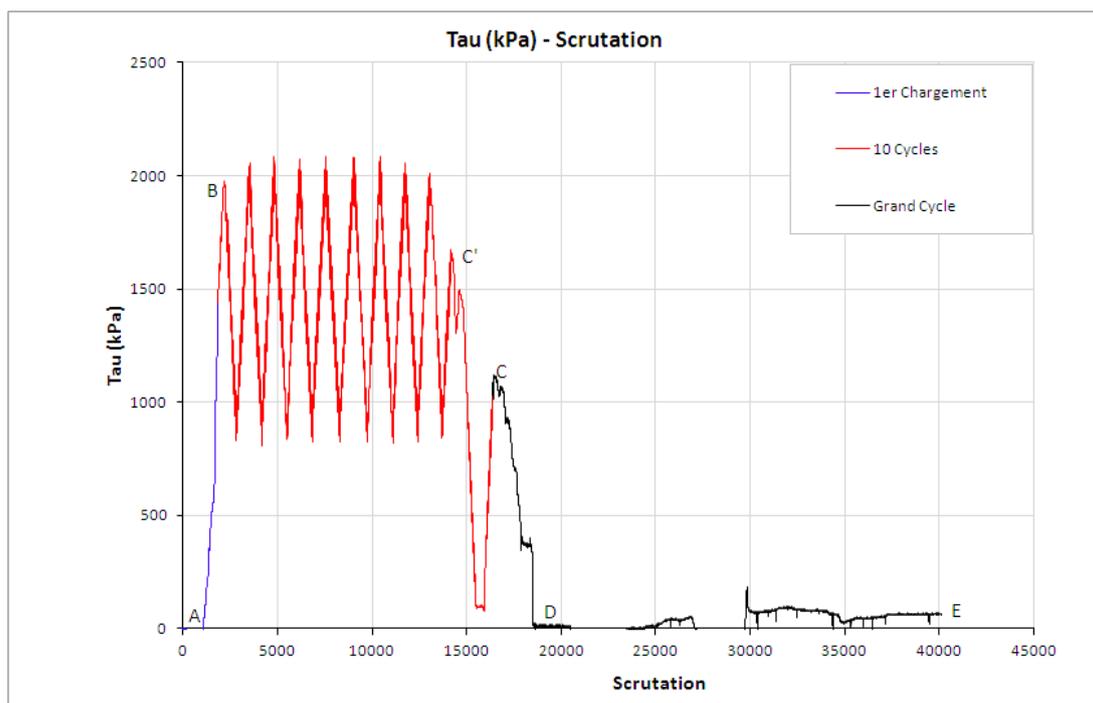


Figure 6.3.3.l : F11, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai.

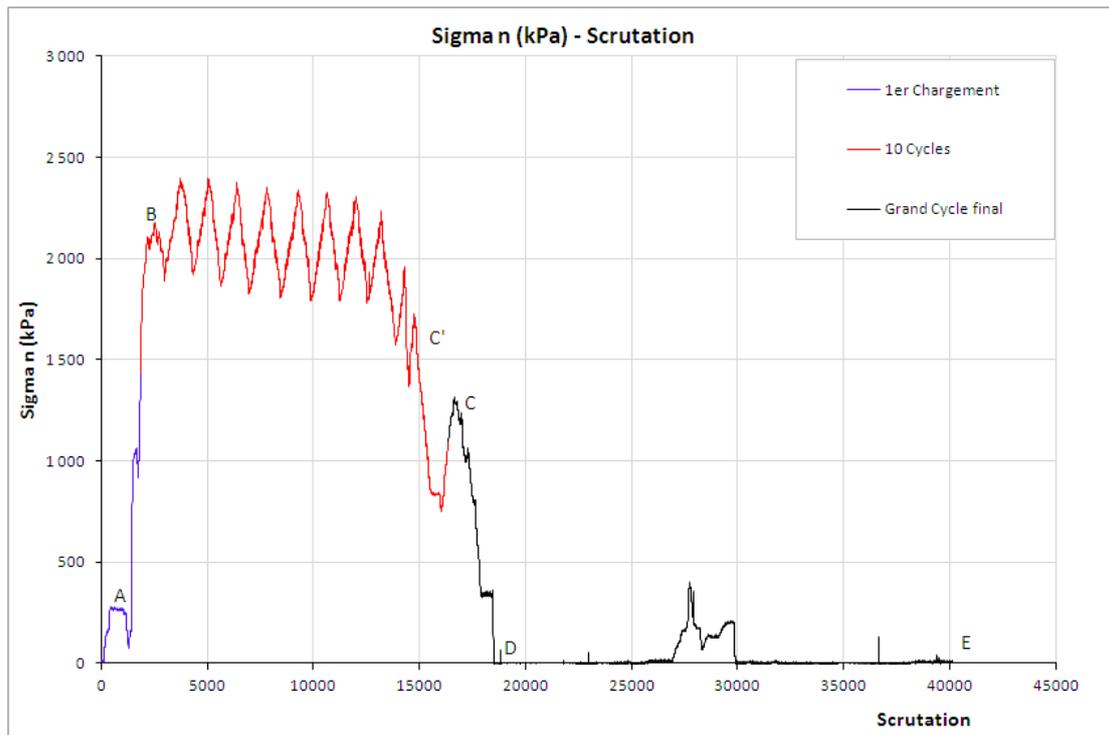


Figure 6.3.3.m : F11, contrainte normale au cours de l'essai.

Un cycle final à déplacement imposé de $\pm 20\text{mm}$ est appliqué. Pendant cette dernière phase, les contraintes normales et de cisaillement restent proches de zéro.

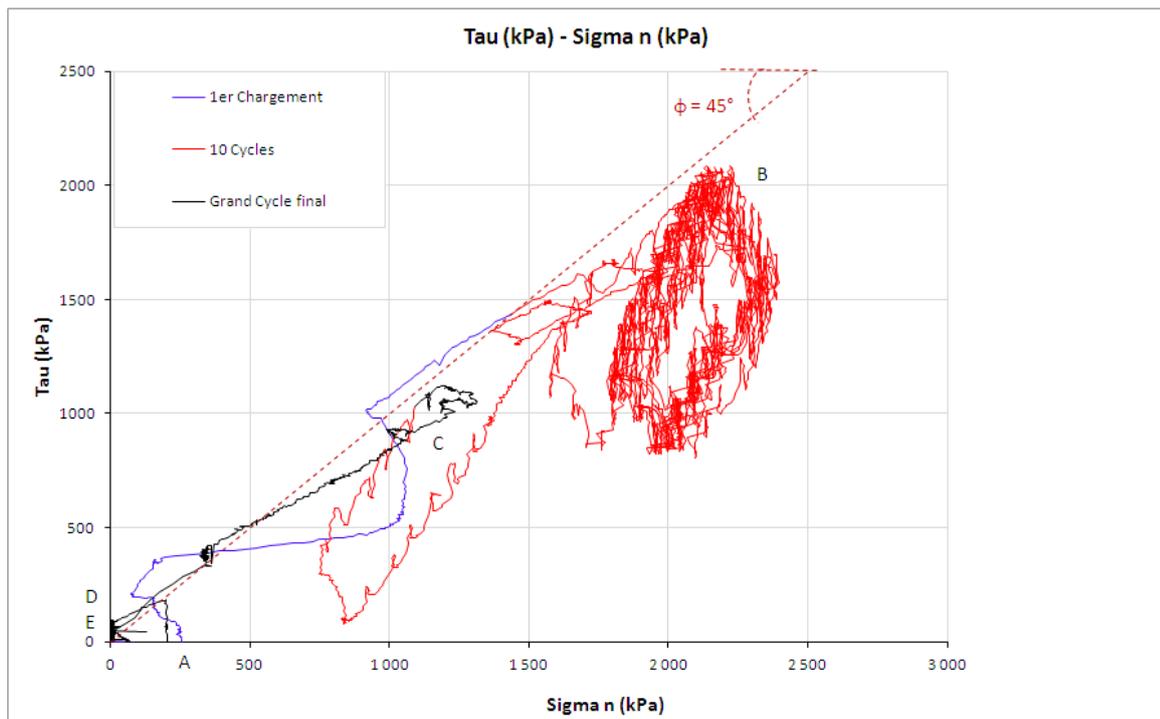


Figure 6.3.3.n : F11, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.3.5 : Essai F14

Seuils imposés en forces de cisaillement :

$$F_{y \max} = + 0.55 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \min} = - 0.55 \times F_{y \text{ monot}}$$

Type d'essai: **essai cyclique symétrique (Two-way)**

Nombre de cycles réalisés: N=208 cycles

La sollicitation en cisaillement cyclique, puis le grand cisaillement final ont été parfaitement appliqués (figure 6.3.3.p). On constate que le sens du premier déplacement relatif tangentiel (de la première contrainte de cisaillement) est décisif pour le sens du déplacement relatif tangentiel (dont cyclique moyen, figure 6.3.3.o), qui n'est pas symétrique, assez élevé, millimétrique et avec des cycles également millimétriques, inexplicables. Un évènement particulier a lieu vers le 140^{ème} cycle, dont le résultat est un brusque accroissement de la contrainte normale (figure 6.3.3.q), et une brusque chute et inversion du déplacement relatif tangentiel. Un bloc dur a certainement été arraché, décollé de la calcarénite, et a ensuite contribué, sans casser et en s'arc-boutant sur les faces en regard de la calcarénite et du coulis, à cet accroissement de contrainte normale, Au terme de cet évènement, l'interface conserve sa résistance, qui néanmoins commence à décroître progressivement (décroissance de contrainte normale certainement due à l'abrasion lente et progressive du bloc détaché), Lors du grand cycle final imposé (209^{ème}), l'interface a pratiquement conservé 60% de sa résistance à volume constant en sollicitation monotone, le bloc dur est toujours présent. D'ailleurs, le retour final à contraintes normale et de cisaillement nulles (figure 6.3.3.r) s'opère à angle de frottement d'interface élevé (49°), plus proche d'un angle de pic que d'un angle de palier.

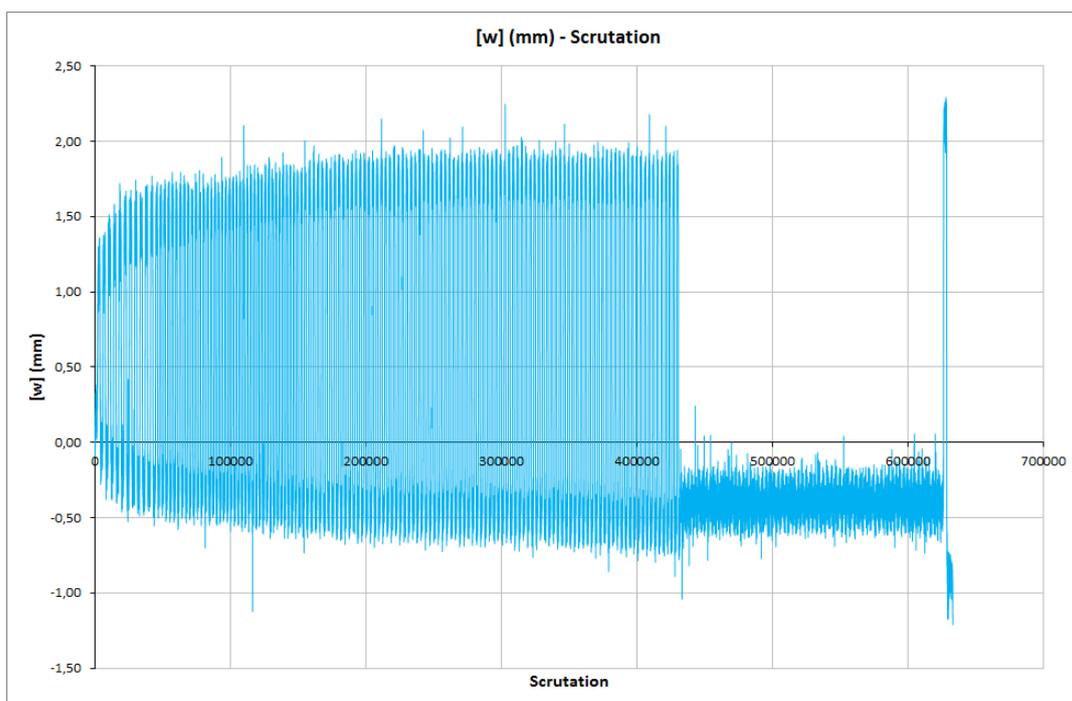


Figure 6.3.3.o : F14, déplacements relatifs tangentiels au cours de l'essai

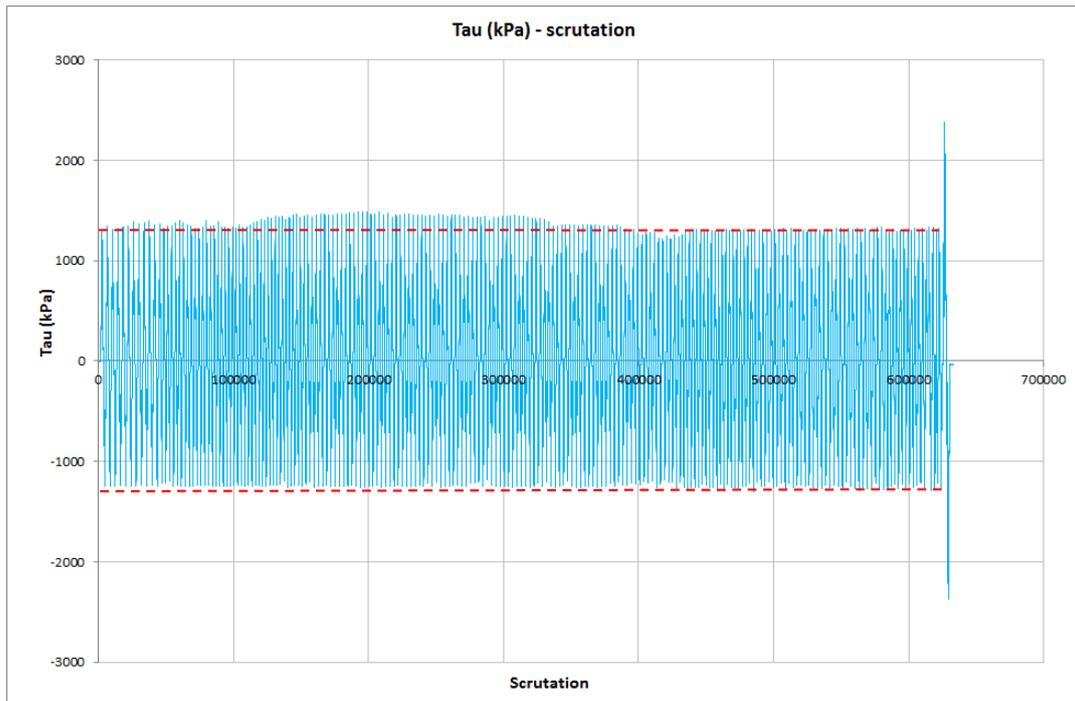


Figure 6.3.3.p : F14, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai

D'ailleurs, le retour final à contraintes normale et de cisaillement nulles (figure 6.3.3.r) s'opère à angle de frottement d'interface élevé (49°), plus proche d'un angle de pic que d'un angle de palier.

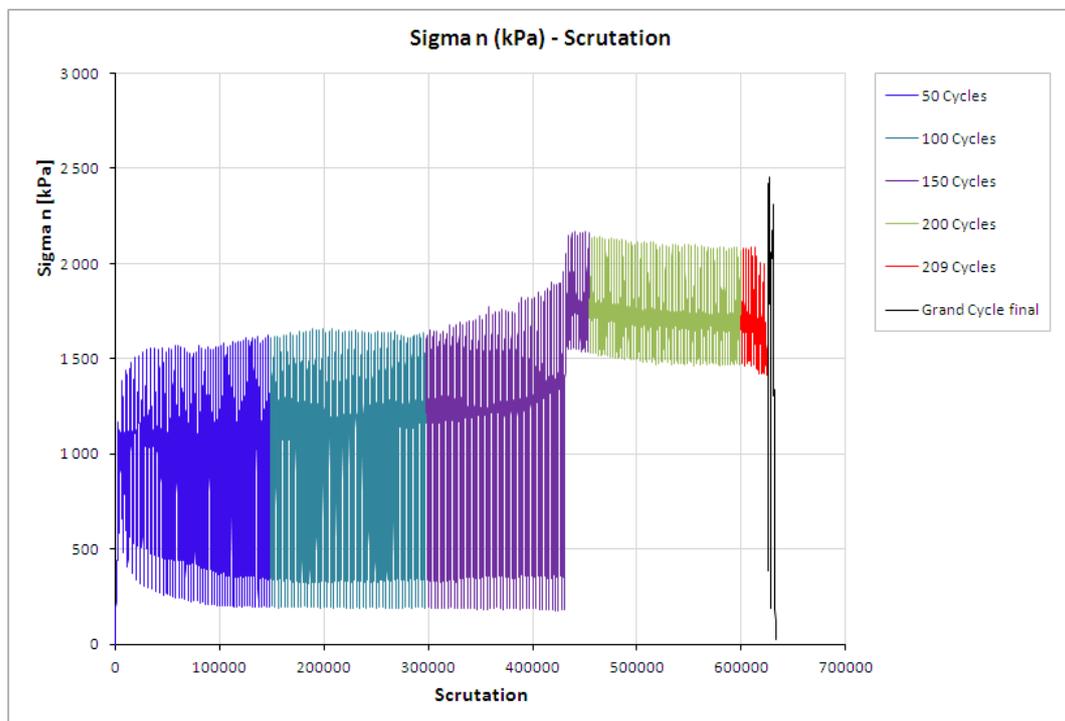


Figure 6.3.3.q : F14, contrainte normale au cours de l'essai.

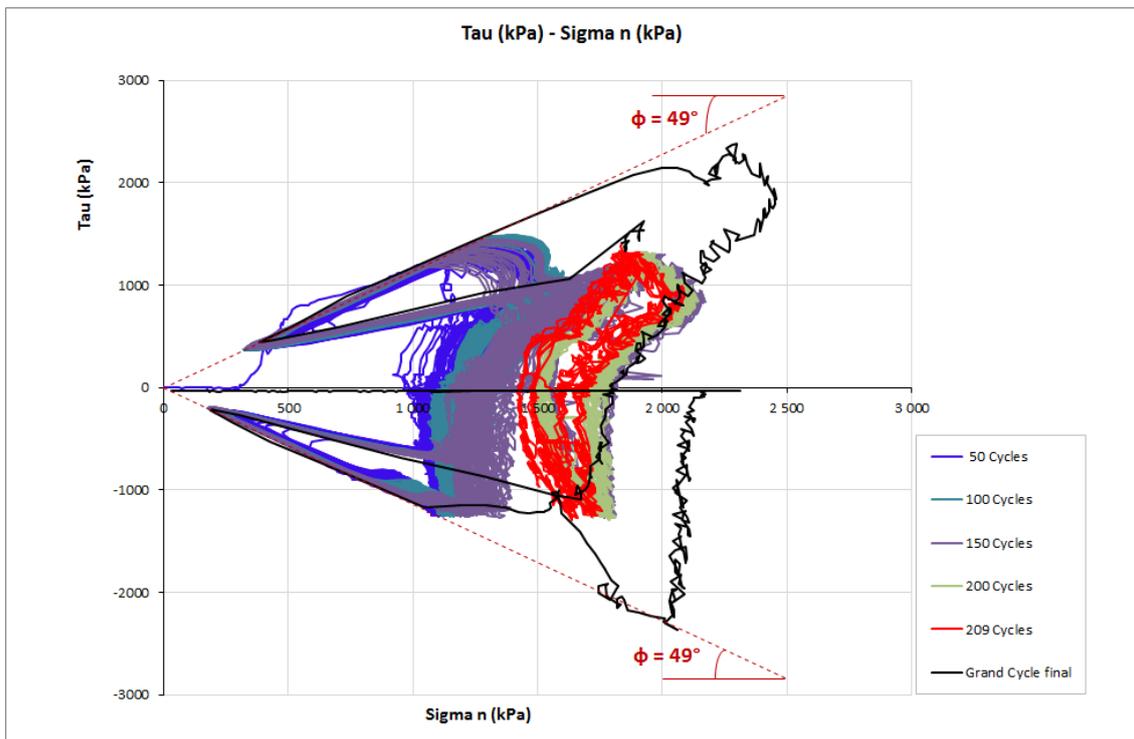


Figure 6.3.3.r : F14, Chemin de contraintes au cours de l'essai

6.3.3.4 ESSAI F16

Seuils imposés en forces de cisaillement:

$$F_{y \max} = + 0.55 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \min} = 0$$

Type d'essai: **Cycles complètement asymétriques (one-way)**

Nombre de cycles réalisés: **N=1500 cycles**

Comme c'est le cas dans tout essai réalisé à volume constant, le déplacement relatif normal est resté bloqué pendant le cisaillement, après application de la contrainte normale initiale, soit 300kPa (figure 6.3.4.s).

Au cours du cisaillement les consignes en valeur moyenne et en amplitude de contrainte de cisaillement imposées en début d'essai sont bien respectées. (Figure 6.3.4.u).

Les différentes phases du cisaillement cyclique peuvent être décrites selon les intervalles des cycles suivants :

De 0 à 100 cycles

Au démarrage du cisaillement, l'interface est sollicitée en forces de cisaillement. Au bout du troisième cycle, l'adhérence de l'interface se rompt (point B, Figure 6.3.4.w). Les épontes subissent alors un déplacement relatif tangentiel d'environ 2.5mm (Figure 6.3.4.t), requis pour ré-atteindre la consigne en contrainte de cisaillement (55% de la contrainte statique). Pour maintenir les seuils imposés en contrainte de cisaillement, les cycles se font autour de 2.5mm de déplacement relatif tangentiel. Pendant cette première phase, l'interface subit une dégradation progressive en frottement. Ce phénomène se traduit par une chute progressive en contrainte normale (Figure 6.3.4.v).

De 100 à 500 cycles

Au bout de 120 cycles, les propriétés de l'interface étant légèrement dégradées, l'interface se voit obligée d'augmenter son déplacement relatif tangentiel pour maintenir les seuils de contrainte de cisaillement imposés. Ce phénomène engendre un glissement relatif des dents triangulaire de l'interface qui provoque une tentative de dilatation de l'interface. L'interface étant empêchée de se dilater, le phénomène se traduit par une augmentation progressive de la contrainte normale au cours du glissement relatif des dents triangulaire de l'interface. Le déplacement relatif tangentiel augmente progressivement au cours du glissement de l'interface et atteint 4mm au bout de 500 cycles.

De 500 à 1000 cycles

Le glissement de l'interface mobilise un frottement qui contribue à l'augmentation de la contrainte normale sur l'interface. A la fin du 500eme cycle, le taux d'augmentation de la contrainte normale diminue. Cette réduction pourrait être due à la chute de frottement provoquée par l'écrasement des particules mobilisées au cours des cycles précédents. Le pic des contraintes normales est observé à la fin des 1000 cycles et correspond à un déplacement relatif tangentiel de 5mm, qui traduit le passage des sommets des dents triangulaires.

De 1000 à 1200 cycles

Dans cette phase, le cisaillement se fait autour de 5mm de déplacement relatif tangentiel mobilisant le pic des contraintes normal. En poursuivant l'application des cycles de cisaillement, le matériau le plus faible de l'interface (la calcarénite) se casse progressivement en particules frottantes. Le frottement de ces particules contribue à maintenir la contrainte de l'interface constante jusqu' à environ 1200 cycles.

De 1200 à 1500 cycles

Au-delà de 1200 cycles, le cisaillement de l'interface conduit à l'écrasement des grains de la calcarénite cassée qui provoque ensuite une dégradation en frottement et en contrainte normale. En cherchant à maintenir la consigne en contrainte de cisaillement, l'interface se déplace tangentiellement. Etant privé de frottement l'interface peine à trouver la consigne et provoque un grand déplacement instantané jusqu' à la limite de sécurité (50mm). Une chute brutale en contrainte normale est observée au bout de 1500 cycles (Figure 6.3.4.u).

