



## RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 1 :  
Essais de cisaillement direct cycliques  
sol-structure sur le sable de Loon-Plage

Auteur : Marc BOULON

Organisme : L3SR

R/13/SOL/020  
LC/12/SOL/39  
Septembre 2013

# **SOLCYP - FICHE SIGNALÉTIQUE**

**TITRE : Essais de cisaillement direct cycliques sol-structure sur le sable de Loon-Plage**

**RAPPORT N°: R/13/SOL/020**

**DATE D'ETABLISSEMENT : septembre 2013**

**AUTEUR(S) : M. BOULON**

**ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : 3SR**

**THEME DE RATTACHEMENT : 1**

**LETTRE DE COMMANDE : LC/12/SOL/39**

# Sommaire

1. Introduction, contexte des essais
2. Données géotechniques existantes
3. Définition des essais proposés
  - 3.1 Contraintes de référence
  - 3.2 Essais « monotones »
    - 3.2.1 Essais monotones CNL
    - 3.2.2 Essais monotones CNS
  - 3.3 Essais cycliques
    - 3.3.1 Essais cycliques CNL
    - 3.3.2 Essais cycliques CNS
4. Récapitulation des essais et livrables
5. Cisaillement direct à  $\sigma_n = 100$  kPa
  - 5.1. Essais CNL
  - 5.2. Essai CNS
6. Cisaillement direct à  $\sigma_n = 400$  kPa
  - 6.1. Essais CNL
  - 6.2. Essai CNS
7. En conclusion

## 1. Introduction, contexte des essais

Il s'agit de cisaillement direct sol-structure, entre **matériau sableux de Loon-plage et plaque rugueuse**. Boîte de cisaillement  $\Phi$  60 mm, épaisseur d'échantillon de sol 20 mm. Ces essais seront considérés comme **drainés**, et donc en **contraintes effectives**. Deux séries d'essais : essais préliminaires dits « **monotones** » (1 charge-décharge), pour cerner les valeurs de pic, critique, et caractéristique, et essais **cycliques** proprement dits, menés à **5000 cycles**, sauf si rupture prématurée, à niveau de cisaillement moyen et amplitude imposés. Cette campagne d'essais est à mettre en relation avec les essais cycliques de **pieux, moulés et battus**, grandeur nature réalisés sur le site de Loon-Plage.

Les paramètres gouvernant le choix sont classiquement :

- Le poids volumique initial ( $\gamma_0$ ) ou la compacité initiale ( $I_{D0}$ )
- Le chemin de cisaillement (CNL ou CNS)
- Le niveau de contrainte normale cyclique moyenne  $\sigma_{ncm}$ , éventuellement initial (cas CNS,  $\sigma_{ncm0}$ )
- Le niveau cyclique moyen adimensionnel de cisaillement  $\eta_{cm} = \tau_{cm}/\sigma_{ncm}$
- L'amplitude cyclique adimensionnelle  $\Delta\eta = (\tau_{max} - \tau_{min})/\sigma_{ncm0}$

Il a été décidé lors de la réunion plénière SOLCYP du 9/10/2012 de procéder à une campagne réduite d'essais, en s'inspirant des résultats des campagnes plus complètes pour ultérieurement formuler les propriétés mesurées. Les investigations porteront donc sur :

- La valeur nominale du poids volumique ( $\gamma_0$ ) de sol sableux
- 2 niveaux de contrainte normale cyclique moyenne  $\sigma_{ncm}$
- 2 niveaux cycliques moyens adimensionnels de cisaillement  $\eta_{cm}$
- 2 niveaux d'amplitude cyclique adimensionnelle  $\Delta\eta$

## 2. Données géotechniques existantes

Nous considérons comme connues les données suivantes, extraites des rapports très antérieurs ou récents sur le site :

- Poids volumique humide, au dessus de la nappe phréatique :  $\gamma_{0h} = 18 \text{ kN/m}^3$
- Poids volumique saturé, sous la nappe phréatique :  $\gamma_{0sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ , ultérieurement désigné comme nominal. Nous en déduisons le poids volumique déjaugé (contraintes effectives)  $\gamma'_{0sat} = 11 \text{ kN/m}^3$ .
- Teneur en eau moyenne dans la zone saturée :  $w = 18 \%$  ultérieurement désignée comme  **nominale**.
- Coefficient de pression des terres au repos : classiquement,  $K_0 = 0,5$  . Mais à ce niveau de compacité on peut penser que  $K_0$  est plus fort, aussi bien en foré qu'en battu.
- Coefficient de majoration des contraintes normales agissant sur le fût des pieux, entre les cas foré et battu :  $C_{fb} = 3$ . Cette valeur est issue d'une remarque du Prof. Holeyman en réunion plénière du 09/10/2012.
- Profondeur du toit de la nappe phréatique  $h_w$ : Les données sont très variées : rapport très antérieur : 2,10 m ; rapport récent : 1,70 m. Rapport très récent (30-04-2012) : 2,00 m. Nous utiliserons la « dernière » des ces 3 valeurs, à savoir  **$h_w = 2,00\text{m}$** .
- Module pressiométrique (= module de distorsion) : rapport antérieur :  **$E_m \approx 11 \text{ MPa}$  entre 6 et 13 m** de profondeur. Rapport récent :  **$E_m \approx 15 \text{ MPa}$  entre 6 et 13 m** de profondeur.