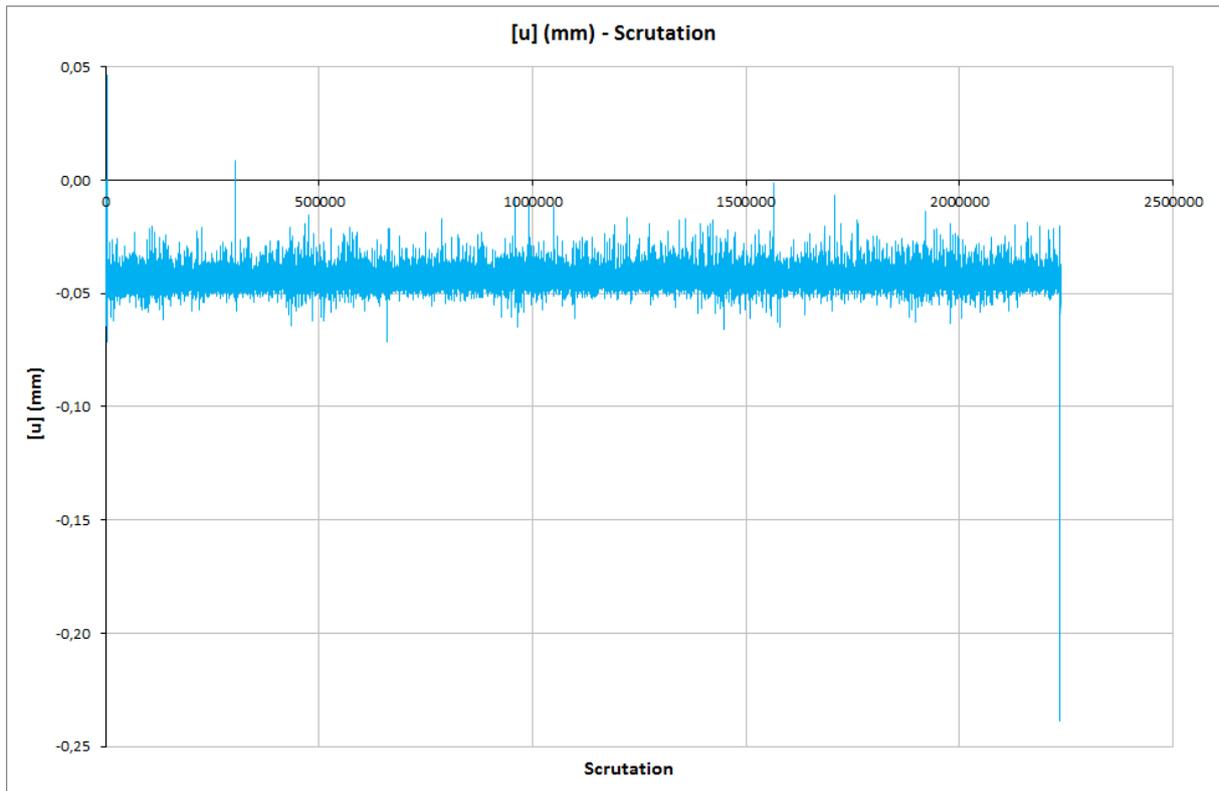


Figure 6.3.3.s : F16, déplacement relatif normal au cours de l'essai.

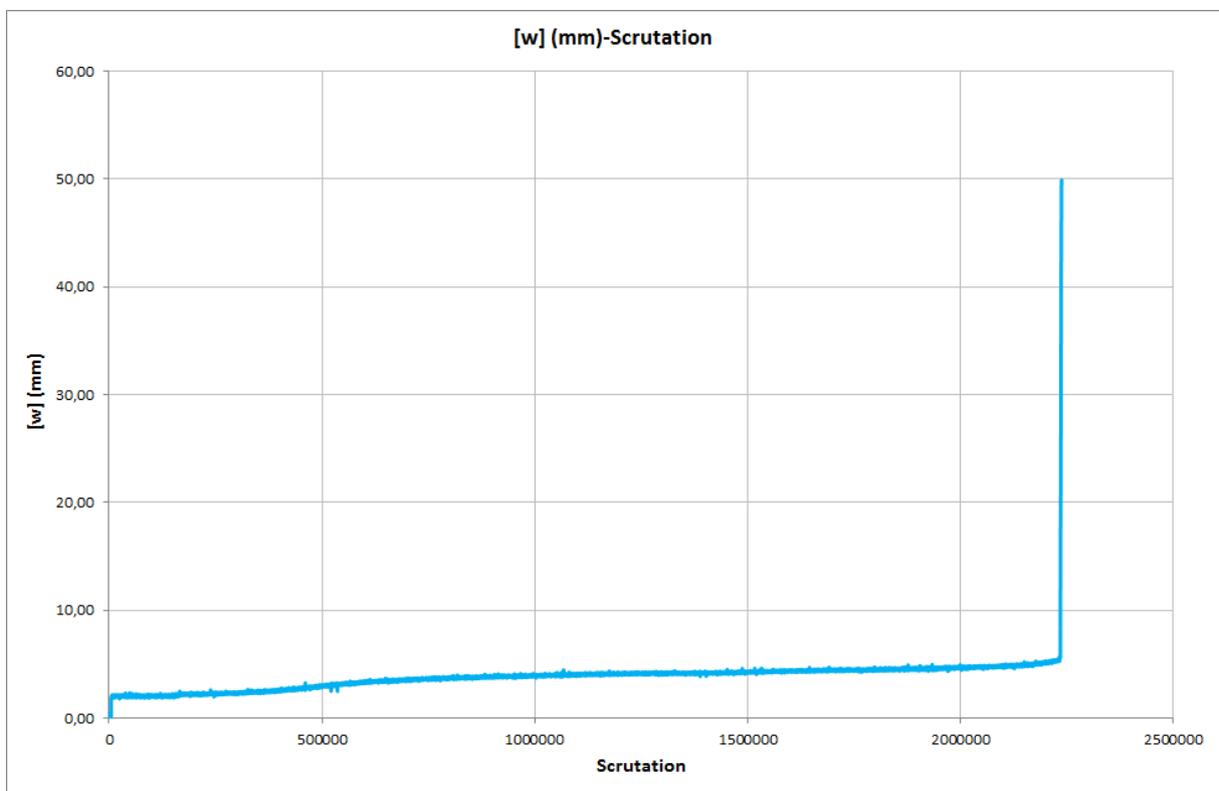


Figure 6.3.3.t : F16, déplacement relatif tangentiel au cours de l'essai.

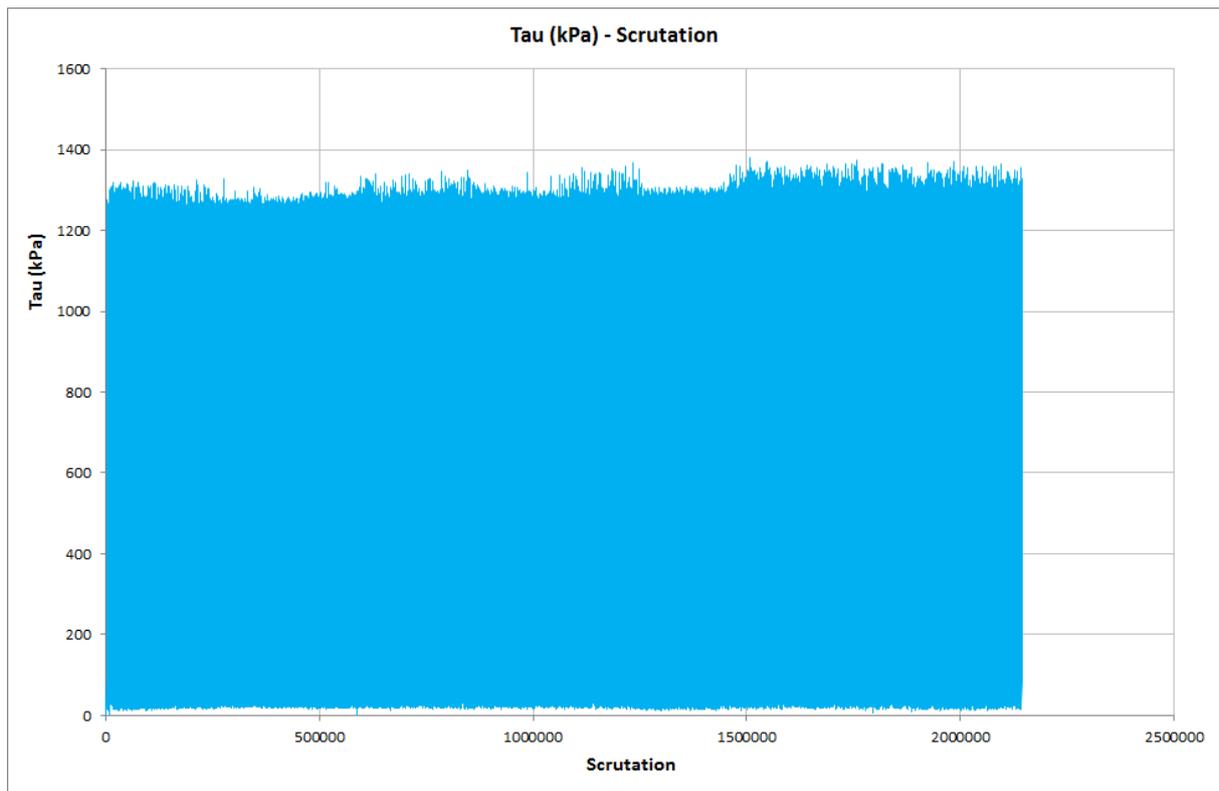


Figure 6.3.3.u : F16, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai.

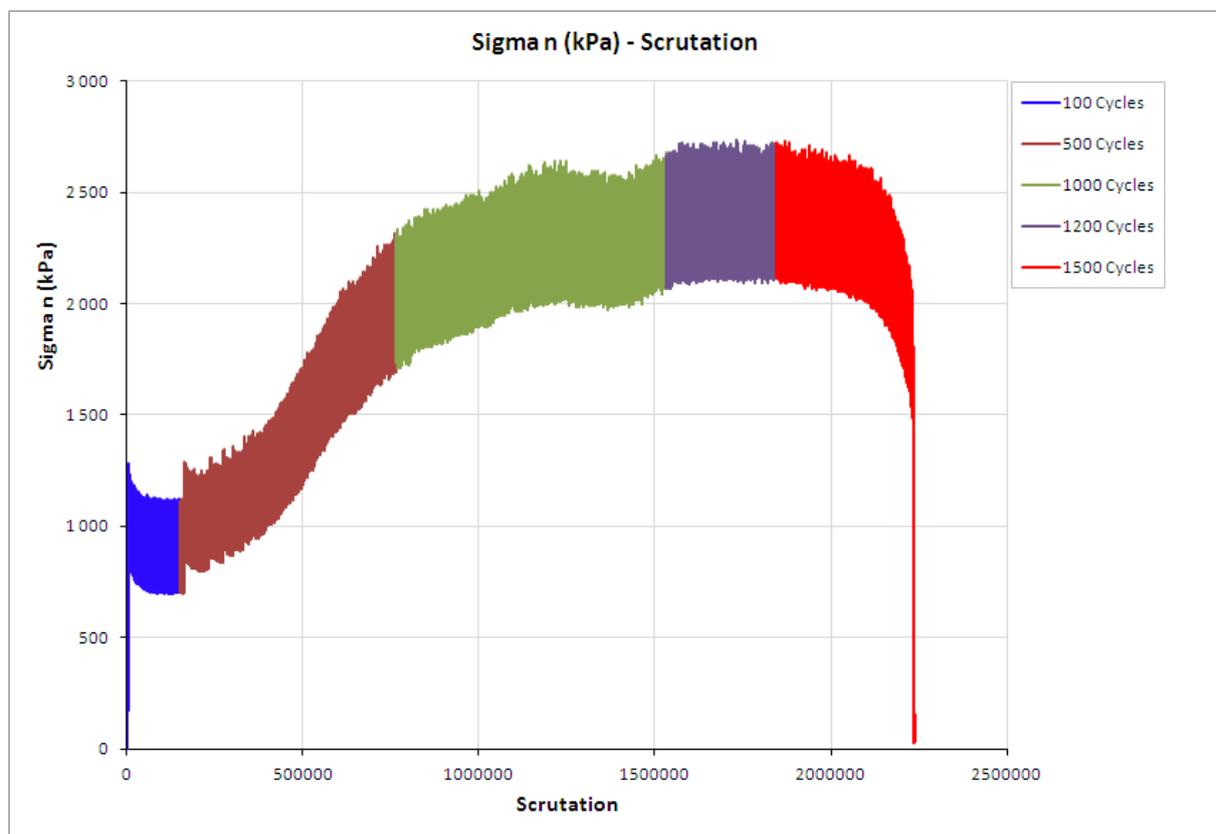


Figure 6.3.3.v : F16, contrainte normale au cours de l'essai.

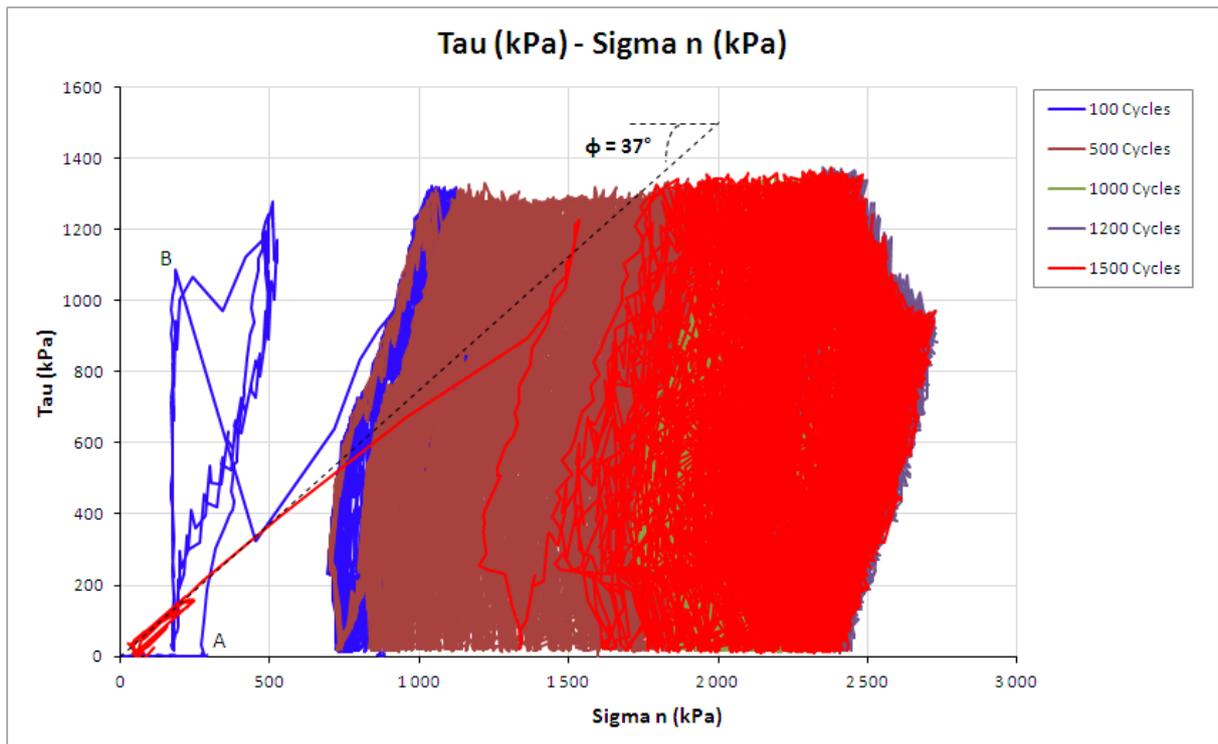


Figure 6.3.3.w : F16, chemin de contraintes au cours de l'essai

6.3.4 AUTRES ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT CYCLIQUE REALISES

Il s'agit des essais F8, F9, et F15.

6.3.4.1 ESSAI F8

Seuils imposés en forces de cisaillement:

$$F_{y \max} = + 0.40 \times F_{y \text{ monot}}$$

$$F_{y \min} = - 0.40 \times F_{y \text{ monot}}$$

Type d'essai: 54 **Cycles complètement symétriques (two-way), puis grand cisaillement direct final**

Nombre de cycles réalisés: N= **54 cycles**, puis grand cisaillement direct final.

La figure 6.3.4.a indique la sollicitation en contrainte de cisaillement (ou plutôt en force de cisaillement) appliquée à l'échantillon, tandis que la figure 6.3.4.b montre que la consigne de volume constant a bien été satisfaite pendant les 38 premiers cycles, ce qui n'est pas le cas pour les 16 derniers cycles. De même, la consigne en contrainte de cisaillement n'a été appliquée que pendant les 38 premiers cycles. Si l'on observe maintenant l'évolution de la contrainte normale au cours de l'essai (figure 6.3.4.c), on constate qu'elle croît rapidement dès le premier cycle, puis subit une lente décroissance au cours des suivants, jusqu'au 38^{ème}, au cours de laquelle elle s'effondre. Ceci explique

l'effondrement concomitant de la contrainte de cisaillement à ce stade de l'essai. De plus, après ces 38 cycles corrects en contrainte de cisaillement, la consigne en contrainte de cisaillement ne peut plus être satisfaite, d'où le déplacement relatif normal croissant à partir du 39^{ème} cycle (figure 6.3.4.b), ainsi que le déplacement relatif tangentiel (figure 6.3.4.d) également rapidement croissant.

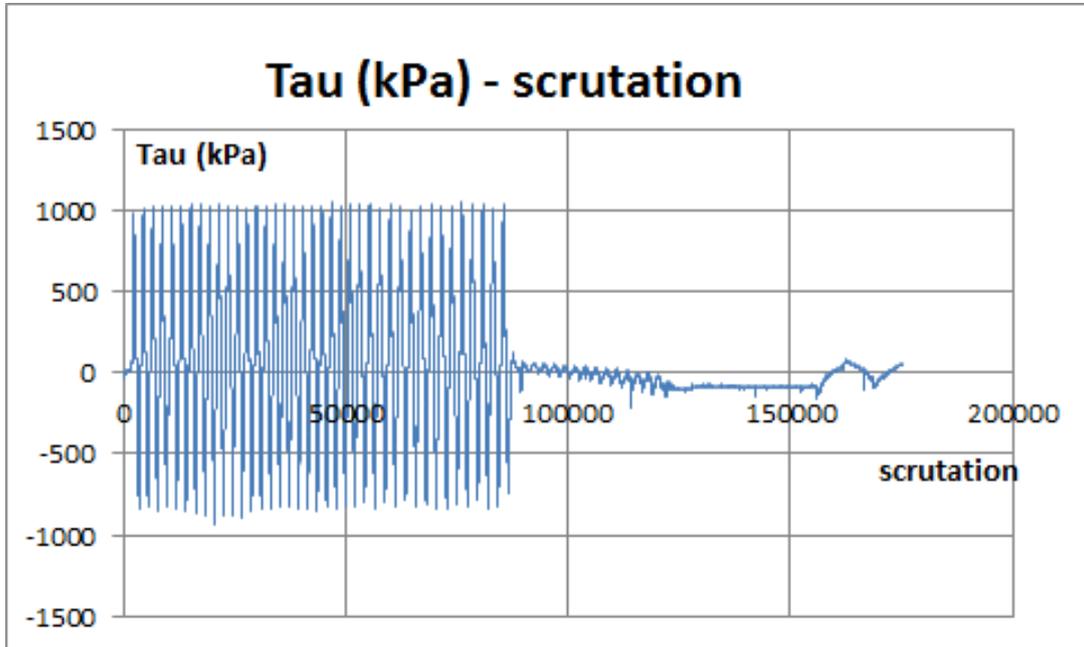


Figure 6.3.4.a : F8, contrainte de cisaillement imposée au cours de l'essai.

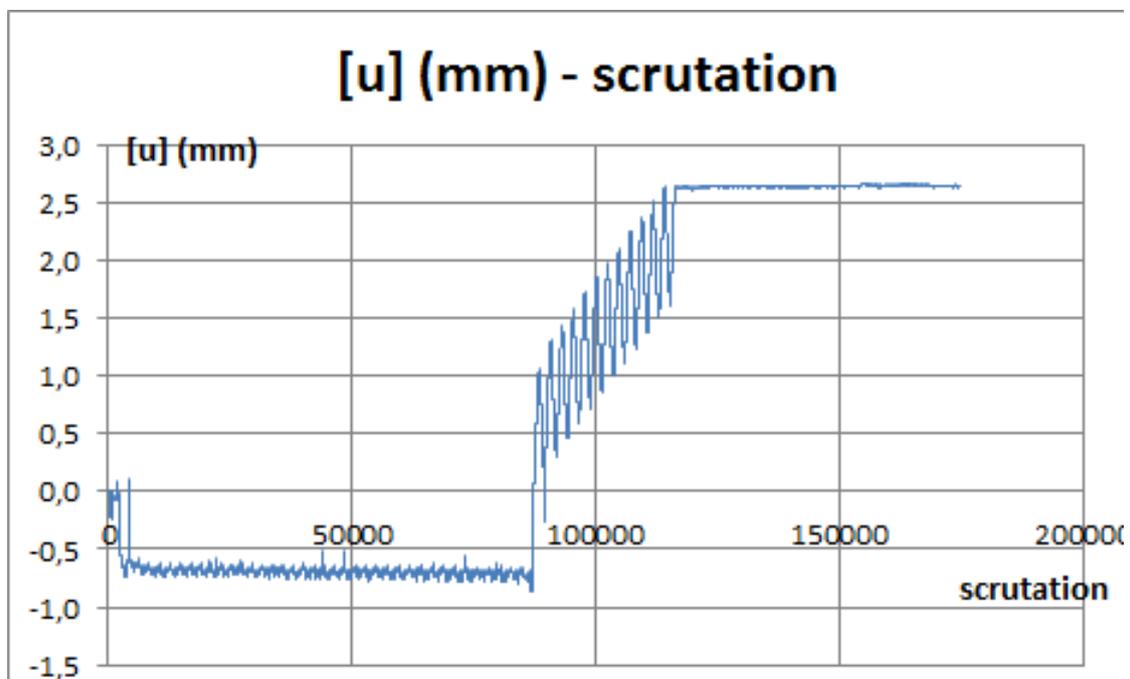


Figure 6.3.4.b : F8, déplacement relatif normal au cours de l'essai.

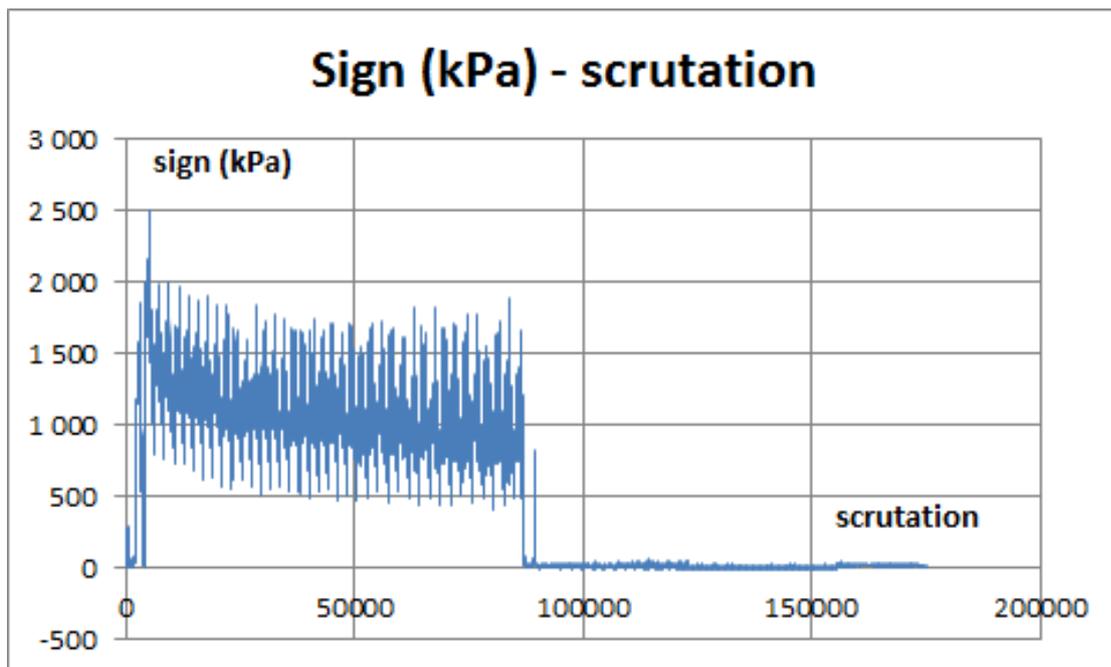


Figure 6.3.4.c : F8, contrainte normale au cours de l'essai.

Enfin, la figure 6.3.4.e fournit l'évolution des boucles d'hystérésis des cycles dans le plan de contraintes. La contrainte normale diminuant lorsque le nombre de cycles s'accroît, il est intéressant de constater que l'effondrement de la résistance de l'interface calcarénite-coulis intervient lorsque les extrémités supérieure et inférieure du cycle correspondent à un angle de frottement d'interface mobilisé voisin de 45° . La valeur de cet angle a déjà été notée lors des essais précédemment décrits.

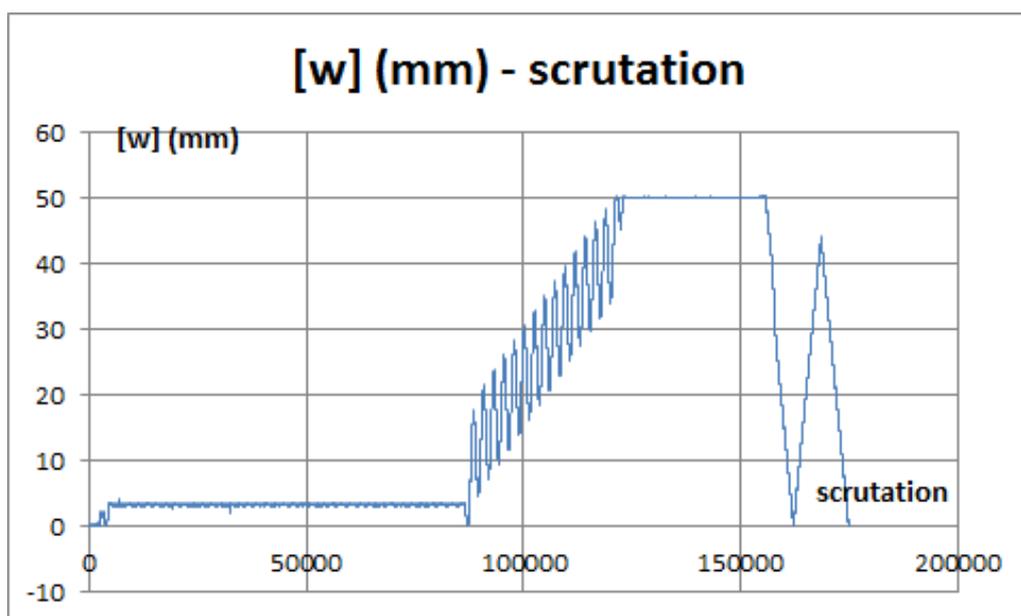


Figure 6.3.4.d : F8, déplacement relatif tangentiel au cours de l'essai.

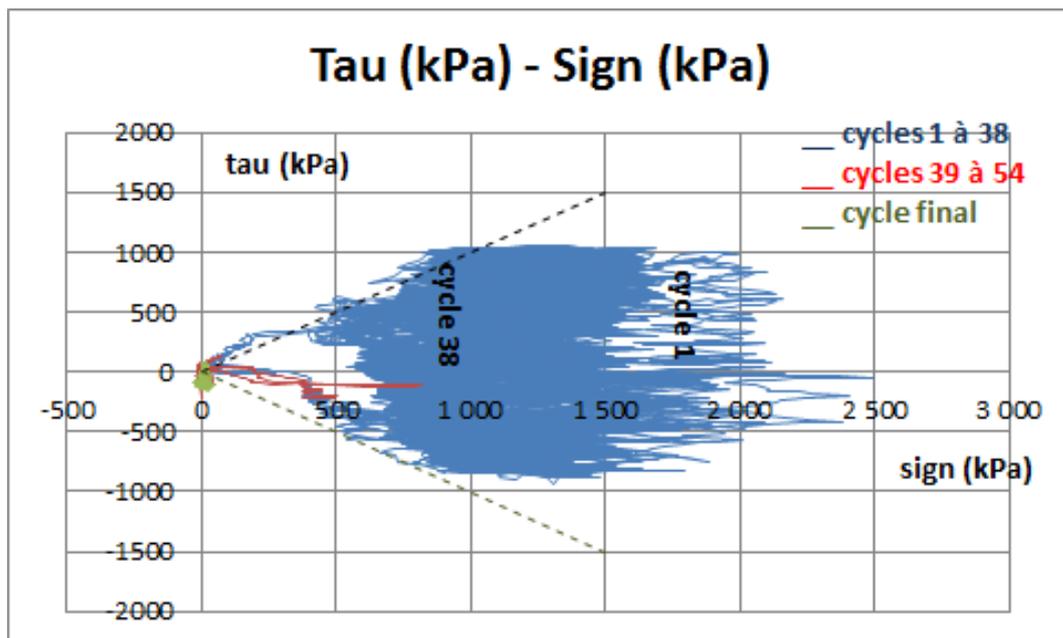


Figure 6.3.4.c : F8, chemin de contraintes au cours de l'essai.

6.3.4.2 ESSAI F9

Seuils imposés en déplacement relatif tangentiel (grands déplacements, dépassant largement la période des rainures dans la calcarénite):

$[w]_{\max} = + 12 \text{ mm}$

$[w]_{\min} = - 50 \text{ mm}$

Type d'essai: **Cycle dissymétrique (one-way)**

Nombre de cycles réalisé: N= **1 cycle**, sans grand cisaillement direct final, inutile.

Cet essai pose problème, ou du moins montre une très grande hétérogénéité de résistance entre les échantillons de calcarénite-coulis, vraisemblablement de calcarénite. Il s'agit d'un essai à volume constant, comme en atteste l'histoire du déplacement relatif normal pendant l'essai (figure 6.3.4.f). Notamment le déplacement relatif normal correspondant à l'application de la contrainte normale initiale (-0,07mm) se situe dans la moyenne des valeurs observées sur les autres échantillons (-0,03 mm à -0,12mm).

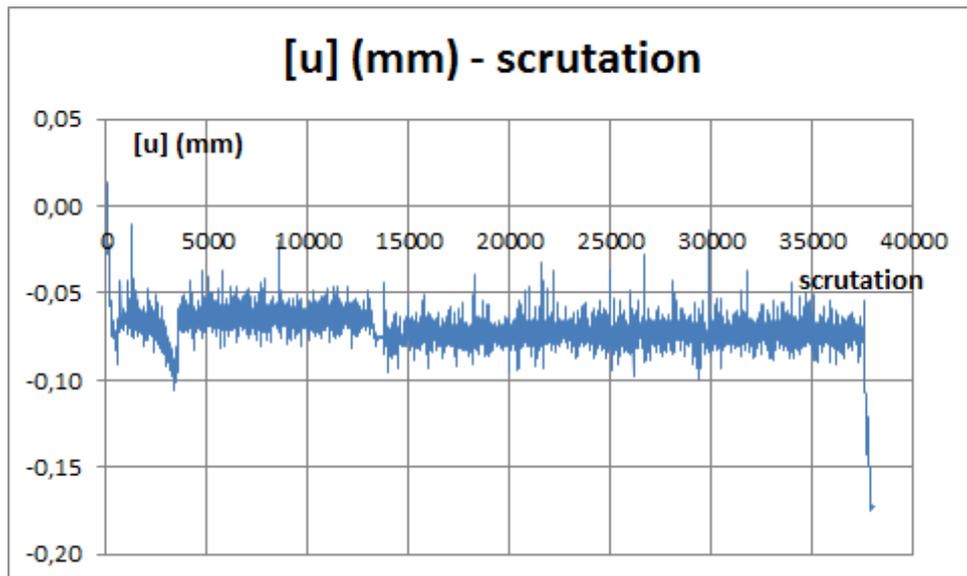


Figure 6.3.4.f : F9, déplacement relatif normal au cours de l'essai.

Le déplacement relatif tangentiel imposé pendant l'essai consiste en un très grand cycle de cisaillement, dont l'amplitude dépasse largement la période des rainures (jusqu'à 50 mm, figure 6.3.4.g). La figure 6.3.4.h montre que la contrainte normale développée pendant l'essai reste toujours inférieure à la contrainte normale initiale (de l'ordre de 0,3MPa), ce qui est très étonnant si on la compare à celle qu'exhibent les autres essais à volume constant. Bien entendu, l'histoire de la contrainte de cisaillement montre également des valeurs extrêmement faibles (inférieures à 0,3MPa, en accord avec celles de la contrainte normale).

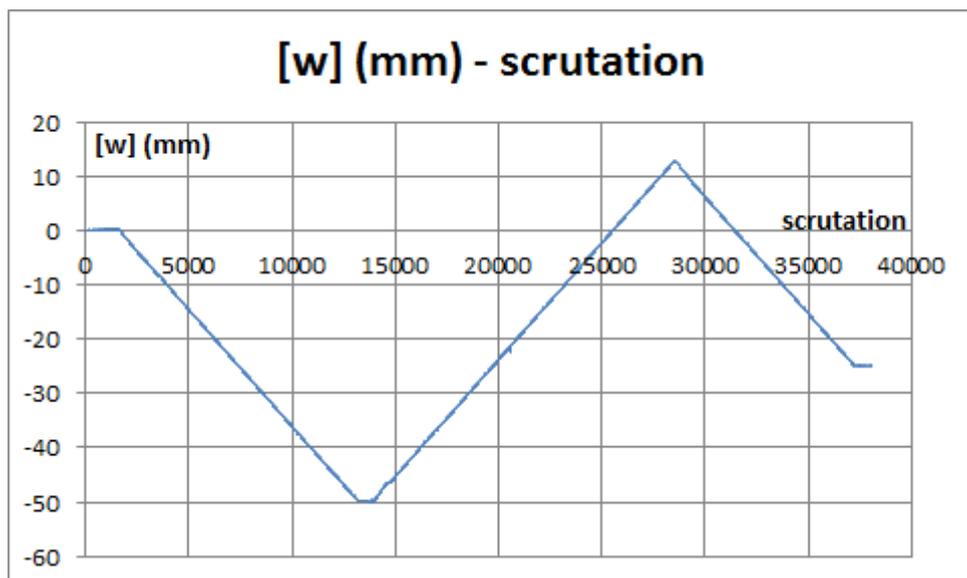


Figure 6.3.4.g : F9, déplacement relatif tangentiel imposé au cours de l'essai.

L'examen du chemin de contraintes pendant l'essai (figure 6.3.4.j) vient confirmer le caractère anormal du comportement de cet échantillon. En effet, une contrainte de cisaillement initiale existe, environ 0,08MPa, avant application de la contrainte normale nominale, et l'application de la contrainte normale nominale génère un accroissement de contrainte de cisaillement de 0,03MPa, soit une contrainte de cisaillement de 0,11MPa.

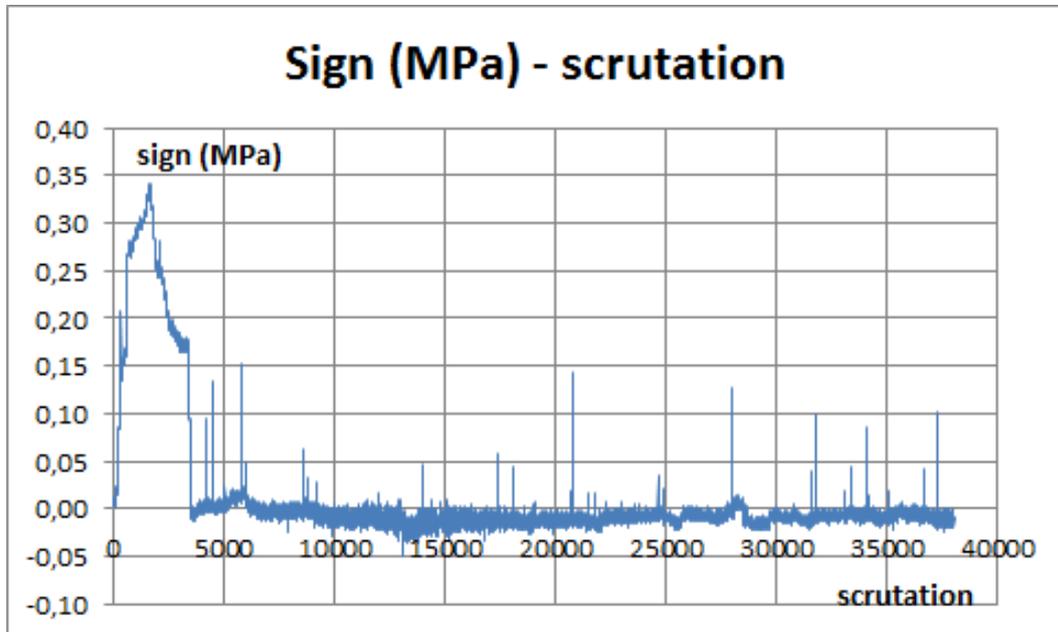


Figure 6.3.4.h : F9, contrainte normale au cours de l'essai.

Par ailleurs, l'application de la contrainte normale initiale (0,34MPa) induit un accroissement de la contrainte de cisaillement, jusqu'à 0,11MPa, bien que le déplacement relatif tangentiel (contrôlé), reste rigoureusement nul (figure 6.3.4.g).

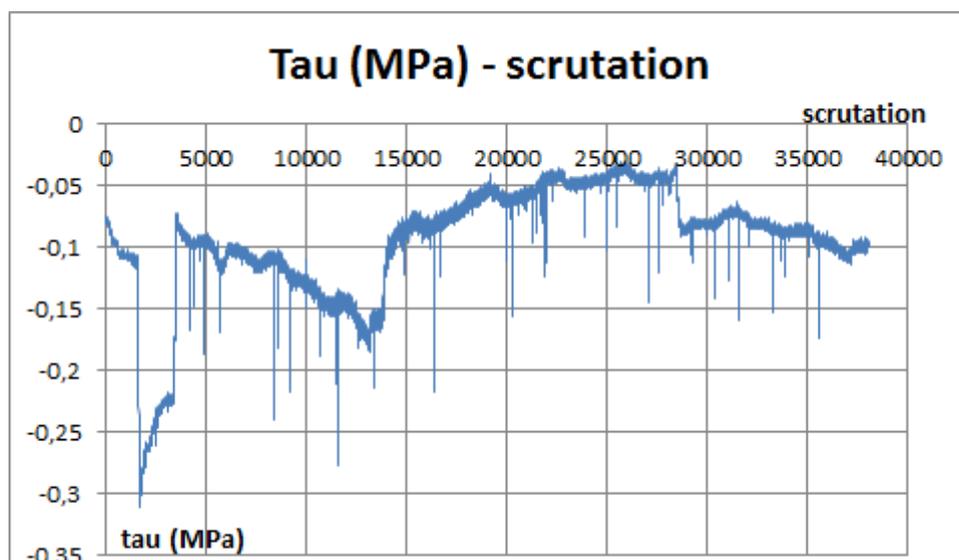


Figure 6.3.4.i : F9, mobilisation de la contrainte de cisaillement au cours de l'essai

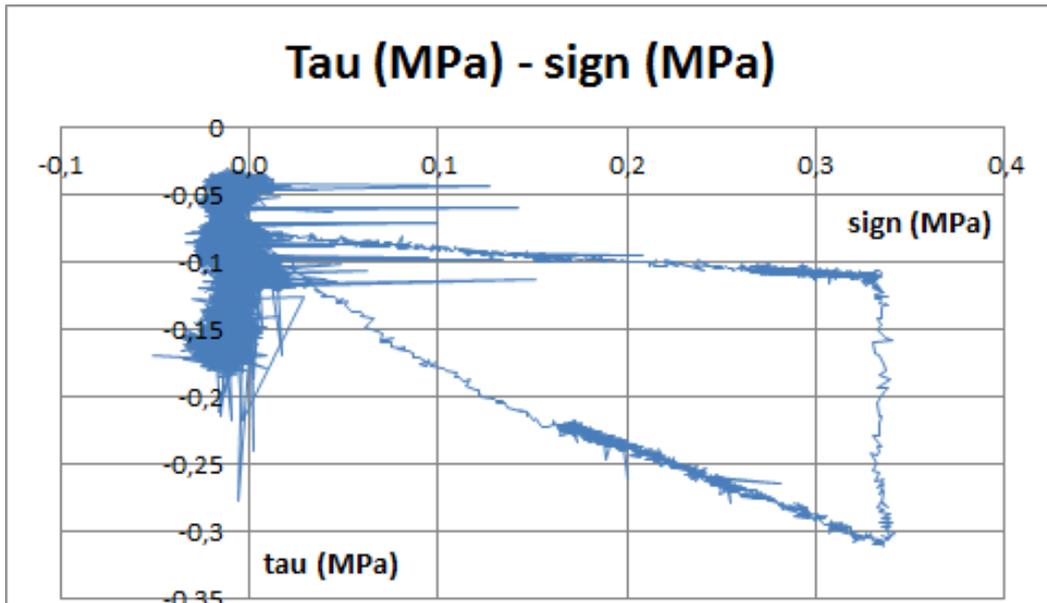


Figure 6.3.4.j : F9, chemin de contraintes au cours de l'essai.

On pourrait ainsi suspecter une inclinaison du plan moyen d'interface sur le plan de cisaillement imposé par la machine, de l'ordre de $\text{Arctg}\left(\frac{0,03}{0,34}\right) \approx 5^\circ$, donc voisin de la pente des rainures ($5,7^\circ$). Les figures 6.3.4.k et 6.3.4.l de mobilisation des contraintes confirment que l'effet du déplacement relatif tangentiel n'est que de faire décroître les contraintes normale et de cisaillement. Alors comment interpréter ces résultats de l'essai F9? Il est clair que cet essai présente un défaut opératoire, et qu'il ne doit pas être retenu pour caractériser les interfaces calcarénite-coulis en cisaillement direct cyclique. Une explication possible donnée ci-dessus est la non-coïncidence du plan moyen de l'interface et du plan de cisaillement imposé par la machine (figure 6.3.4.m).

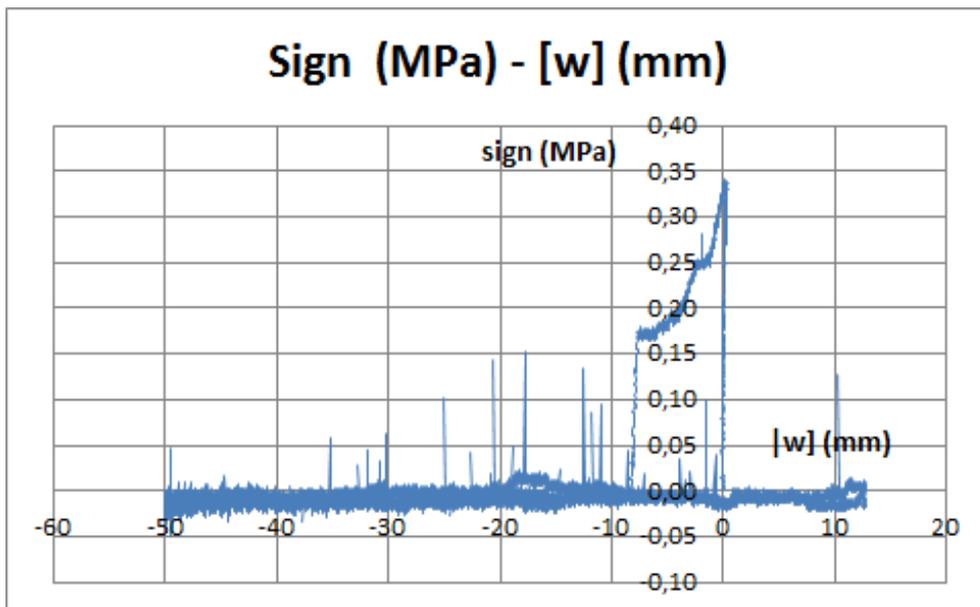


Figure 6.3.4.k : F9, mobilisation de la contrainte normale au cours de l'essai.

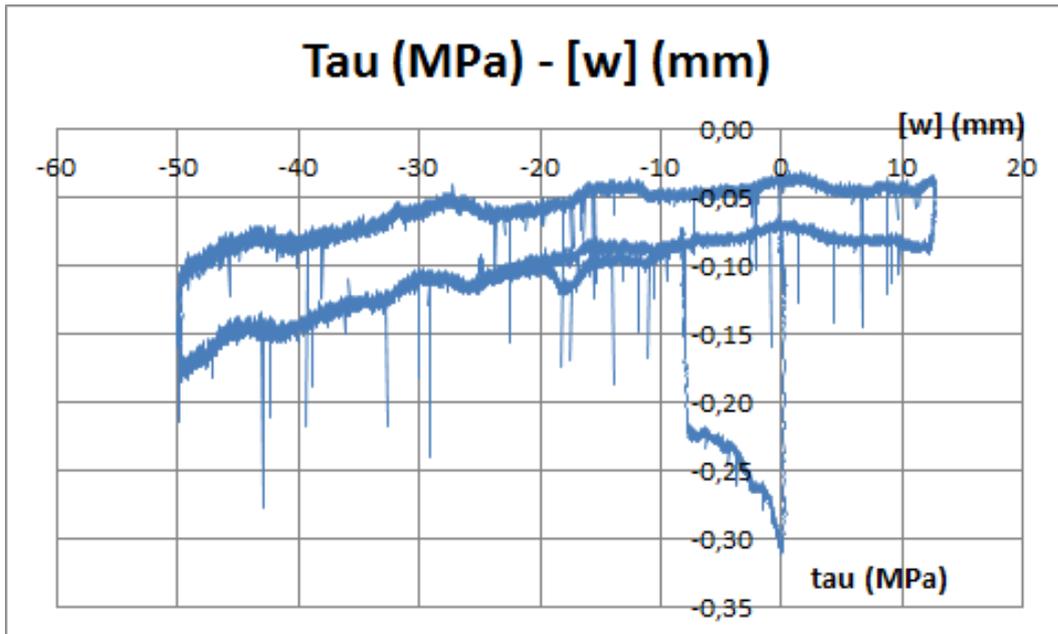


Figure 6.3.4.l : F9, mobilisation de la contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

Dans ce cas, d'une part, l'application de la contrainte normale initiale sans déplacement relatif tangentiel donne naissance à une contrainte de cisaillement (fait observé figure 6.3.4.l), et d'autre part, le cisaillement crée une tendance contractante (apparente et parasite), qui contribue à réduire le niveau de contrainte normale (fait observé figure 6.3.4.k), pour autant que le plan moyen de l'interface soit suffisamment incliné sur le plan de cisaillement imposé par la machine (figure 6.3.4.m).

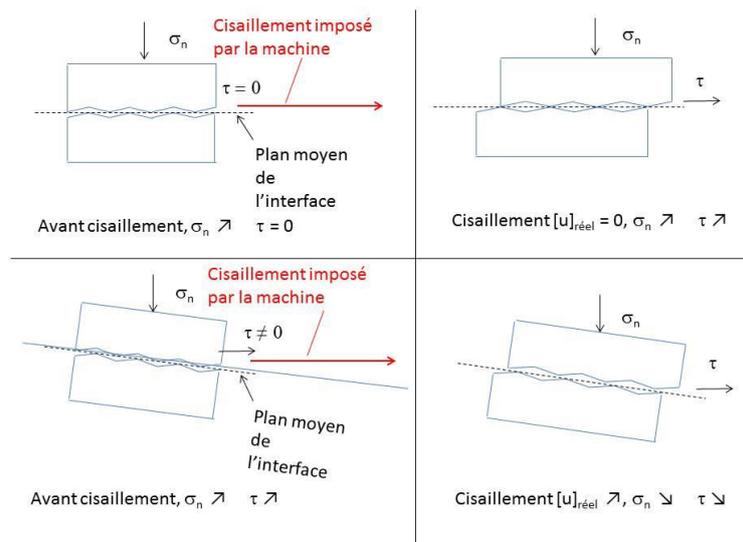


Figure 6.3.4.m : F9, en haut, interface correctement positionnée. En bas, comment une interface mal positionnée dans la machine de cisaillement peut donner des résultats curieux, mais parfaitement logiques ...

On constate même une contrainte normale en légère traction, ce qui n'a évidemment rien de physique, mais est la conséquence de l'allègement du poids de l'ensemble vertical mobile qui est alors comme « suspendu » à son capteur de force. Il est aisé de calculer l'inclinaison limite du plan moyen d'interface sur le plan de cisaillement machine, à partir duquel ce phénomène se produit : c'est l'angle α_{lim} d'inclinaison des rainures sur le plan moyen d'interface, qui vaut :

$$\alpha_{lim} = \text{Arctg} \left(\frac{0,5 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \right) = 5.7^\circ$$

Quoique faible, cet angle peut être comparé à des angles de rotation relative entre épontes dans une machine de cisaillement direct classique (Boulon, 1995). C'est le même ordre de grandeur. Reste à savoir l'origine de ce défaut dans notre essai. Ce peut être un mauvais scellement des épontes dans les boîtes internes, ou un mauvais blocage des boîtes internes dans les boîtes externes avant l'essai, et il n'est pas possible de choisir entre ces deux défauts.

6.3.4.3 ESSAI F15

Seuils imposés en déplacement relatif tangentiel (grands déplacements, dépassant largement la période des rainures dans la calcarénite).:

[w]_{max} = + 15 mm

[w]_{min} = + 50 mm

Type d'essai: **Cycle complètement dissymétrique (one-way)**

Nombre de cycles réalisés: N= **2 cycles**, sans grand cisaillement direct final, inutile.

L'essai F15 est très comparable à l'essai F9, quoique complètement dissymétrique. En outre, cet essai n'a pas présenté le défaut constaté sur l'essai F9, vraisemblablement la non-coïncidence du plan moyen d'interface et du plan de cisaillement imposé par la machine. La figure 6.3.4.n indique le déplacement relatif tangentiel imposé au cours de l'essai, de très grande amplitude (comme F9).

La figure 6.3.4.o montre le déplacement relatif normal au cours de l'essai (à volume constant), -0,07 mm après application de la contrainte normale nominale, 0,3MPa, ce qui est tout à fait comparable aux valeurs des autres essais. La tendance dilatante de l'interface calcarénite-coulis se manifeste pendant le cisaillement par une augmentation de contrainte normale (figure 6.3.4.p) jusqu'à 1800kPa, tandis que la contrainte de cisaillement est mobilisée jusqu'à 1700kPa (figure 6.3.4.q).,

Enfin, le chemin de contraintes représenté figure 6.3.4.r fait apparaître des angles de frottement d'interface de pic de 49 à 58°, et de palier de 43°. Au terme d'un déplacement relatif tangentiel de 30 mm environ, l'interface a perdu toute résistance.

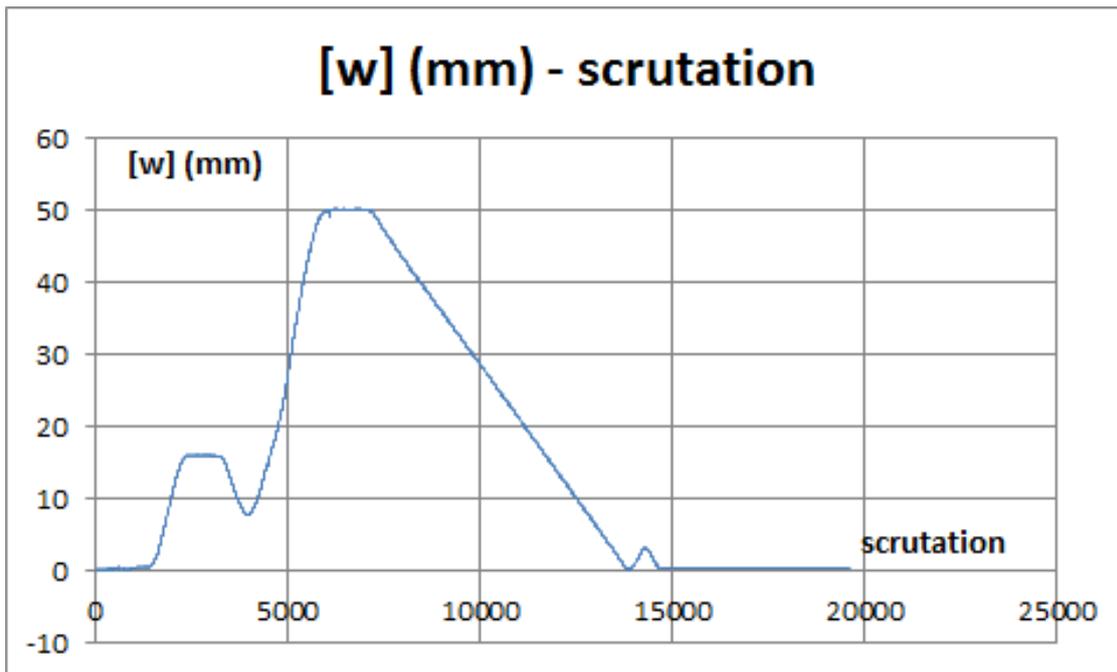


Figure 6.3.4.n : F15, déplacement relatif tangentiel imposé au cours de l'essai.

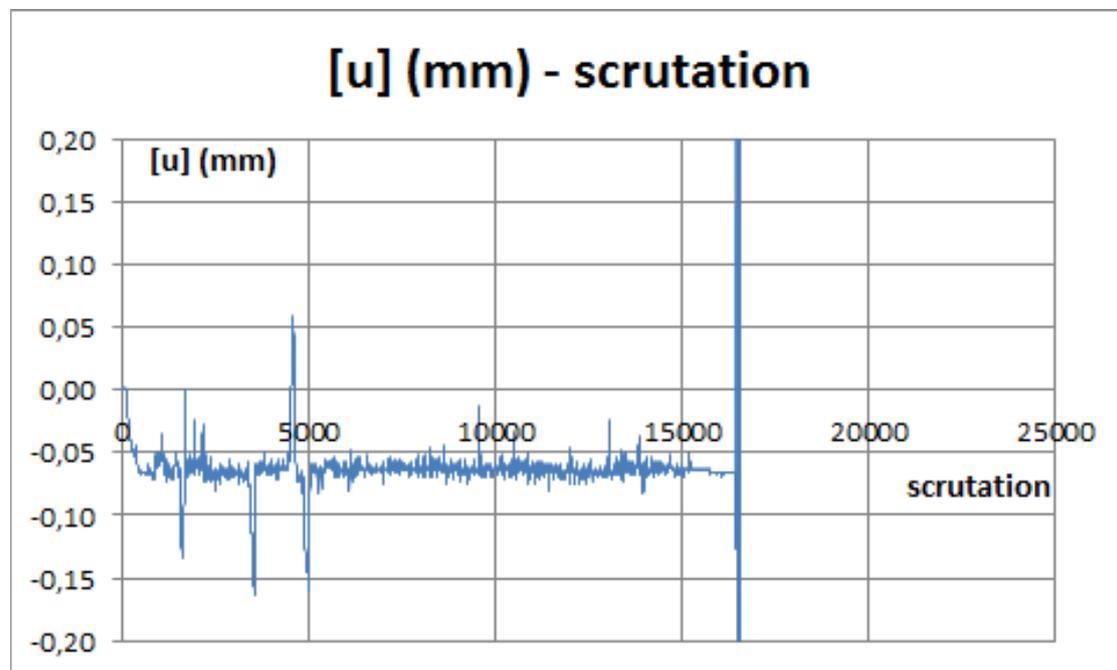


Figure 6.3.4.o : F15, déplacement relatif normal au cours de l'essai.

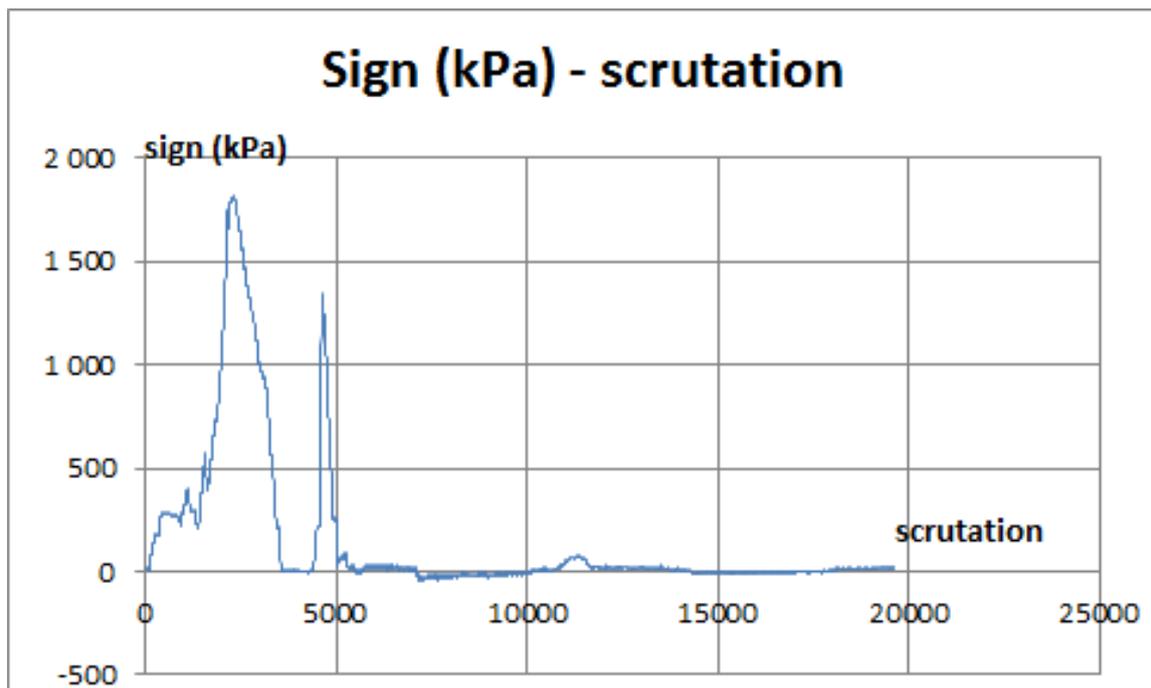


Figure 6.3.4.p : F15, mobilisation de la contrainte normale au cours de l'essai.

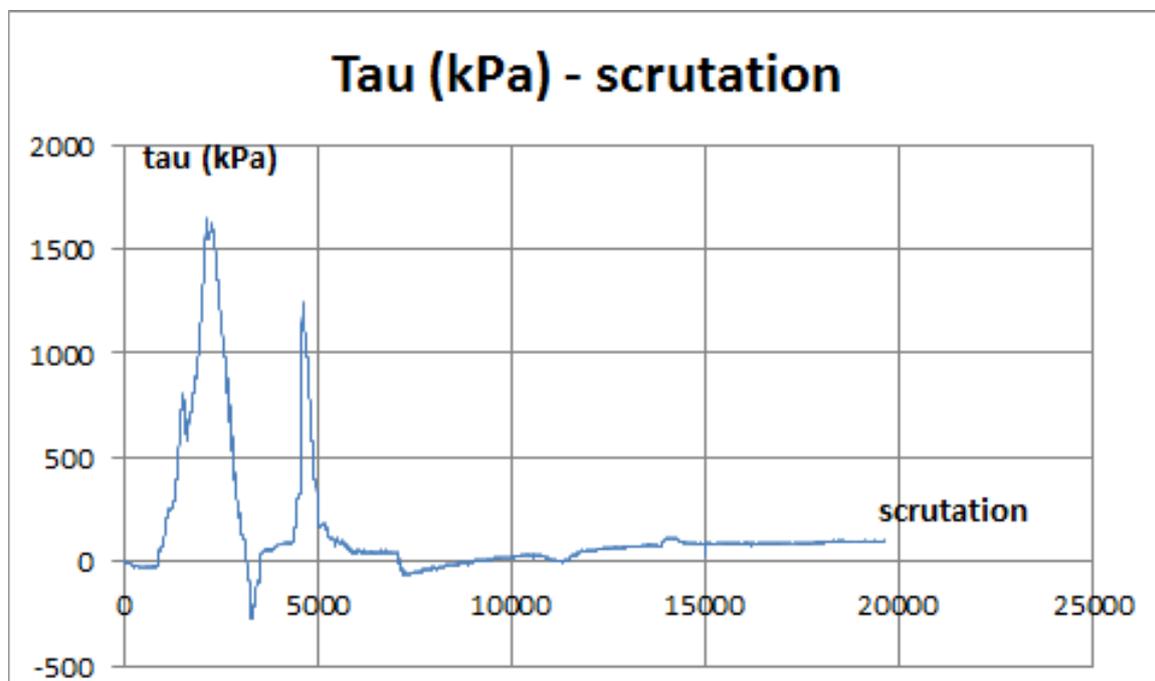


Figure 6.3.4.q : F15, mobilisation de la contrainte de cisaillement au cours de l'essai.

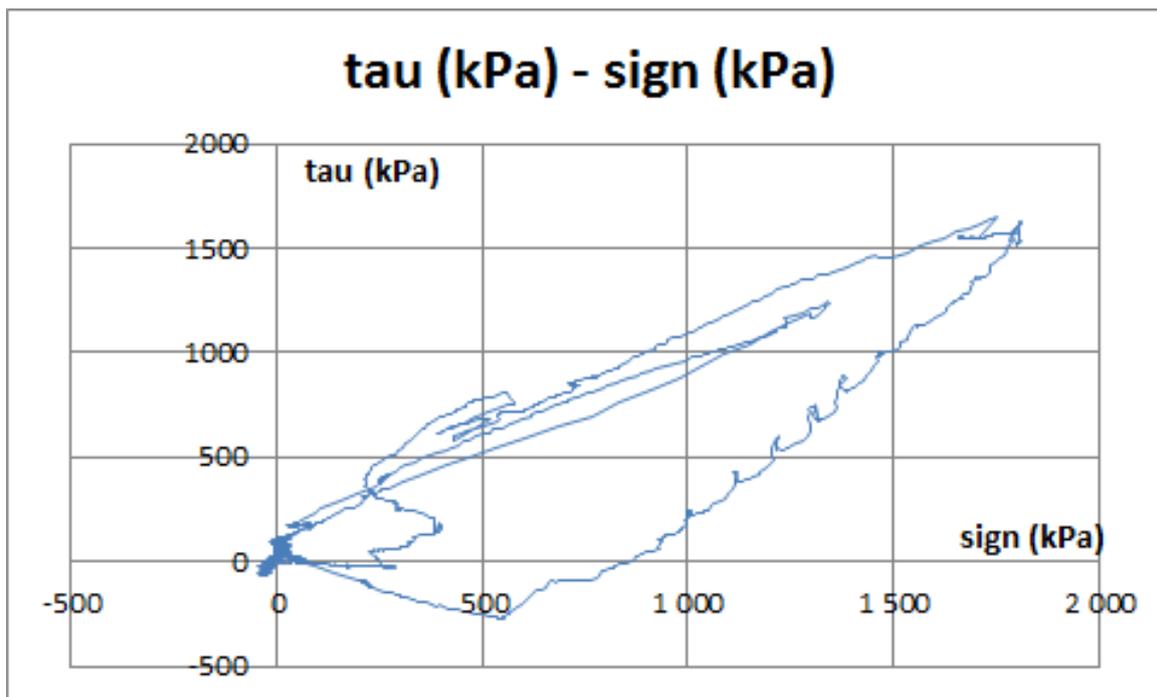


Figure 6.3.4.j : F15, chemin de contraintes au cours de l'essai.

7 ANALYSE ET SYNTHÈSE DES RESULTATS

La compréhension des propriétés de l'interface calcarénite – coulis soulève de nombreuses questions parmi lesquelles :

- Quelle est la résistance ultime (en monotone) de l'interface calcarénite-coulis lisse ?
- Quelle est la résistance ultime (en monotone) de la même interface rainurée ?
- Quel est le (quels sont les) mode(s) de rupture de l'interface calcarénite rainurée-coulis ?
- Quel est l'apport des chemins de cisaillement à volume constant ?
- Comment caractériser la dégradation cyclique de l'interface rainurée sur chemins de cisaillement à volume constant ?
- Quelle variabilité spatiale est imaginable à partir de cette série réduite d'essais ?
- Comment passer de ces essais sur « modèle réduit de contact calcarénite-coulis » testé en laboratoire, à la réalité du contact le long des pieux ?

Bien que cette série d'essais doive être considérée comme exploratoire, et que les essais cycliques réalisés soient les premiers sur la BCR3D, on peut tenter d'apporter quelques éléments de réponse.

7.1 RESISTANCE ULTIME DE L'INTERFACE CALCARENITE LISSE – COULIS EN CISAILLEMENT MONOTONE

Plutôt que de parler d'essais monotones, on devrait utiliser l'expression plus représentative et plus précise, quoique lourde :

« essais de cisaillement à grand déplacement relatif tangentiel imposé, aller et retour ».

Les essais F9 et F12 permettent de répondre à cette question. Dans l'essai F9, la calcarénite est rainurée, et le chemin est également à volume constant, mais le plan moyen de l'interface est (opportunément et involontairement) incliné sur le plan de cisaillement imposé par la machine. Dans l'essai F12, la surface de la calcarénite est lisse, et le chemin de cisaillement est à volume constant. Il est par ailleurs intéressant de confronter les résultats issus de F9 et F12, à ceux de F1, à contrainte normale constante (CNC) interprétés localement sur l'interface calcarénite - coulis.

7.1.1 : Exploitation des essais F9 et F12

La figure 7.1.a rassemble les résultats en termes de résistance, issus des essais F9 et F12. L'essai F9, pour lequel le plan moyen d'interface était incliné sur le plan de cisaillement imposé par la machine, d'un angle probablement très voisin de la pente des rainures, soit $5,7^\circ$, connaît une décroissance de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement dès le tout début du cisaillement. On peut considérer que le début de cette décroissance correspond à un cisaillement à la contrainte nominale, $0,34\text{MPa}$, qui mobilise une contrainte de cisaillement de $0,3\text{MPa}$. L'angle de frottement d'interface correspondant (41°) est une valeur de palier, car l'interface a déjà été rompue.

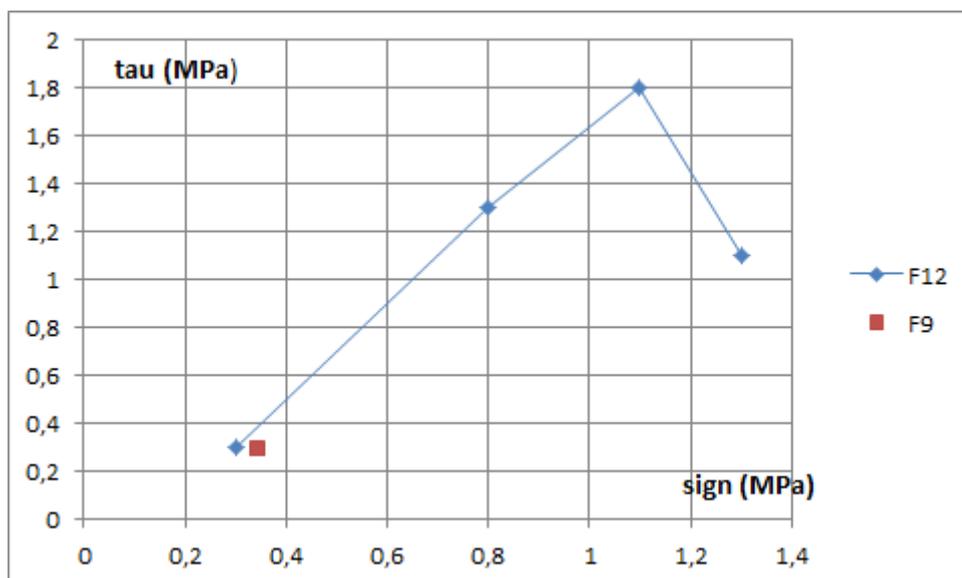


Figure 7.1.a : Résistance de l'interface calcarénite lisse-coulis, sur chemins CNC (F9) et VC (F12) monotones

Lors de l'essai F12 (interface lisse, volume constant), le début du chemin de contraintes affiche des valeurs très proches des précédentes, puis les contraintes normale et de cisaillement croissent fortement, sans doute parce que des particules, détachées de la calcarénite, ont créé une tendance dilatante entre le coulis et la calcarénite.

On arrive ainsi à un point extrême dans le plan de contraintes ($\sigma_n = 1,1\text{MPa} - \tau = 1,8\text{MPa}$, valeurs de pic, angle de 59°), puis à une situation de palier ($\sigma_n = 1,3\text{MPa} - \tau = 1,1\text{MPa}$, valeurs de palier, angle de 40°).

Pour parvenir à la rupture, à contrainte normale constante et pour l'interface lisse, le déplacement relatif tangential est infime (figure 6.3.4.I), il s'agit d'un contact très fragile.

7.1.2 : Confrontation aux résultats de l'essai F1 (CNC) interprétés localement

L'essai F1 concerne une interface calcarénite rainurée – coulis, sur chemin CNC, et mérite d'être mis en regard des résultats précédents. On peut observer ce qui se passe localement dans cet essai, en supposant que le plan moyen d'interface est confondu avec le plan de cisaillement imposé par la machine. Lors d'un petit déplacement relatif tangential, et donc avec une dégradation du contact infime, une partie seulement de l'aire de l'interface (\approx la moitié) est en contact (figure 7.1.b). Par ailleurs, l'inclinaison des faces des dents sur l'horizontale ou sur le plan de cisaillement machine est connue ($\text{Arctg}(\frac{0,5}{5}) = 5,7^\circ$). Il est donc possible de déterminer, par les classiques formules de Mohr, les contraintes normale et de cisaillement agissant localement sur les faces (lisses) des dents sollicitées, à partir des mêmes contraintes mesurées globalement sur la machine. Le tableau 7.1.1 résume cette comparaison. L'ordre de grandeur des angles d'interface, de pic et de palier, est conforme aux valeurs déterminées par ailleurs (§ 7.1.1), et les contraintes locales sont évidemment environ 2 fois plus élevées que les contraintes globales en cisaillement.

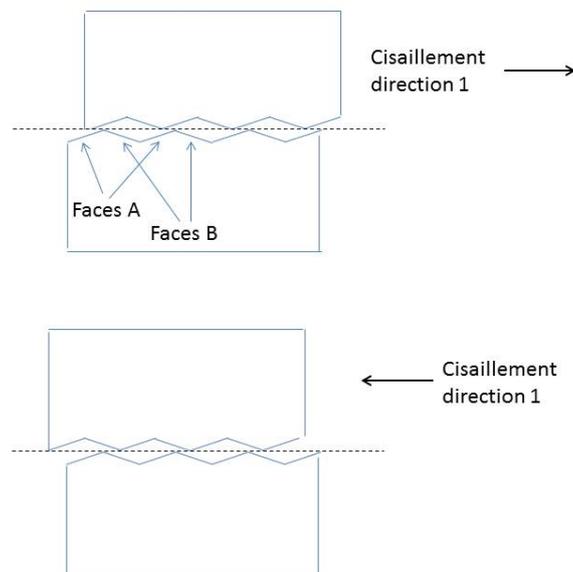


Figure 7.1.b : Interprétation locale de l'essai de cisaillement direct sur chemin CNC.

Tableau 7.1.1 : F1 (CNC), contraintes normale et de cisaillement (MPa) globales sur l'échantillon et locales sur la partie active des dents.

	σ_n global (MPa)	τ global (MPa)	σ_n local (MPa)	τ local (MPa)	tg(δ)	δ (°)
cisaillement direction 1, aller, pic	0,30	0,55	0,706	1,035	1,465	55,7
cisaillement direction 1, aller, palier	0,30	0,30	0,657	0,537	0,818	39,3
cisaillement direction 2, retour, pic	0,30	-0,35	0,527	-0,756	-1,434	-55,1
cisaillement direction 2, retour, palier	0,30	-0,15	0,567	-0,358	-0,632	-32,3

(*) δ angle de frottement d'interface

7.1.3 : Conclusions relatives à la résistance au cisaillement (monotone) de l'interface calcarénite lisse - coulis

L'analyse globale de ces 3 essais (F1, F2, F12), et l'analyse locale de l'essai F1 montrent que la résistance au cisaillement de l'interface calcarénite lisse – coulis, le coulis de ciment étant moulé au contact de la calcarénite, se présente comme suit (tableau 7.1.2):

Tableau 7.1.2 : Conclusions sur la résistance au cisaillement de l'interface calcarénite-coulis lisse, en cisaillement monotone

δ (*) résistance ultime d'interface calcarénite coulis lisse	Contrainte normale constante (CNC)	Volume constant (VC)
Petits déplacements relatifs tangentiels (proches du pic)	$\approx 40^\circ$	≈ 55 à 59°
Grands déplacements relatifs tangentiels (proches du palier)	$\approx 32^\circ$	$\approx 40^\circ$
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en petits déplacements	1	≈ 6
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en grands déplacements ($\approx \frac{1}{2}$ onde = 5 mm)	1	≈ 4
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en très grands déplacements (≈ 1 onde)	1	≈ 0

(*) δ angle de frottement d'interface

7.2 RESISTANCE ULTIME DE L'INTERFACE CALCARENITE RAINUREE - COULIS EN CISAILLEMENT « MONOTONE » A VOLUME CONSTANT (VC)

7.2.1 : Exploitation des essais F2 et F13

La résistance au cisaillement monotone de l'interface calcarénite rainurée-coulis de ciment à volume constant (VC) a été déduite des essais F2 et F13, pour de grands déplacements relatifs tangentiels (plus de 10mm ; soit plus que l'onde de rainurage) aller et retour. La synthèse apparaît à la figure 7.2. Sous une contrainte normale initiale de 0,3MPa, la résistance de base, lors du premier cisaillement aller se situe autour de 3,1MPa. Au fur et à mesure des trajets retour et aller suivants, cette résistance décroît rapidement (de l'ordre de 2, puis 1MPa, puis résistance ultérieure nulle). La dégradation de la résistance est progressive et très rapide, comme on peut le voir.

Cette figure montre également l'amplification de résistance résultant du rainurage. Lors du premier cisaillement (aller), le coefficient d'amplification est voisin de 3 si l'on compare ces essais à l'essai F12 (VC), et atteint 10 si l'on prend comme référence l'essai F9 (CNC). L'ensemble des essais précédents indique aussi une certaine variabilité de résistance pour des échantillons prélevés dans une même carotte.

A partir de ces essais, nous avons défini une résistance (contrainte de cisaillement) de référence pour un cisaillement à volume constant à partir de la contrainte normale initiale de 0,3MPa. Cette référence est de 3MPa, correspondant à une force de cisaillement de 23,6kN. Pour parvenir à la rupture (1^{er} pic en contrainte de cisaillement), le déplacement relatif tangentiel est assez élevé (2 à 6 mm), car le processus de rupture initial suppose de suffisamment « raboter » les dents de l'échantillon, en les attaquant d'un seul côté. Les pics ultérieurs de rupture (2^{ème}, 3^{ème}) doivent être associés au broyage des particules détachées de la calcarénite. Ces particules ayant été broyées, l'interface a perdu toute résistance.

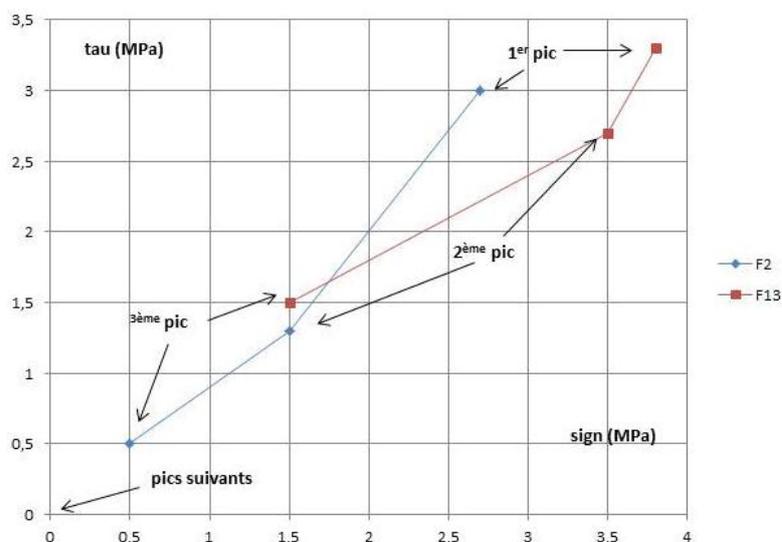


Figure 7.2 : Résistance de l'interface calcarénite rainurée-coulis, en cisaillement monotone, sur chemins VC (F2) et (F13).

7.2.2: Conclusions relatives à la résistance au cisaillement (monotone) de l'interface calcarénite rainurée – coulis à volume constant

Les conclusions relatives à la résistance au cisaillement de l'interface calcarénite rainurée-coulis en cisaillement « monotone » à volume constant sont données par le tableau 7.2, en termes d'angle de frottement, et de coefficient multiplicateur de la contrainte normale, coefficient décroissant rapidement avec le niveau de déplacement relatif tangentiel.

A partir des résultats précédents, il est clair que les essais de cisaillement à volume constant, très probablement plus représentatifs que les essais à contrainte normale constante, du frottement latéral le long des pieux ancrés dans la calcarénite, identifient bien le gain en résistance lié à la présence des aspérités dans le forage.

Tableau 7.2. : Conclusions sur la résistance au cisaillement de l'interface calcarénite-coulis rainurée, en cisaillement monotone à volume constant (VC)

δ (*) résistance ultime d'interface calcarénite rainurée - coulis	Volume constant (VC)
Petits déplacements relatifs tangentiels (proches du pic)	$\approx 45^\circ$
Grands déplacements relatifs tangentiels (proches du palier)	$\approx 45^\circ$
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en petits déplacements	≈ 10
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en grands déplacements ($\approx \frac{1}{2}$ onde = 5 mm)	≈ 5
Coefficient multiplicateur de la contrainte normale initiale en très grands déplacements (≈ 1 onde)	≈ 0

(*) δ angle de frottement d'interface

7.3 MODE(S) DE RUPTURE DE L'INTERFACE CALCARENITE RAINUREE - COULIS

La figure 7.3 donne une idée du mode de rupture des interfaces calcarénite rainurée-coulis. Cette rupture se situe complètement à la surface de la calcarénite, ce qui n'est pas étonnant si l'on considère les différences de résistance en compression et en traction des matériaux en présence.

Dans la plupart des essais, la dégradation n'est pas homogène à la surface de la calcarénite, mais concentrée vers le centre de l'interface (figure 7.3). Il semble que le « collage » entre calcarénite et coulis soit plus résistant dans cette zone, où la calcarénite reste attachée au coulis.

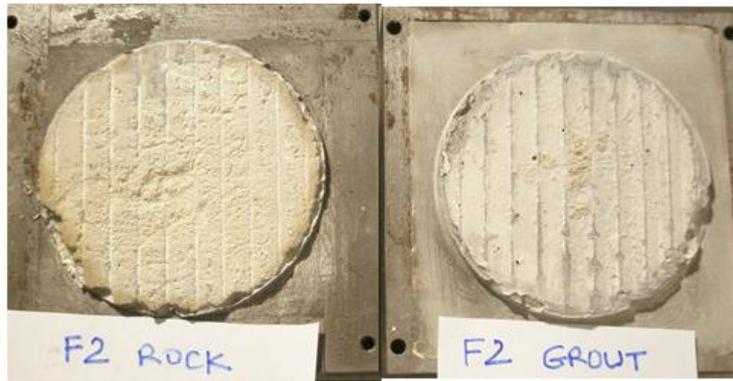


Figure 7.3 : Faciès typique de rupture de l'interface calcarénite-coulis après cisaillement « monotone » à volume constant, orthogonalement à la direction des rainures, sous contrainte normale initiale de 0,3 MPa (à gauche la calcarénite, à droite le coulis).

7.4 CARACTERISATION DE LA DEGRADATION CYCLIQUE EN CISAILLEMENT DES INTERFACES CALCARENITE RAINUREE – COULIS

Il s'agit de quantifier, pour le niveau de contrainte normale initiale choisi, soit 0,3MPa, l'effet des caractères des cycles (en contrainte de cisaillement) appliqués aux échantillons, c'est à dire leur amplitude et leur position dans le plan de contraintes (symétrique ou asymétrique).

Vu le petit nombre d'essais disponibles, nous allons considérer 7 essais, répartis en 2 classes d'essais, repérés par des pourcentages de la force de cisaillement maximum (à la rupture), pratiquement proportionnelle à la contrainte de cisaillement à la rupture en monotone à volume constant, soit $\tau_{lim VC}$ (figure 7.4.a) :

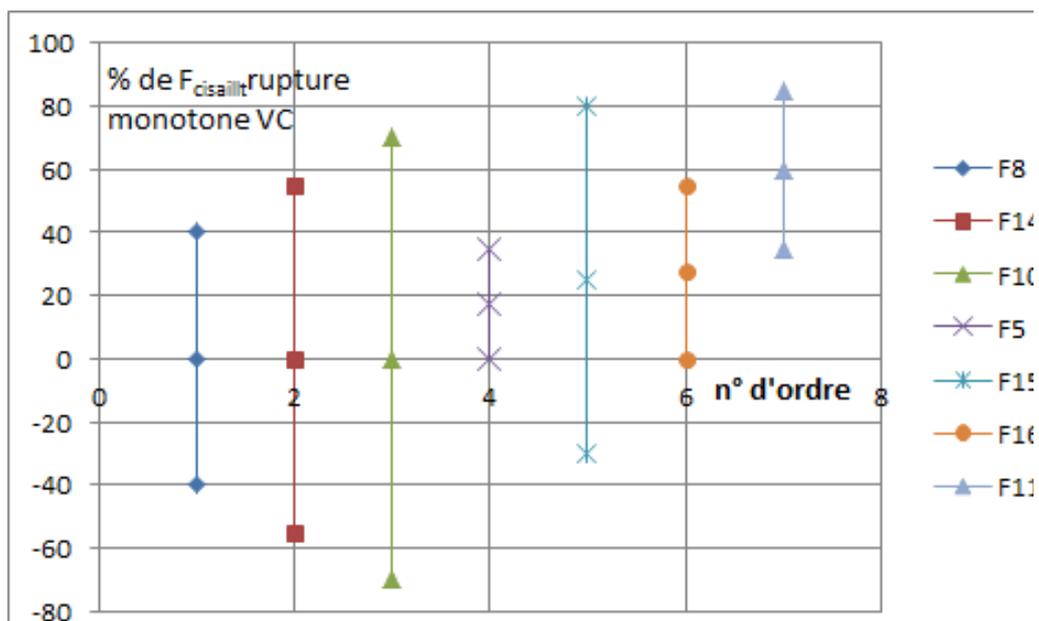


Figure 7.4.a : Essais cycliques symétriques et asymétriques. Caractéristiques utilisées pour apprécier la dégradation cyclique.

- les essais symétriques à amplitude croissante, soit F8 (-40%, +40%), F14 (-55%, +55%) et F10 (-70%, +70%).
- Les essais asymétriques à valeur moyenne de cisaillement croissante, soit F5 (0%, +35%), F15 (-30%, +80%), F16 (0%, +55%), et F11 (35%, +85%).

7.4.1 : cycles symétriques, exploitation des essais F8, F14, et F10

Considérons d'abord les essais symétriques à amplitude croissante de taux de cisaillement (2x40%, 2x55%, et 2x70%). On constate que lors de ces essais à volume constant, les cycles en contrainte de cisaillement sont accompagnés de cycles en contrainte normale. On parlera dans la suite pour ces cycles de pic + (maximum de contrainte normale) et de pic - (minimum de contrainte normale). Dans ces 3 essais, la contrainte normale cyclique moyenne finit toujours par décroître, mais dans l'essai F14 (intermédiaire en termes d'amplitude de contrainte de cisaillement), elle commence par croître (tableau 7.4.1). Sauf dans l'essai F14, où s'est passé un évènement que nous tenterons d'expliquer ci-après, la contrainte normale au premier cycle est fonction croissante de l'amplitude de cisaillement imposée, et décroît au cours des cycles.

Les figures 7.4.b, 7.4.c, et 7.4.d permettent de visualiser le processus d'évolution de la contrainte normale au cours des cycles, et de proposer une explication pour l'anomalie apparente liée à l'essai F14. D'une manière générale, pour ces essais, la contrainte normale (pic et valeur cyclique moyenne) diminue au cours des cycles, par accumulation progressive. Il en va de même pour le déplacement relatif tangentiel cyclique moyen, qui est relativement stable, augmentant très lentement en module, lors des premiers cycles, puis basculant brutalement vers les grandes valeurs au moment de la rupture (figures 6.3.4.b et 6.3.3.t notamment). On remarque, figures 7.4.b et 7.4.c (essai F8), que la rupture intervient au cycle 54, lorsque la contrainte normale cyclique moyenne atteint une valeur légèrement supérieure au pic de contrainte de cisaillement cyclique imposée (angle de frottement d'interface alors égal à $\text{Arctg}\left(\frac{1150}{1000}\right) \approx 49^\circ$. En même temps, à ce cycle, la contrainte normale de « pic négatif » est nettement inférieure à la ½ amplitude en contrainte de cisaillement imposée. En ce point, l'interface est « en plasticité établie ».

L'essai F14 (figure 7.4.d et 7.4.e) ne ressemble pas aux essais F8 et F10. Avançons une hypothèse : L'échantillon F14 a eu une faiblesse en début d'essai, qui s'est corrigée au cycle 140, après quoi l'essai a été conforme à F8 et F10. Le fait que l'interface se trouve « en plasticité établie » en son pic bas (figure 7.4.e) dès le premier cycle, et jusqu'au cycle 140, n'est sans doute pas étranger à ce trait particulier. L'essai F10 (figures 7.4.f et 7.4.g) est qualitativement analogue à l'essai F8. Si l'on admet l'hypothèse ci-dessus concernant F14, ces 3 essais ont les caractères décrits au tableau 7.4.2. Les contraintes normales de pic de premier cycle sont fonction croissante de l'amplitude cyclique moyenne imposée en termes de contrainte de cisaillement. Par ailleurs, le taux de décroissance de la contrainte normale par cycle est fonction décroissante de l'amplitude de cette contrainte.

Tableau 7.4.1 : Mobilisation de la contrainte normale cyclique (pic, moyenne, amplitude) dans les essais symétriques F8, F14, et F10

	Essai F8	Essai F14	Essai F10
Amplitude de taux de cisaillement	2x40% ≈ 2 x 1000 kPa	2x55% ≈ 2 x 1300 kPa	2x70% ≈ 2 x 1900 kPa
Contrainte normale : premier pic, cyclique moyenne, amplitude (kPa)	Cycle 1 : 2500, 1800, 1100 décroissante jusqu'à Cycle 54 : 1600, 1150, 900	Cycle 1 : 1400, 1000, 800 croissante jusqu'à Cycle 140 : 1800, 1100, 1400 brusque accroissement 2200, 1900, 600 décroissante jusqu'à Cycle 208 : 2000, 1700, 600 décroissante très rapidement à partir du cycle 204	Cycle 1 : 3950, 3500, 900 décroissante jusqu'à Cycle 113: 3050, 2600, 900
Déplacement relatif tangentiel	Stable à 3,3 mm entre cycles 1 et 54	Oscillations autour de 0,6 mm jusqu'à cycle 208, puis autour de -0,4 mm après	Stable à -11,7 mm (valeur très élevée ?) entre cycles 1 et 113 après de grandes oscillation initiales
Fin d'essai	Limite de résistance atteinte, cycles physiquement impossibles, déplacement relatif tangentiel rapidement croissant	Arrêt opérateur, un peu trop tôt pour atteindre la rupture (manque une centaine de cycles)	Arrêt opérateur, un peu trop tôt pour atteindre la rupture (manque plusieurs centaines de cycles)

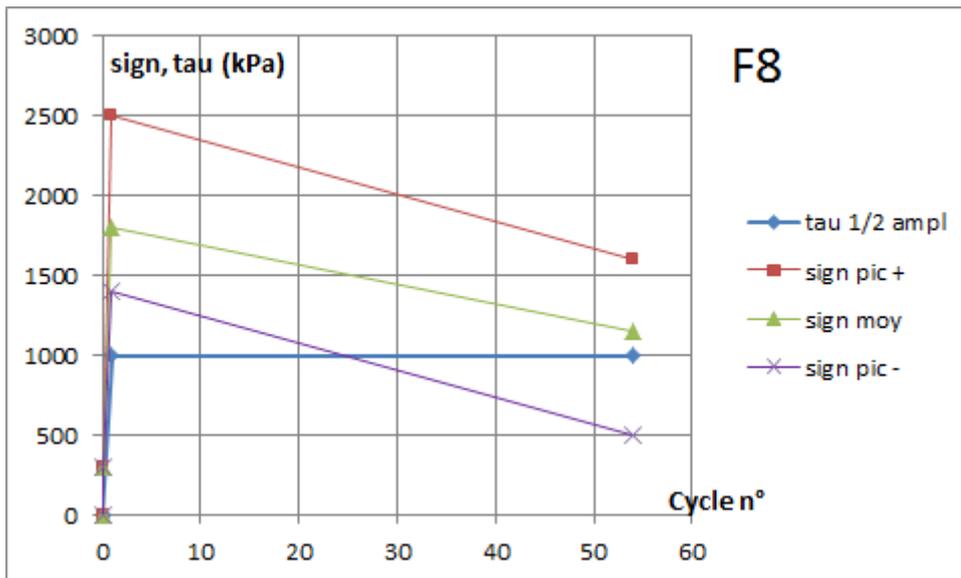


Figure 7.4.b : F8, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement $2 \times 40\% \times \tau_{lim VC}$).

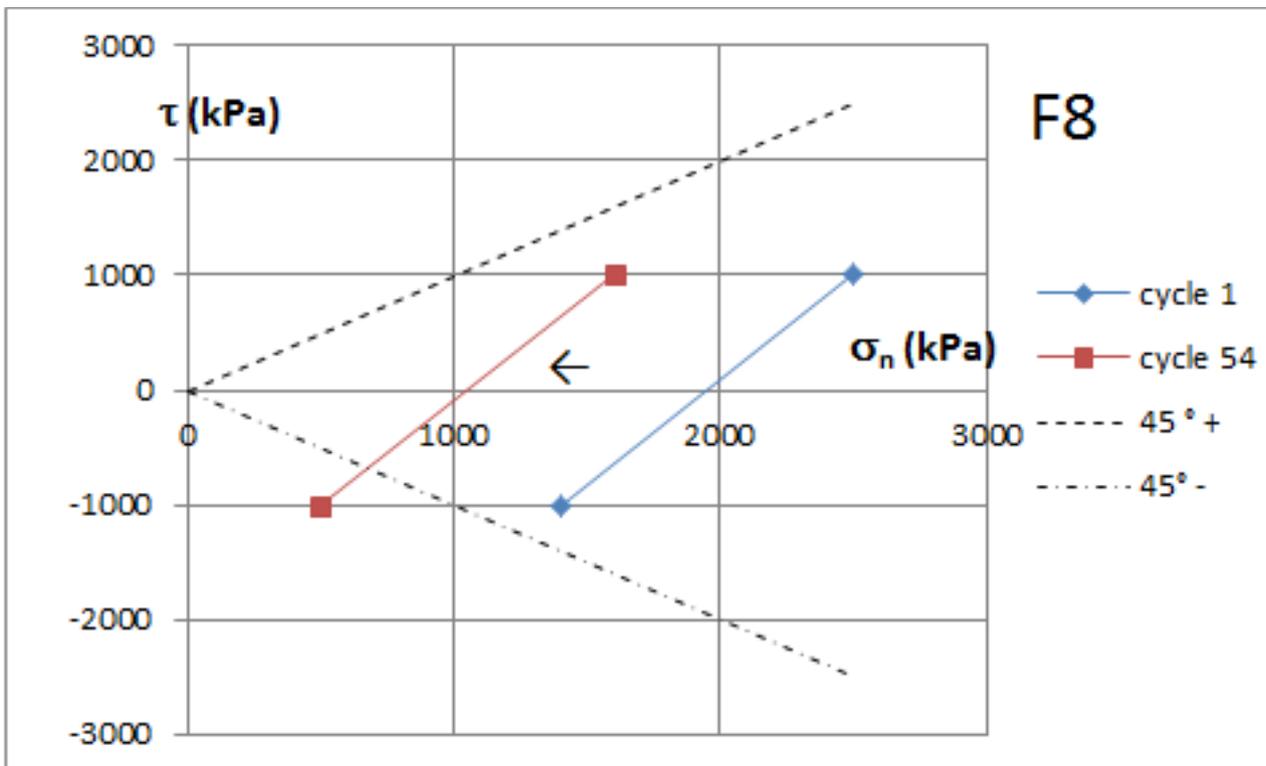


Figure 7.4.c : F8, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement $2 \times 40\% \times \tau_{lim VC}$).

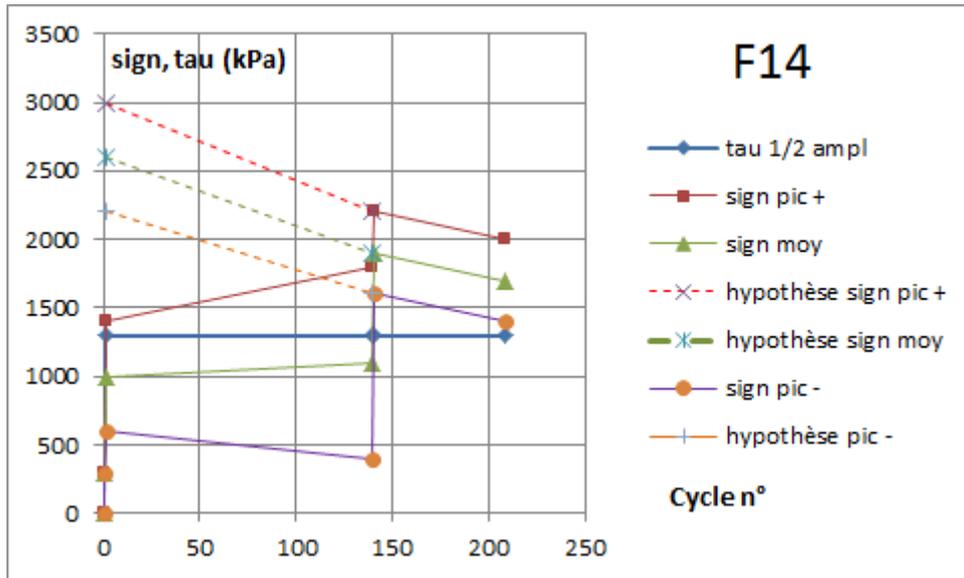


Figure 7.4.d : F14, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement $2 \times 55\% \times \tau_{limVC}$).

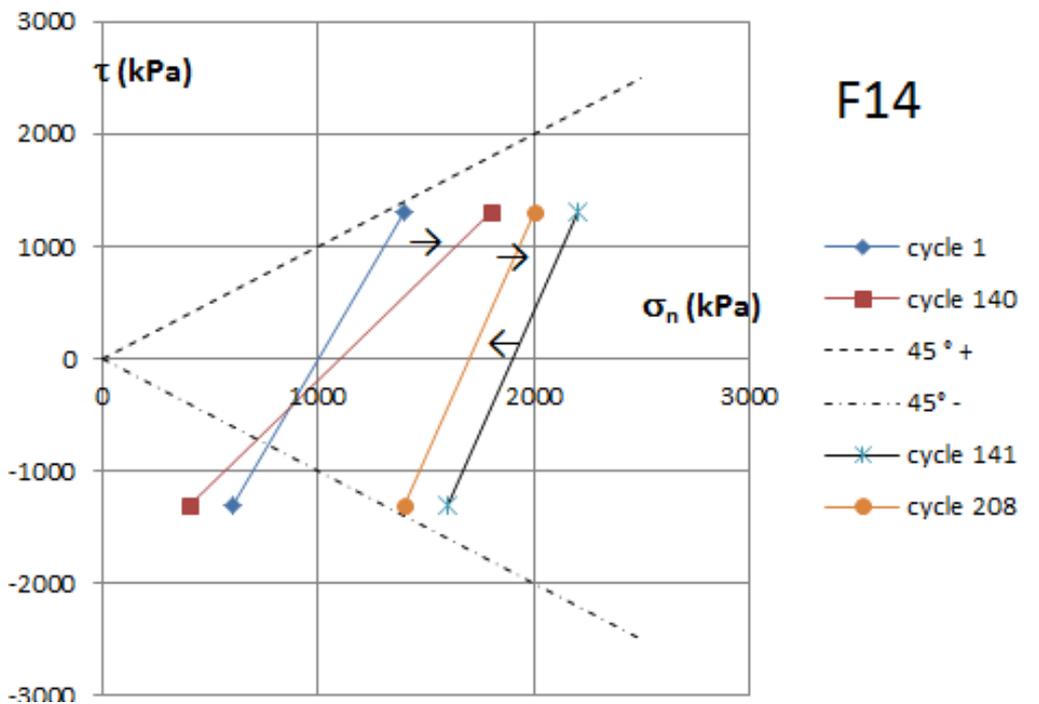


Figure 7.4.e : F14, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement $2 \times 55\% \times \tau_{limVC}$).

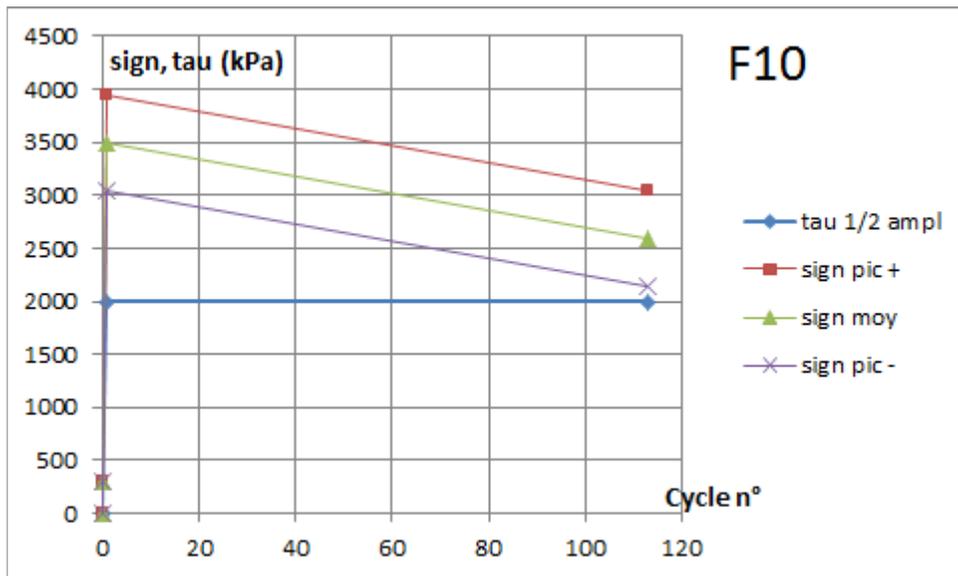


Figure 7.4.f : F10, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement $2 \times 70\% \times \tau_{lim VC}$).

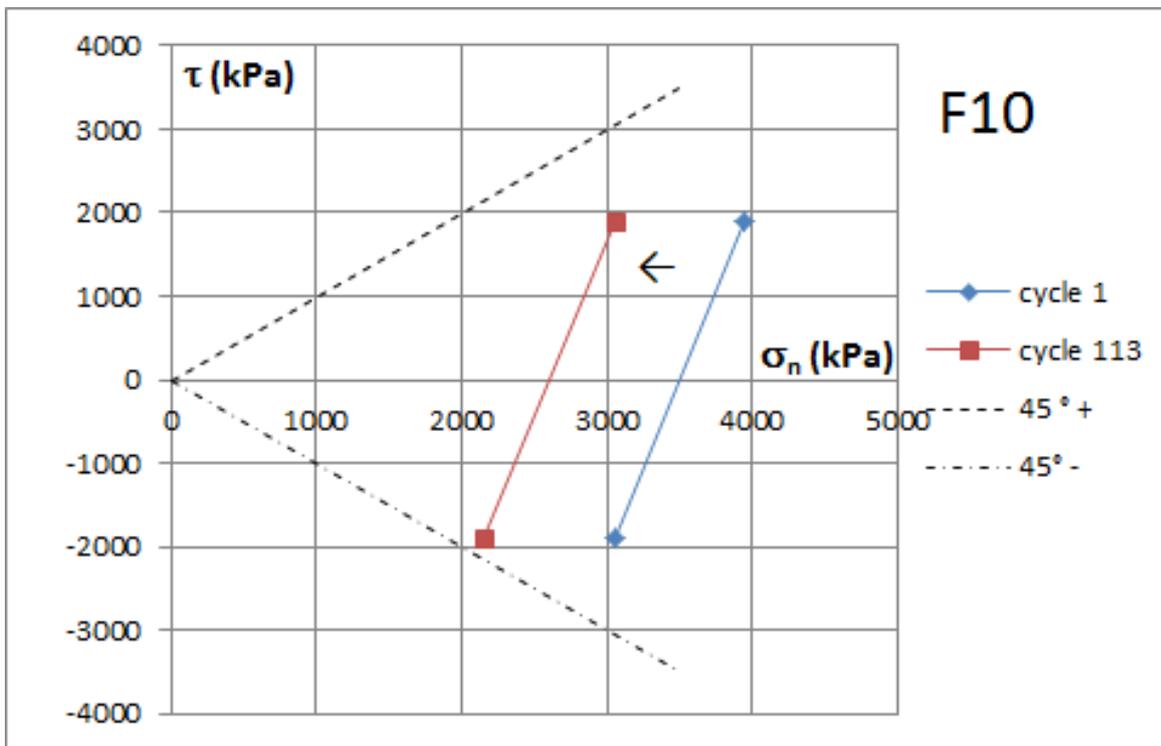


Figure 7.4.g : F10, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement $2 \times 70\% \times \tau_{lim VC}$).

Tableau 7.4.2 : Caractères de la mobilisation de la contrainte normale cyclique (pic, moyenne) dans les essais symétriques F8, F14, et F10

	Essai F8	Essai F14	Essai F10
Amplitude réduite de taux de cisaillement	2x40%	2x55%	2x70%
Contraintes normales : pic +, cyclique moyenne, et pic - 1 ^{er} cycle, (kPa)	2500 1950 1400	3000 ? 2600 ? 2200 ?	3950 3500 3050
Décrément de contrainte normale cyclique pic + (kPa/cycle), entre les cycles 1 à N	16,7 N = 54	5,7 N = 140	5,3 N = 113
Décrément de contrainte normale cyclique moyenne (kPa/cycle), entre les cycles 1 à N	8,3 N = 54	5,7 N = 140	4,9 N = 113

7.4.2 : Conclusion sur la dégradation cyclique lors des essais de cisaillement symétriques

Il s'agit de cycles de cisaillement symétriques, à volume constant, de l'interface calcarénite rainurée – coulis. On ne peut évidemment exclure l'effet de l'hétérogénéité de la calcarénite sur les résultats d'essais. Néanmoins, ces résultats sont troublants, dans la mesure où une sollicitation cyclique faible (F8, $2 \times 40\% \times \tau_{lim VC}$), conduit plus rapidement à la rupture (en nombre de cycles), que des sollicitations plus intenses (F14, $2 \times 55\% \times \tau_{lim VC}$, et F10, $2 \times 70\% \times \tau_{lim VC}$). On peut tenter des explications.

Une première explication, classique, selon la culture du mécanicien des sols, serait que les faibles amplitudes de cisaillement sont en relation avec la tendance contractante des cycles, tandis que les fortes amplitudes se situent « à cheval sur » les domaines contractant et dilatant. La forte amplitude de cisaillement (F10) aurait pour effet de « retarder la rupture », c'est-à-dire d'augmenter le nombre de cycles pour parvenir à la rupture.

Mais une autre explication, plus adaptée nous semble-t-il, au comportement de l'interface calcarénite rainurée – coulis est proposée ci-dessous, dans l'attente des conclusions relatives aux cycles dissymétriques. Contrairement aux interfaces sol-structure, dont la dimension caractéristique d'aspérités est de l'ordre du d_{50} du sol, la dimension caractéristique des interfaces calcarénite

rainurée - coulis est de l'ordre de la hauteur des dents. La mobilisation de la contrainte normale au premier cycle (pic + et pic -) est fonction croissante de l'amplitude cyclique (figures 7.4.b, 7.4.d, 7.4.f, et tableau 7.4.2), après quoi, la contrainte normale (de pic +, cyclique moyenne, de pic -) diminue. Mais la contrainte normale minimum (pic -) est toujours fort inférieure à la contrainte normale maximum (pic +) au cours des cycles (figures 7.4.b à 7.4.g). Ainsi, comme en témoigne la figure 7.4.h, la contrainte normale minimum (pic -) relative à l'essai F8 est extérieure au domaine pseudo-élastique stable, tandis que celle de l'essai F14 est limite, et que celle de l'essai F10 se situe dans le domaine pseudo-élastique parfaitement stable. On comprend dès lors que le nombre de cycles amenant à la rupture soit dans l'ordre croissant pour F8, F14, et F10, car le premier cycle de F8 est le plus proche des limites de stabilité.

Une autre manière de dire les choses pourrait être : à faible amplitude de cisaillement cyclique, seule l'extrémité supérieure des dents de calcarénite est « grignotée », tandis qu'à forte amplitude, c'est une portion plus importante des dents qui doit s'effacer avant la rupture.

Notons aussi que dans le cas des cycles symétriques, les dents sont endommagées en principe symétriquement, d'abord sur leur pointe, et sur leurs deux faces.

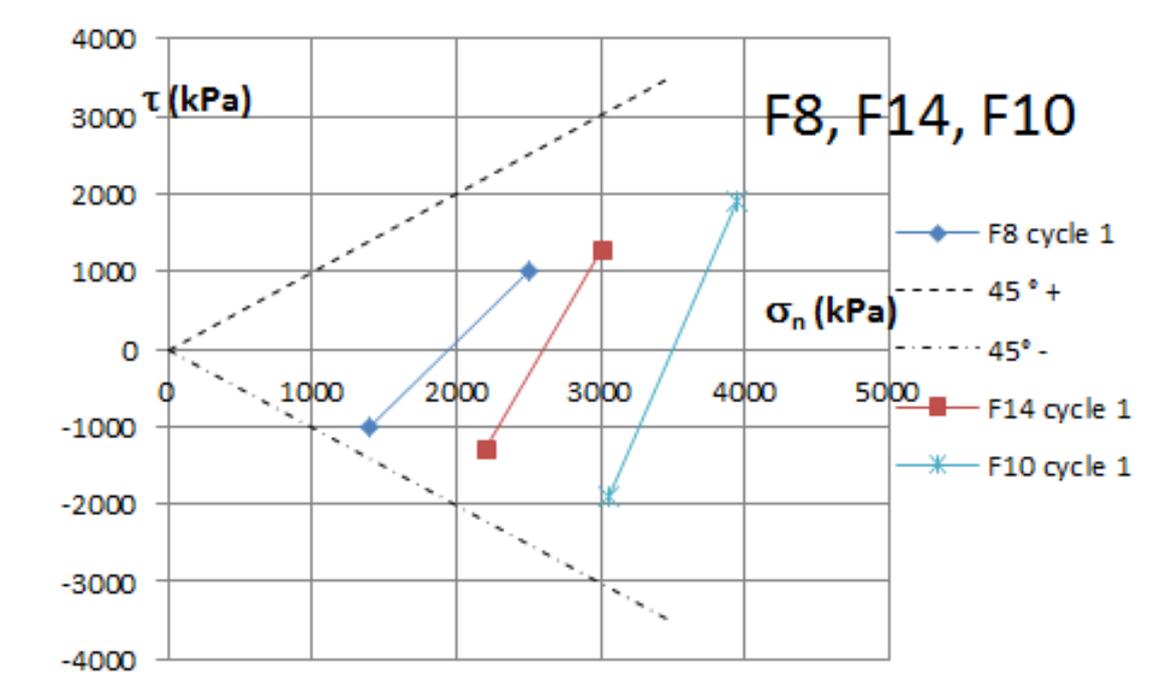


Figure 7.4.h : Position schématique du 1^{er} cycle des essais de cisaillement cycliques symétriques F8, F14 et F10.

7.4.3 : cycles asymétriques, exploitation des essais F10, F15, F5, F16 et F11

Les essais qui vont nous permettre de caractériser les sollicitations de cisaillement asymétriques sont (figure 7.4.a) :

- D'une part les essais F10 et F15, d'amplitude voisine, F10 étant symétrique et F15 légèrement asymétrique
- D'autre part, les essais F5, F16 et F11, tous asymétriques, d'amplitude voisine, et de cisaillement cyclique moyen croissant

Le tableau 7.4.3 présente les principaux caractères cycliques des essais F10 et F15, et le tableau 7.4.4, ceux des essais F5, F6, et F11.

Voyons d'abord les essais F10 et F15. Les résultats relatifs à l'essai F10 ont été relatés aux § précédents. Quant à l'essai F15, il ne s'est pas déroulé comme imaginé, ainsi que l'indiquent les figures 7.4.i et 7.4.j. Bien plus que dans le cas des essais symétriques précédents (F8, F14, F10), le premier cycle de l'essai F15 se trouve situé (figure 7.4.j), dans le plan de contrainte, très près de la limite de stabilité. C'est la raison pour laquelle il parvient aussi rapidement à la rupture.

Tableau 7.4.4 : Mobilisation de la contrainte normale cyclique (pic, moyenne, amplitude) dans les essais symétrique F10, et asymétrique F15, d'amplitude voisine, et d'excentrement croissant.

	Essai F10	Essai F15
Amplitude réduite de taux de cisaillement	2x70% (1/2 amplitude 70%, symétrique), soit ± 1900 kPa	-30%, +80% (1/2 amplitude 55%, excentrement 25%), soit -815, + 2170 kPa
Contraintes normales : pic +, pic -, cyclique moyenne, amplitude (kPa)	Cycle 1 : 3950, 3500, 900 décroissantes jusqu'à Cycle 113: 3050, 2600, 900	Cycle 1 : pic + : 1750, et pic - : 450 moy 1100, amplitude 1300. Cycle 2 : pic + : 1300, et pic - : 10 moy 655, amplitude 1290 Cycles ultérieurs à : contrainte normale nulle
Déplacement relatif tangentiel	Stable à -11,7 mm entre cycles 1 et 113, après oscillations	Très élevé (15 mm dès le 1 ^{er} cycle)
Fin d'essai	Arrêt opérateur, trop tôt	Arrêt opérateur, après tentative de cycle 3, car contrainte normale stable et nulle

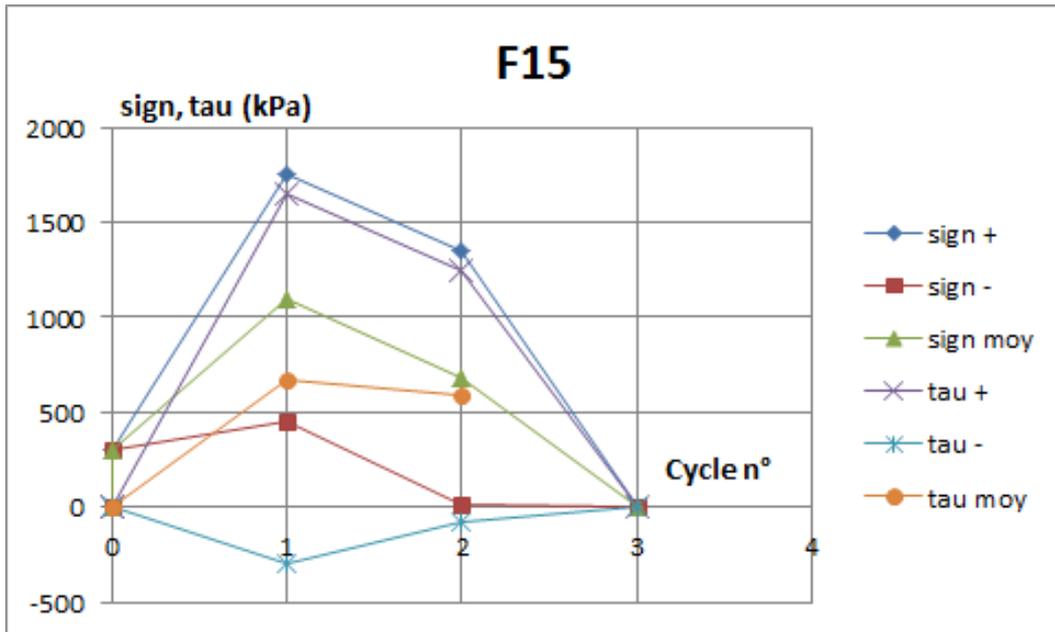


Figure 7.4.i : F15, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement -30% à $+80\% \times \tau_{limVC}$).

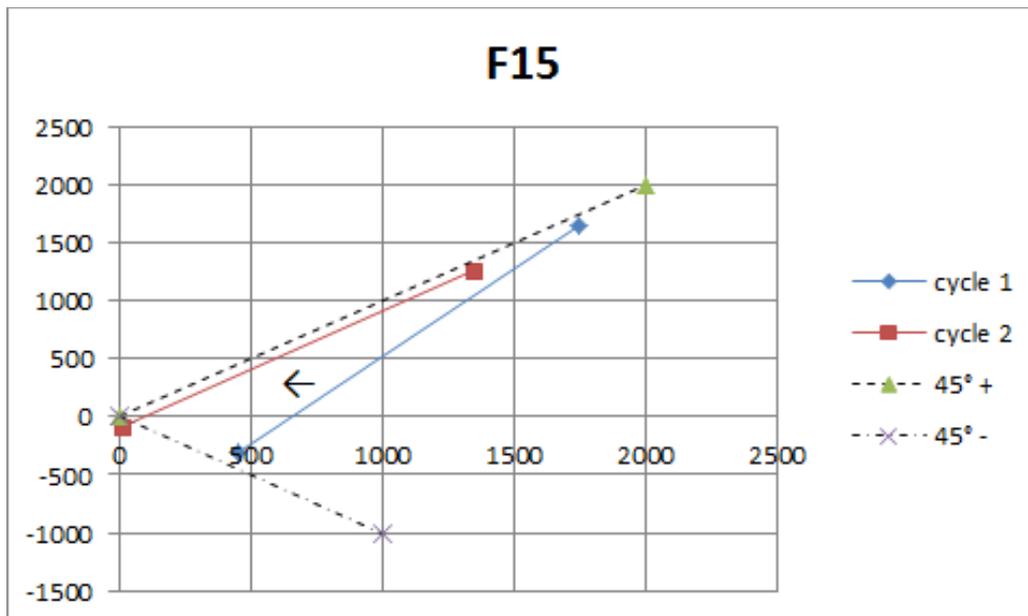


Figure 7.4.j : F15, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement -30% à $+80\% \times \tau_{limVC}$).

Passons maintenant aux essais de cisaillement asymétriques F5, F16 et F11, d'excentrement croissant en termes de contrainte de cisaillement, décrits au tableau 7.4.4.

Les figures 7.4.k et 7.4.l décrivent respectivement la mobilisation de la contrainte normale, et la position des cycles successifs dans le plan de contraintes, pour l'essai F5. De même les figures 7.4.m et 7.4.n pour l'essai F16, et les figures 7.4.o et 7.4.p pour l'essai F11. La figure 7.4.q donne une comparaison de la position du premier cycle dans le plan de contraintes pour chacun de ces essais.

L'essai F5 semble connaître une décroissance assez lente de la contrainte normale au cours des cycles (figures 6.3.4.c). Toutefois, les figures 7.4.k et 7.4.l montrent que la limite de stabilité est proche d'être atteinte. La rupture est toujours brutale.

Tableau 7.4.4 : Mobilisation de la contrainte normale cyclique (pic, moyenne, amplitude) dans les essais asymétriques F5, F16, et F11, d'amplitude voisine, et d'excentrement croissant.

	Essai F5	Essai F16	Essai F11
Amplitude réduite de taux de cisaillement	0%, 35%, soit 0 à 800 kPa (½ amplitude 17,5 %, excentrement 17,5%)	0%, 55%, soit 0 à 1300 kPa (½ amplitude 27,5%, excentrement 27,5%)	35%, 85%, soit 800 à 2000 kPa (½ amplitude 25%, excentrement 60%)
Contrainte normale : pic, cyclique moyenne, amplitude (kPa)	Cycle 1 : 900, 875, 50 décroissante jusqu'à Cycle 60 : 650, 625, 50	Cycle 1 : 1400, 1000, 800 très faible décroissance cycle 100 : 1100, 882, 436 croissance continue rapide cycle 500 : 2230, 1947, 566 croissance plus lente Cycle 1000 : 2670, 2352, 636 décroissance lente puis accélérée cycle 1500 : 0, 0, 0	Cycle 1 : 2400, 2150, 500 décroissance lente jusqu'à Cycle 9 : 2200, 1900, 600 décroissance rapide jusqu'à cycle 10 : 1700, 1250, 900 puis décroissance brutale cycle 11 : 0,0,0
Le 10 Déplacement relatif tangentiel	Pratiquement fixe à 1.1 mm	Croissance très lente de 2 à 5 mm entre les cycles 1 et 1500, puis croissance explosive au cycle 1500	Stable à 5 mm jusqu'à la rupture
Fin d'essai	Arrêt opérateur à 60 cycles, Décroissance extrêmement lente de la contrainte normale cyclique moyenne à partir de 620 kPa. C'est pratiquement un palier. La rupture semble éloignée.	Arrêt à la rupture de l'interface	Arrêt à la rupture de l'interface

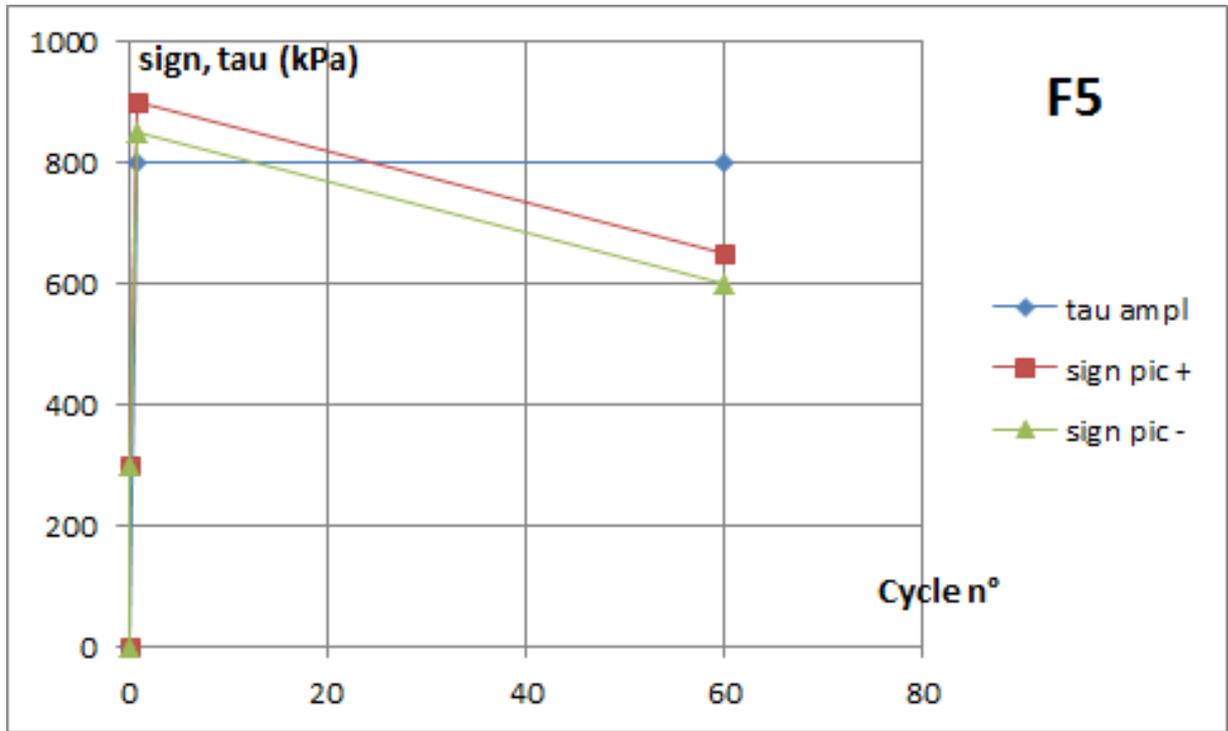


Figure 7.4.k : F5, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisailment 0% à +35% $\times \tau_{limVC}$).

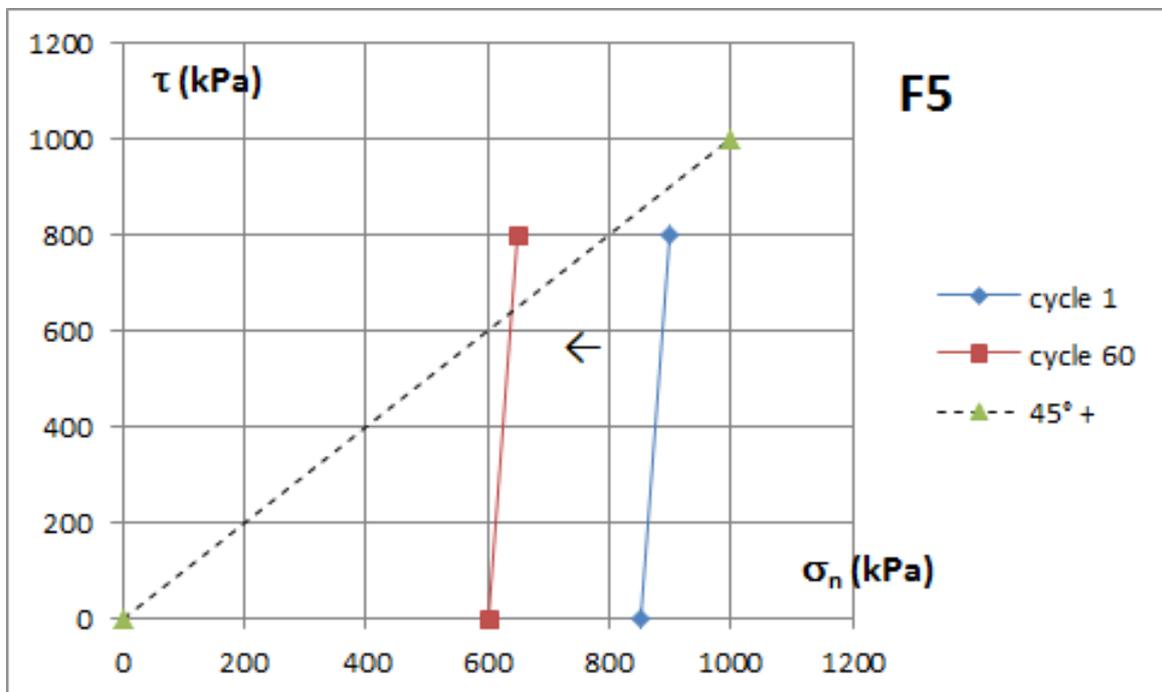


Figure 7.4.l : F5, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisailment 0 à +35% $\times \tau_{limVC}$).

L'essai F16 est l'un des plus intéressants, et montre à quel point il existe un couplage fort entre contrainte de cisaillement (que l'on contrôle) et contrainte normale (que l'on subit). On note une faible tendance contractante, suivie d'une très forte augmentation de la contrainte normale cyclique moyenne (tendance dilatante), pour parvenir à la rupture (chute très brutale de la contrainte normale). Ce comportement est probablement à rapprocher du comportement en cisaillement sous chargement monotone (essais F2, figure 6.3.1.e, et F13, figure 6.3.1.j). La contrainte normale augmente sous cisaillement tant que la capacité dilatante de l'interface n'est pas épuisée, après quoi c'est la vraie rupture, par broyage des aspérités, qui intervient.

La proximité globale du premier cycle de l'essai F11 par rapport à une limite de stabilité explique sans doute son cheminement très rapide vers la rupture (11 cycles, figures 7.4.o et 7.4.p). Cet essai manifeste uniquement une tendance contractante dès le premier cycle.

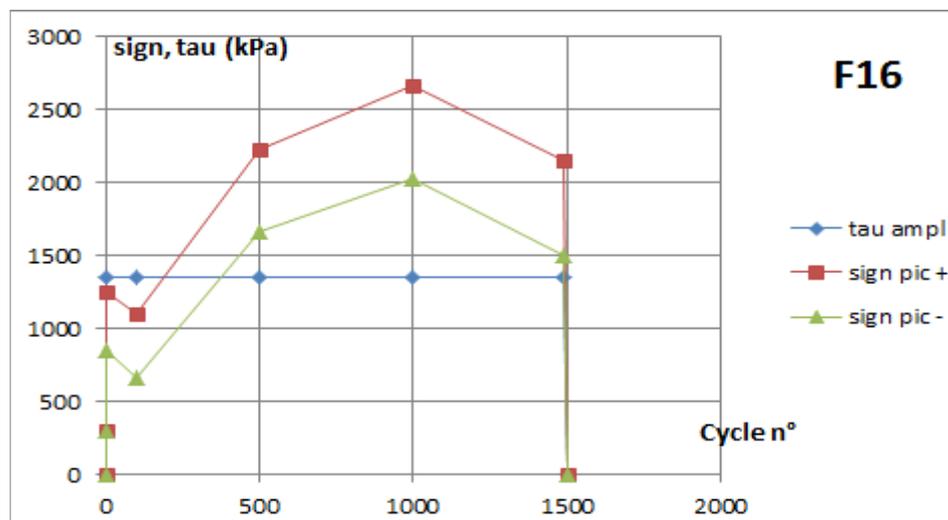


Figure 7.4.m : F16, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement 0% à +55% x τ_{limVC}).

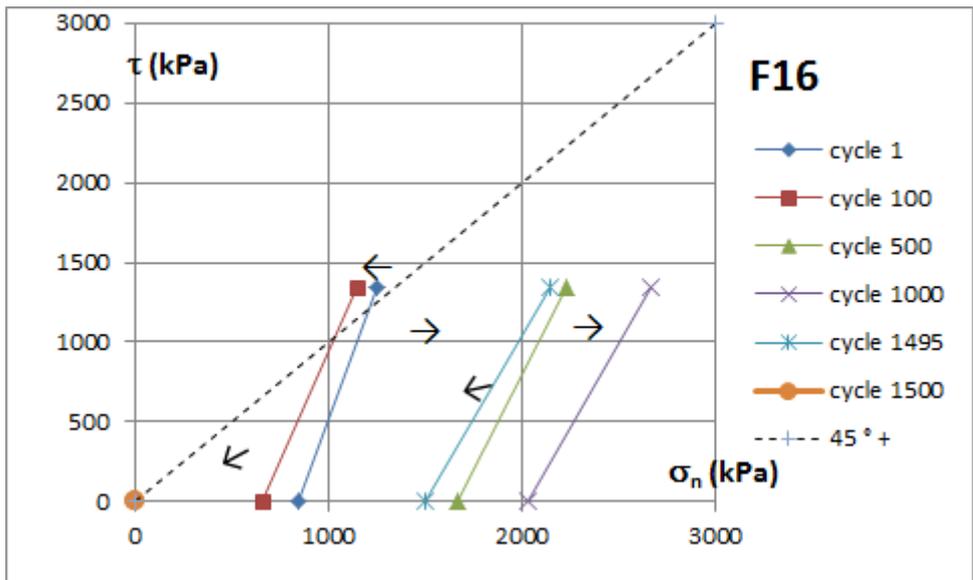


Figure 7.4.n : F16, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement 0 à +55% x $\tau_{lim VC}$).

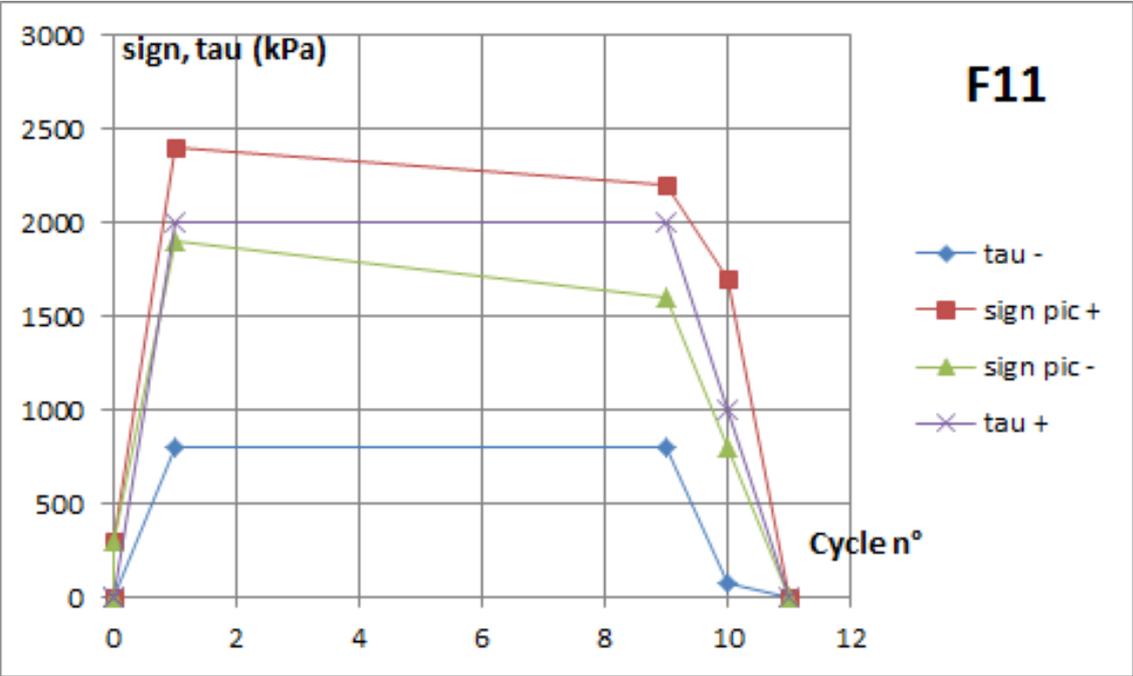


Figure 7.4.o : F11, évolution de la contrainte normale au cours des cycles (amplitude de cisaillement 35% à +85% x $\tau_{lim VC}$).

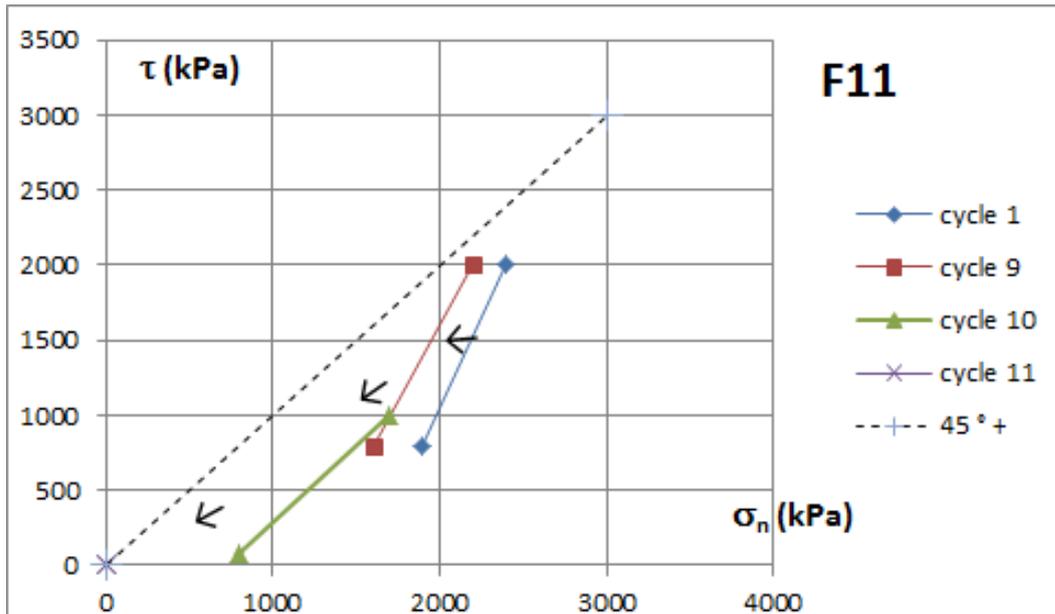


Figure 7.4.p : F11, position schématique des cycles dans le plan de contraintes (amplitude de cisaillement 35% à +85% $\times \tau_{lim VC}$).

7.4.4: Conclusion sur la dégradation cyclique lors des essais de cisaillement asymétriques

La figure 7.4.q met en situation le premier cycle schématisé des essais asymétriques F15, F5, F16 et F11. Parmi ces essais, F15, F16 et F11 sont menés jusqu'à la rupture par annulation de contrainte

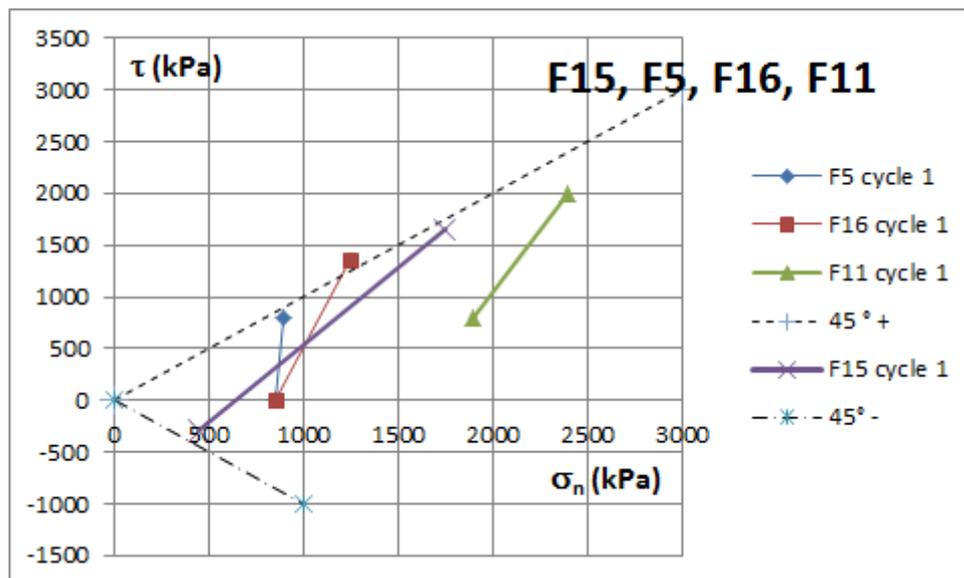


Figure 7.4.q : F15, F5, F16, F11, position schématique comparative du premier cycle de chacun de ces essais.

normale, et seul F16 présente une petite tendance contractante initiale. On notera que l'essai F5 est très particulier (figure 6.3.3.e), car il a subi deux phases de cisaillement : tout d'abord une contrainte de cisaillement (en monotone) initiale maximum de 1450 kPa avant, seconde phase, le retour à des cycles entre 0 et 800 kPa. On pourrait avancer qu'un écrouissage initial correspond à la première phase, ayant pour conséquence un « durcissement » de l'interface. Ceci est confirmé par la figure 6.3.3.e sur laquelle la pente de la première décharge est très supérieure à la pente sécante des cycles qui suivent.

7.4.5 : Conclusion générale sur la dégradation cyclique

Les chemins de cisaillement direct cyclique à volume constant sont particuliers. Lorsqu'on applique un cycle de cisaillement à une interface calcarénite rainurée - coulis, on est bien évidemment maître des valeurs extrêmes du cisaillement, mais pas de celles de la contrainte normale, comme on le voit sur une sollicitation monotone (figure 7.4.r).

Il s'ensuit que lorsqu'on définit des cycles en termes de seuils de contraintes de cisaillement, ou en pourcentages de la contrainte de rupture en cisaillement τ_{limVC} (figure 7.4.a), on parvient à des seuils de cisaillement normalisés (par la contrainte normale actuelle) différents de ces valeurs de définition (figure 7.4.s). Ces seuils normalisés sont plus significatifs que les seuils en termes de contrainte de cisaillement, ils réfèrent à la proximité par rapport aux limites de stabilité. Ainsi, les essais F8, F14, F10, symétriques et d'amplitude de cisaillement croissante, sont en fait équivalents en termes de seuils de cisaillement normalisés.

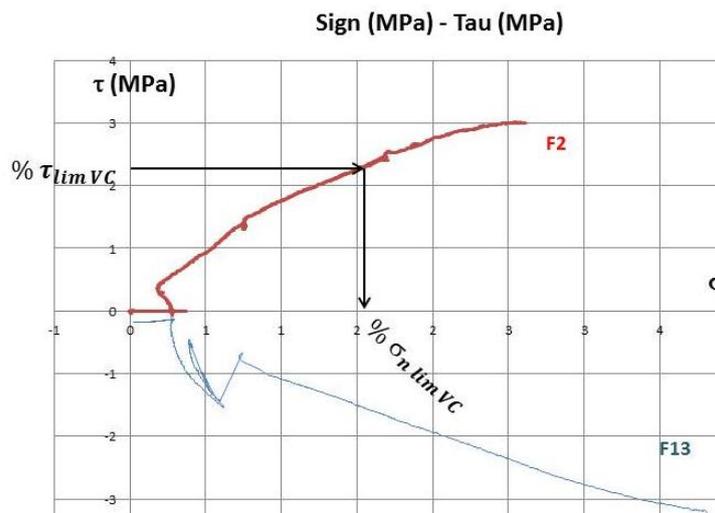


Figure 7.4.r : Sélection du premier cisaillement (à volume constant) des essais F2 et F13.

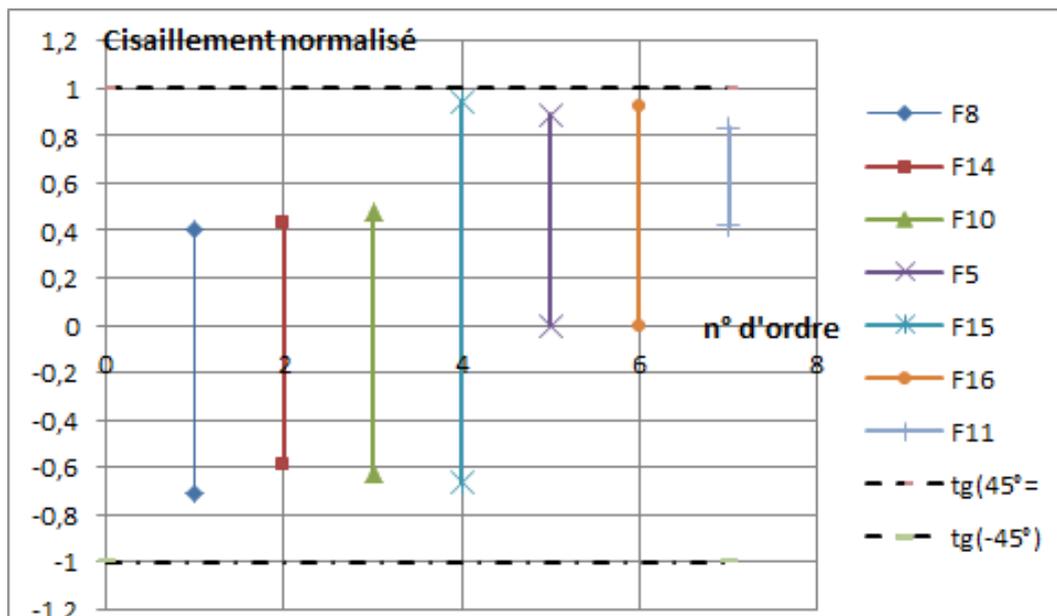


Figure 7.4.s : Position du premier cycle de chaque essai de cisaillement cyclique en termes de cisaillement normalisé (par la contrainte normale actuelle correspondante).

Dans tous les essais, le comportement global sous cisaillement cyclique est d'abord à tendance dilatante (augmentation de contrainte normale – très rapide sauf pour F14 et F16), puis à tendance contractante, avec une chute très brutale de contrainte normale à l'approche d'une limite de stabilité. Ce comportement est très différent du cisaillement direct cyclique sable –structure, dans lequel la phase dilatante initiale est pratiquement inexistante (figure 7.4.t, d'après S. Pra-ai)

Par ailleurs, une variabilité non négligeable de propriétés existe entre les échantillons d'interfaces calcarénite rainurée - coulis puisque (figure 7.4.r), si la résistance au cisaillement ultime $\tau_{lim VC}$ est bien définie (3MPa), la contrainte normale correspondante s'étage par contre entre 2,8MPa (essai F2) et 4,5MPa (essai F13).

Il est difficile de dégager des tendances quantitatives précises à partir d'un nombre aussi réduit d'essais. On remarque que le premier cycle schématisé de chaque essai est toujours incliné dans le plan de contraintes (figures 7.4.h et 7.4.q), pic haut vers les fortes contraintes normales, pic bas vers les faibles contraintes normales (car la décharge est toujours contractante).

Pour tenter de relier le nombre de cycles menant à la rupture et les caractères de ce premier cycle, on peut retenir en première approximation sa position, sa forme, et sa proximité par rapport aux limites de stabilité (ici essentiellement la limite supérieure forfaitaire à + 45 °). La position peut être mesurée par les coordonnées du « centre du cycle » dans le plan de contraintes (figure 7.4.u). La forme se caractérise par l'amplitude (réduite) en contrainte de cisaillement (figure 7.4.v) et par la proximité du « ventre du cycle par rapport à la limite supérieure forfaitaire à + 45 ° (figure 7.4.w). La figure 7.4.u ne montre aucune tendance évidente.

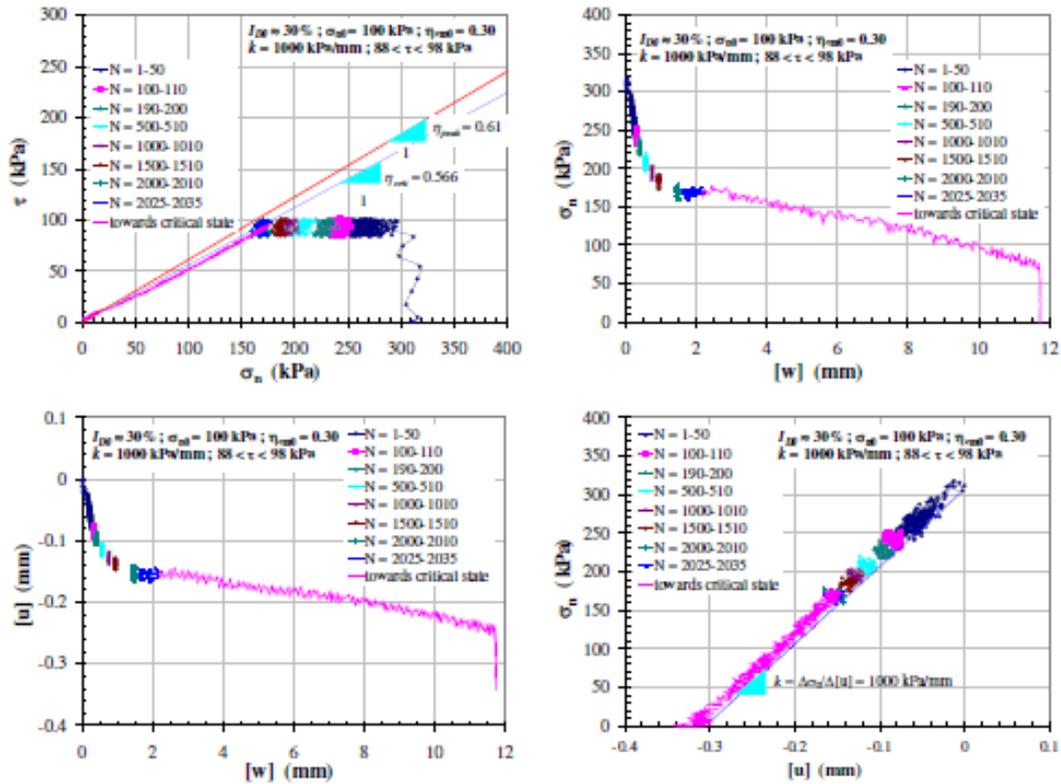


Figure 7.4.t : Essai CNS, plaque rugueuse, $\sigma_{ncm0} = 310 \text{ kPa}$, $\Delta\tau = 10 \text{ kPa}$, $\eta_{cm0} = 0,30$, $I_{D0} = 30 \%$. $k = 1000 \text{ kPa/mm}$. Rupture (état critique) à 2035 cycles (d'après S.Pra-ai).

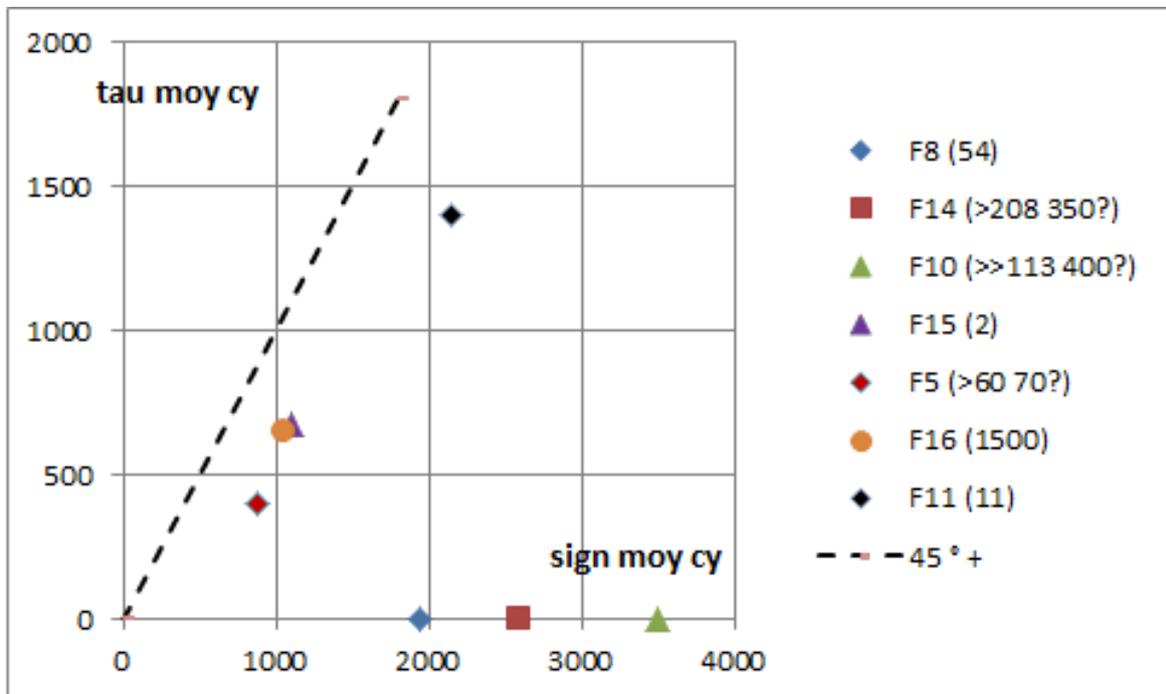


Figure 7.4.u : Position schématique du premier cycle dans le plan de contraintes (entre parenthèses le nombre de cycles ayant amené à la rupture, suivi du nombre probable (?) lorsque la rupture n'a pas été atteinte.

Par contre, la figure 7.4.v montre une tendance linéaire du nombre de cycles à la rupture en fonction de l'amplitude normalisée en contrainte de cisaillement (a), en coordonnées semi-logarithmiques, à condition d'exclure l'essai F15, dont on a noté que l'interface avait été écroûie avant application des cycles.

$$\text{Log}(N_{\text{rupt}}) = 3,333*a - 1.000$$

De même, à la figure 7.4.w, une tendance linéaire se dessine entre le logarithme du nombre de cycles à la rupture et l'orientation (p, en degrés) du premier cycle.

$$\text{Log}(N_{\text{rupt}}) = 0,100*p - 5,000$$

Bien entendu, ces tendances comportent une assez grande incertitude. Et il semble que les 2 « prédictions » de N_{rupt} ne coïncident que pour :

$$3,333 * a - 0,1212 * p = 4,000$$

Soit encore, avec τ^+ , τ^- , σ_n^+ , σ_n^- bornes supérieure et inférieure des contraintes de cisaillement et normale du premier cycle, et Arctg en degrés :

$$6,666 * \frac{\tau^+ - \tau^-}{\sigma_n^+ + \sigma_n^-} = 0,100 * \text{Arctg}\left(\frac{\tau^+ - \tau^-}{\sigma_n^+ - \sigma_n^-}\right) - 4,000$$

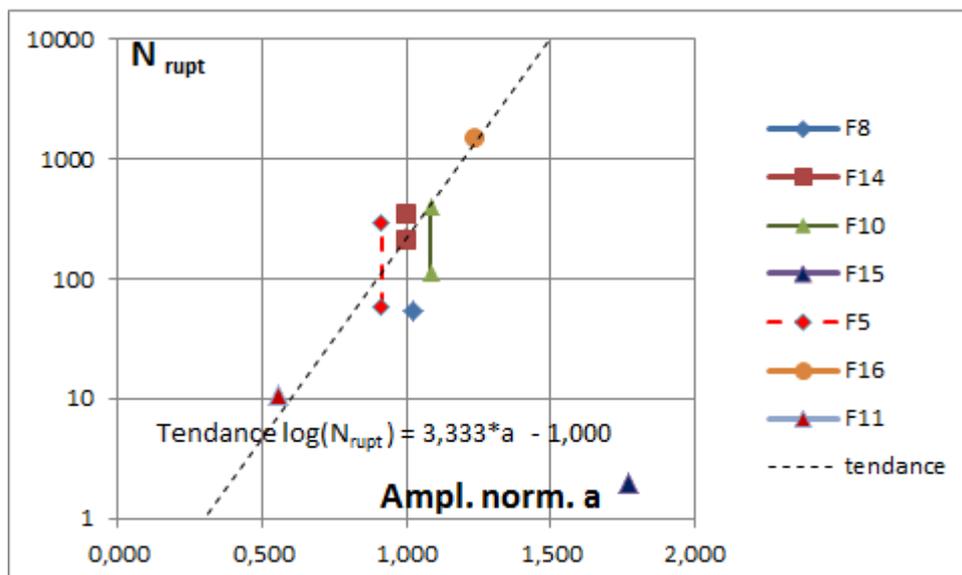


Figure 7.4.v : Nombre de cycles à la rupture en fonction de l'amplitude (a) en contrainte de cisaillement normalisée (par la contrainte normale du « centre ») du premier cycle.

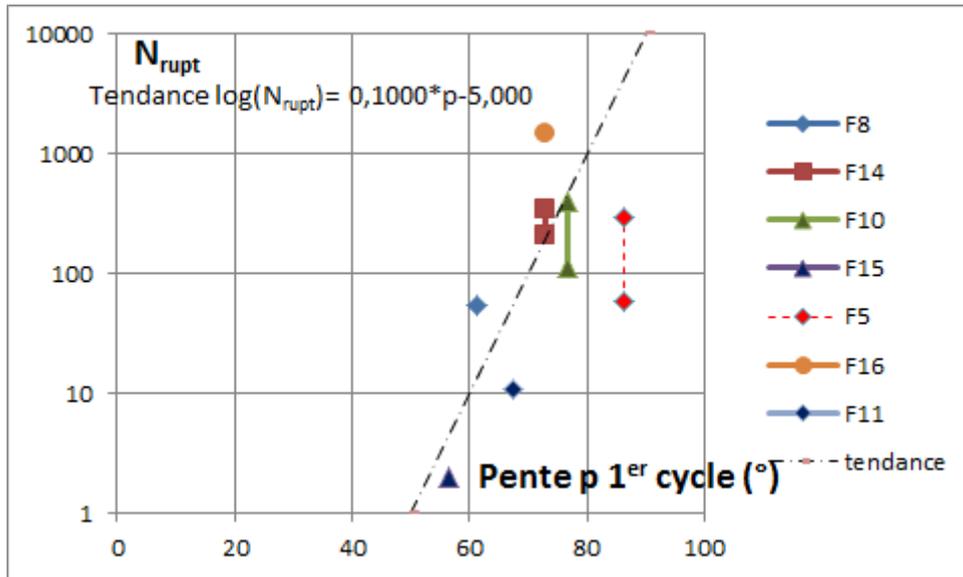


Figure 7.4.w : Nombre de cycles à la rupture en fonction de l'orientation (p) du premier cycle de chaque essai dans le plan de contraintes.

Ce domaine de validité reste à explorer. Si l'on s'en tient aux 2 formulations proposées, la prédiction du nombre de cycles à la rupture reliée à l'amplitude de contrainte de cisaillement normalisée est représentée figure 7.4.x, tandis que la corrélation relative à l'orientation du premier cycle fait l'objet de la figure 7.4.y.

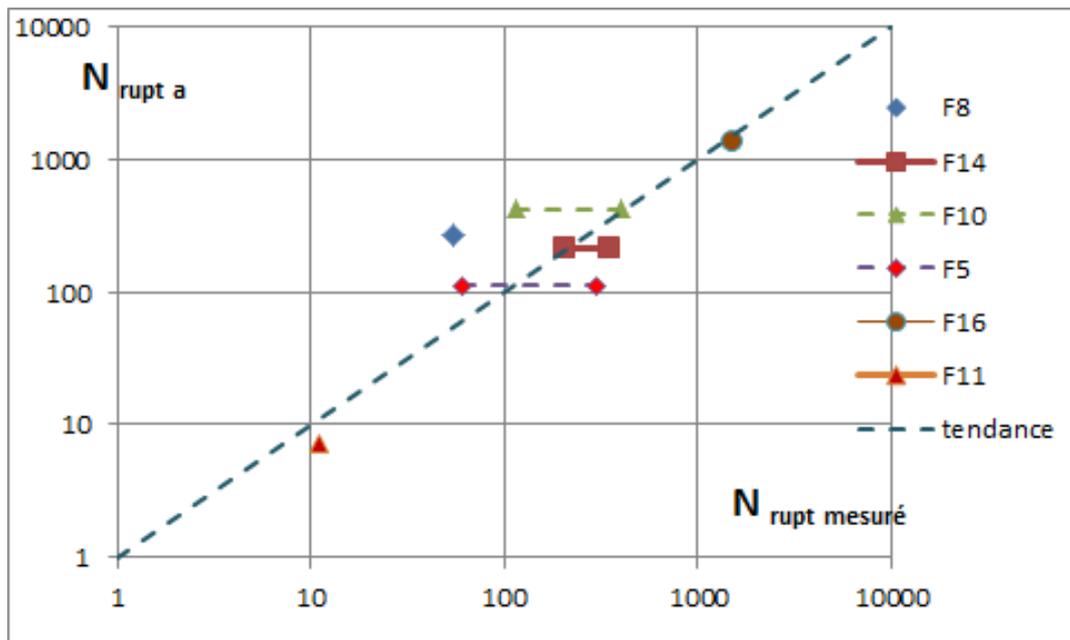


Figure 7.4.x : Corrélation entre le nombre de cycles à la rupture en fonction de l'amplitude cisaillement normalisée (a) du premier cycle et le nombre de cycles à la rupture mesuré.

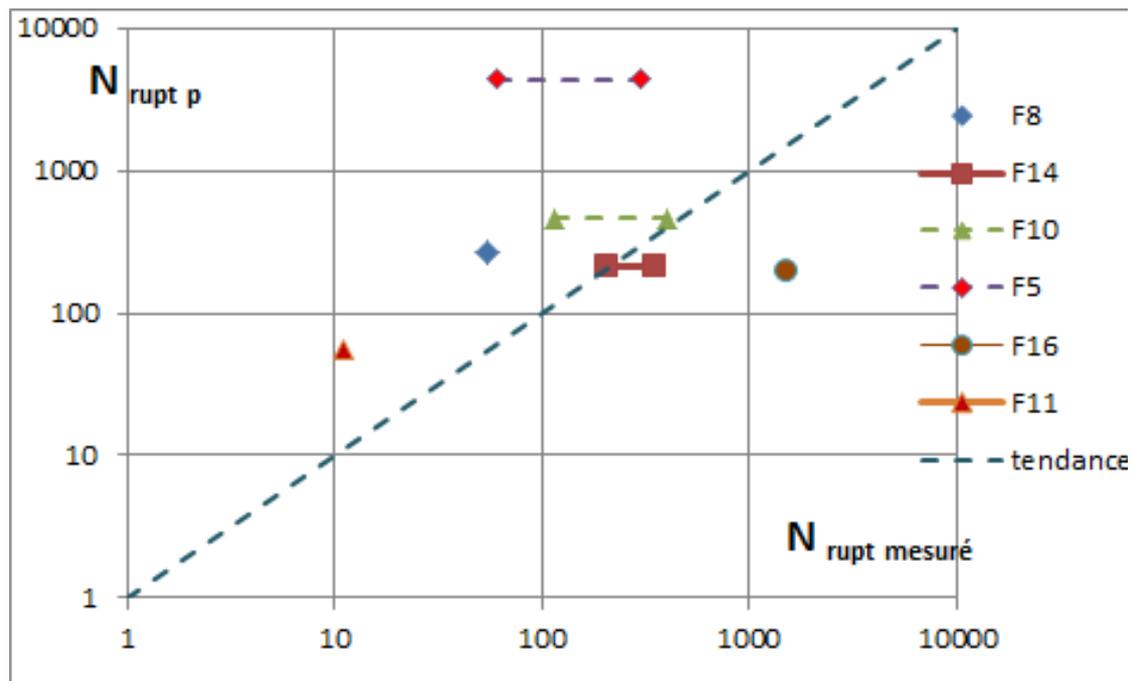


Figure 7.4.y : Corrélation entre le nombre de cycles à la rupture en fonction de l'orientation (p) du premier cycle et le nombre de cycles à la rupture mesuré.

8 PASSAGE AU CAS REEL

Le passage au cas du pieu réel ne peut ignorer divers effets d'échelle, à prendre en considération dans le cadre général de la similitude. Ces mêmes questions se posent d'ailleurs pour interpréter les essais en macro-gravité et en chambre d'étalonnage.

Classiquement, on estime que sont conservés le matériau (sol ou roche et pieu), et le niveau de contrainte, la réduction ne portant que sur la géométrie. C'est vrai dans la chambre d'étalonnage pour autant que le frottement sur les parois de la chambre soit négligeable. C'est presque vrai en centrifugeuse, à un gradient de contrainte près, d'autant plus faible que la longueur du bras supportant la nacelle est plus élevée. On oublie souvent que l'état initial du système pieu-sol doit aussi être le même, ce qui implique un mode d'installation similaire du prototype et du modèle réduit. Cette condition n'est pas la plus facile à réaliser.

Par ailleurs, le frottement latéral d'un pieu est conditionné par la nature du contact sol-pieu, c'est-à-dire de l'interface sol-pieu. On doit alors certainement considérer deux échelles concernant la rugosité du contact : celle de la morphologie sur une grande longueur (typiquement de l'ordre du rayon du pieu ou d'une fraction de celui-ci), et la rugosité à petite échelle (typiquement celle des grains de l'un des constituants en contact, ou des deux). Une épaisseur d'interface de 4 à $12d_{50}$ est souvent admise.

Un autre paramètre important influençant le frottement, et sa dégradation progressive sous sollicitation cyclique, est la rigidité normale extérieure ou latérale k_{ne} agissant du massif de sol/roche sur le

système {pieu + interface sol-pieu}. Soient E_p ou G le module pressiométrique du sol, R le rayon extérieur du pieu, cette rigidité a pour expression :

$$k_{ne} = 2 \frac{G}{R}$$

La rigidité normale extérieure ou latérale k_{ne} n'est pas un paramètre rhéologique de l'interface sol-structure. Lors de la sollicitation axiale d'un pieu, l'interface sol-pieu à petite échelle est la même géométriquement et rhéologiquement dans le modèle et dans le prototype, si les matériaux sont conservés. Il est bien connu que la mobilisation du frottement le long d'un pieu sollicité de manière monotone (ou lors d'un essai de cisaillement direct) est fonction :

- croissante de k_{ne} si l'interface manifeste une tendance dilatante (sable siliceux dense par exemple)
- décroissante si l'interface est au contraire contractante (sable siliceux lâche ou sable carbonaté à toute densité)

Il apparaît finalement que 3 niveaux de similitude représentés par leur échelle (de longueur) λ_i ($i = 1$ à 3) doivent être considérés :

Similitude λ_1 , à petite échelle (celle des grains –même matériau- constituant la calcarénite et le coulis), $\lambda_1 = 1$

Similitude λ_2 , à échelle moyenne (celle des aspérités du contact calcarénite-coulis), dans le cas de nos essais calcarénite-coulis, même matériau, $\lambda_2 \approx 1/2$

Similitude λ_3 , à grande échelle (celle du pieu et de son massif encaissant), en général $\lambda_3 \ll 1$

La similitude à grande échelle est gouvernée par la rigidité normale évoquée ci-dessus, qui se trouve en rapport inverse du coefficient de similitude géométrique

$$[k_{ne}] = [\sigma][L]^{-1} = \lambda_3^{-1}$$

Si le matériau et le niveau de contraintes sont conservés, la similitude à échelle moyenne n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques des aspérités, mais la similitude à grande échelle intervient à travers la rigidité normale lors des essais mécaniques. Une incidence est donc probable.

La similitude à petite échelle n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques de l'interface si le matériau est conservé.

En définitive, des simulations numériques ne seraient pas dénuées d'intérêt afin de dégager ces divers facteurs d'influence.

9 CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES

9.1 CONCLUSIONS

Cette étude fournit des éléments de base utiles pour la compréhension du comportement de l'interface pieu – roche tendre dans le cadre des pieux forés offshore installés dans les roches tendres carbonatées et soumis à des sollicitations axiales monotones et cycliques.

Quelle que soit la sollicitation appliquée à l'interface calcarénite- coulis, l'endommagement essentiel se produit dans la calcarénite, dont la résistance et la rigidité sont très inférieures à celles du coulis. Les essais CNC (résistance de pic 1,7MPa) et VC (résistance de pic 3,0MPa) sont fort différents l'un de l'autre en termes de mobilisation du frottement. L'essai CNC n'est pas représentatif de la résistance de l'interface calcarénite- coulis. L'essai VC est par contre très pertinent. Une différence importante est également à souligner entre le comportement des interfaces calcarénite-coulis lisse et rainurée. Bien que manifestant une tendance dilatante initiale due aux grains de la calcarénite, l'interface lisse est nettement moins résistante que l'interface rainurée, qui accroît la résistance d'interface pour raison purement géométrique, ce à quoi on pouvait s'attendre. La contractance finale, sur chemins CNC et VC atteste de la faible résistance mécanique des grains carbonatés et du ciment agglomérant ces grains dans la calcarénite.

9.1.1: Cisaillement VC à grande amplitude de déplacement relatif tangentiel

A grande amplitude de déplacement relatif tangentiel, on observe d'abord, en début de chargement, une très grande augmentation des contraintes normale et de cisaillement, suivie d'une chute brutale et définitive de ces contraintes, la résistance de l'interface s'effondrant alors littéralement. La notion de grand déplacement relatif tangentiel est à relier à la $\frac{1}{2}$ période des rainures usinées sur la calcarénite (la dizaine de mm). Le pic de contraintes est de l'ordre de 3MPa, soit 10 fois la contrainte normale initiale (qui était ici de 0,3MPa).

9.1.2 : Cisaillement VC à faible amplitude de déplacement relatif tangentiel ou à faible contrainte de cisaillement

Faible déplacement relatif tangentiel signifie une fraction (moins que millimétrique) de la $\frac{1}{2}$ période des rainures. Faible contrainte de cisaillement signifie une fraction ($\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{2}$) de la résistance au cisaillement en cisaillement monotone. Dans ce cas, on observe une augmentation très rapide les contraintes normale et de cisaillement.

9.1.3: Un cycle de cisaillement VC de moyenne amplitude

L'analyse des chemins de contraintes obtenus lors d'un aller-retour de moyenne amplitude permet la définition des angles de frottement de pic et résiduels de l'interface calcarénite – coulis : la valeur de pic se situe entre 53° et 59°, et la valeur résiduelle entre 34° et 40°.

9.1.4: Cycles de cisaillement VC

Les notions d'endommagement, de fatigue et d'accumulation sont évidentes lors des sollicitations cycliques. Les cisaillements à seuils imposés en contrainte de cisaillement ont montré une augmentation plus ou moins rapide de la contrainte normale, suivie parfois d'un plateau et d'une chute très brutale de cette contrainte (du moins pour les essais menés jusqu'à la rupture). La contrainte de cisaillement a également chuté en phase finale car l'asservissement ne pouvait pas opérer sur des états physiquement impossibles. Les aspérités de la calcarénite sont progressivement endommagées, « grignotées », et ce d'autant plus vite que l'amplitude du cisaillement est plus élevée, et plus proche d'une limite de stabilité, jusqu'à la rupture finale. Les phases de croissance puis de décroissance sont fort différentes de ce qui est constaté lors d'essais de cisaillement d'interfaces sable-structure, pour lesquels seule la phase de contractance est observée.

9.2 : PERSPECTIVES

Cette étude exploratoire a montré l'intérêt des essais de cisaillement calcarénite – coulis à volume constant et permis de maîtriser les modes opératoires. Les aspects suivants mériteraient des investigations complémentaires:

- Etude paramétrique complète du cisaillement calcarénite - coulis à volume constant (variations de la contrainte normale initiale, du cisaillement cyclique moyen, de l'amplitude cyclique).
- Quelques essais de cisaillement calcarénite – coulis à rigidité normale imposée pour déterminer de façon définitive l'influence du chemin de cisaillement, c'est-à-dire de la rigidité de la roche encaissante.
- Série d'essais sur le contact métal - coulis. En effet, l'interface métal coulis est soumise, par effet géométrique, à un niveau de cisaillement supérieur à l'interface roche – coulis et peut s'avérer critique dans certaines situations.
- Réalisation d'une étude en élément finis en vue de simuler l'influence de la taille des rainures sur le comportement de l'interface rugueuse. On pourrait étudier le cisaillement de plusieurs géométries constituées de trois dents chacune. Les tailles des rainures seraient identiques sur chaque interface mais variables d'une interface à l'autre (figure 9.1).
- Des essais de chargement des pieux réels forés avec différents types d'outils de forage sont nécessaires afin de déterminer l'influence de divers types de rugosité laissées par chaque outil de forage sur le comportement mécanique de l'interface et d'en déduire le facteur d'échelle entre les résultats des essais laboratoire et des essais réels. Des essais in situ seront de toute façon indispensables pour valider une méthode de dimensionnement qui

serait basée sur l'approche proposée (détermination des conditions d'interface par essais de cisaillement en laboratoire à volume constant ou rigidité constante).

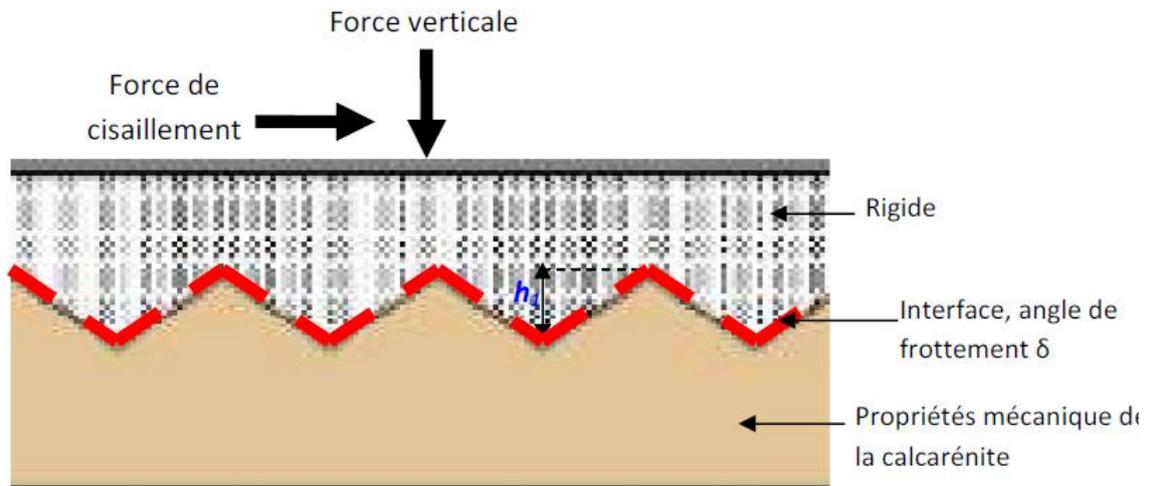


Figure 9.1 : Modèle numérique de contact calcarénite – coulis à étudier pour évaluer l'influence de la taille des aspérités dans le forage.

10 BIBLIOGRAPHIE

Abbs A.F. & Needham A.D. (1985), "Grouted piles in weak carbonate rocks", 17th Annual OTC in Houston, Texas, May 6-9, 1985. Paper number OTC 4852

Boulon, M. (1995), "A 3D direct shear device for testing the mechanical behavior and the hydraulic conductivity of rock joints", Int. Conf. on Mechanics of jointed and faulted rock, Rossmanith ed., Balkema pub., pp 407-413.

Clayton, C. R. I. and Saffari-Shooshtari, N. (1990), "Constant normal stiffness direct shear testing of chalk/concrete interfaces". Proceedings of the International Chalk Symposium, Brighton. London, GB, Thomas Telford, 233-238.

"Design for cyclic loading: piles and other foundations" (2013). Proc. of TC 209 workshop, 18th ICSMGE, A. Puech ed., Paris, 4th september 2013

"Existing design approaches for offshore pile design in weak carbonate rocks" (2014), Rapport SOLCYP, LC/13/SOL/47, June 2014

Fragio A.G., Santiago J.L. & Sutton VJR (1985), "Load tests on Grouted Piles in Rock" Proc. Offshore Technology Conference, OTC 4851

Hoonil Seol, Sangseom Jeong, Chunwhan Cho & Kwangho You, (2008), " Shear load transfer for rock-socketed drilled shafts based on borehole roughness and geological strength index (GSI)" International Journal of rock mechanics and mining sciences, vol. 45, issue 6

Johnston, I.W., Lam, T.S.K. (1989), "Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints-analysis". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 711-727.

Moon S. Nam & C. Vipulanandan, (2004), "Load distribution in drilled shafts socketed in limestone and clayshale", Department of civil engineering, university of Houston, Texas

Pra-ai, S. (2013), « Essais et modélisation du cisaillement cyclique sol-structure à grand nombre de cycles. Application aux pieux ». Thèse de Doctorat, Université Grenoble-Alpes

Seidel, J.P. & Haberfield, C.M. (1995), "Towards an Understanding of Joint Roughness". Rock Mechanics and Rock Engineering Journal, Vol 28, No. 2 : 69 – 92, May 1995.