- Géométrie des pieux : **forés : D = 420 mm et L = 10,5 m et/ou 8 m. battus : D = 406 mm et L = 13 m.**

### 3. Définition des essais proposés

Nous devons définir les contraintes normales de référence, puis les essais eux-mêmes (chemins de cisaillement, niveaux de cisaillement moyen, amplitude). Les valeurs de l'ensemble de ces paramètres ont fait l'objet d'échanges étayés et fructueux entre A. Puech et M. Boulon.

#### 3.1 Contraintes de référence

Nous avons décidé au cours de la réunion plénière SOLCYP du 9/10/2012 d'adopter, comme principe général, comme contrainte normale de référence agissant sur le fût du pieu, la **contrainte horizontale estimée agissant à une profondeur égale aux 2/3 de la longueur des pieux**. Mais, le profil de résistance du sol étant très fort vers le bas, il faut s'adapter aux conditions particulières, car on s'intéresse vraiment à la couche de sable très dense). Ceci dit, profils de  $E_m$  et  $P_f$  pratiquement linéaires / profondeur. Donc en théorie :

- Dans le cas des **pieux forés de 10,5 m de longueur**

$$\sigma_f = K_0[\gamma_{0h}(2,0m + \gamma'_{0sat}(\frac{2}{3}10,5m - 2,0m))]$$

$$\sigma_f = K_0[\gamma_{0h} * 2,0 + \gamma'_{0sat} * 5,0]$$

$$\text{Si } K_0 = 0,5 \quad \gamma_{0h} = 18kN/m^3 \quad \text{et} \quad \gamma'_{0sat} = 11kN/m^3, \text{ alors } \sigma_f = 45,5kPa$$

Mais, la valeur de  $K_0$  étant incertaine, et le pieu foré en traction faisant 10.5m de longueur, Il est vraiment dans le sable entre 6 et 10.5m. On peut penser que la pression horizontale après installation est imposée par le poids de la colonne de béton avant prise. La profondeur représentative est plutôt vers 8m:

$$p'g = 8.13 = 104 \text{ kPa}$$

Nous proposons donc de faire les essais à  $\sigma'_v \text{ CNL} = 100kPa$ .

$$\text{Finalement, } \sigma'_{H \text{ foré}} = 100 \text{ kPa.}$$

- Dans le cas des **pieux battus de 13 m de longueur**, en théorie :

$$\sigma_b = C_{fb}K_0[\gamma_{0h}(2,0m + \gamma'_{0sat}(\frac{2}{3}13m - 2,0m))]$$

$$\sigma_b = C_{fb}K_0[\gamma_{0h} * 2,0 + \gamma'_{0sat} * 6,67]$$

$$\text{Si } K_0 = 0,5 \quad C_{fb} = 3 \quad \gamma_{0h} = 18kN/m^3 \quad \text{et} \quad \gamma'_{0sat} = 11kN/m^3,$$

$$\text{alors } \sigma_b = 164,06kPa.$$

Les valeurs de  $\sigma'_r$  pieu =  $\sigma'_v$  CNL pour le pieu battu à Loon-Plage ont été estimées par la méthode ICP à partir du CPT.

La majeure partie de la capacité du pieu en traction dans le sable provient de la zone de sable entre 6 et 12m. A noter que le sol a été pré-foré entre 1 et 4m de profondeur pour maintenir le pieu vertical avant la mise en place du marteau (pas de contact pieu-sol sur cette hauteur)

On se place donc à 9m et on calcule  $\sigma'_r$  avec  $q_c \# 35\text{MPa}$  ;  $\sigma'_{vo} \# 100\text{kPa}$  et  $h/R = 10$ . ET l'on trouve  $\sigma'_r \text{ pieu} = 420 \text{ kPa} = \sigma'_v \text{ CNL}$

Il est proposé de prendre  $\sigma'_v \text{ CNL} = 400\text{kPa}$  pour les essais.

**Nous prendrons finalement,  $\sigma'_{H \text{ battu}} = 400 \text{ kPa}$ .**

### 3.2 Essais « monotones »

Ces essais doivent essentiellement permettre de connaître les propriétés de pic, critique, et caractéristique.

#### 3.2.1 Essais monotones CNL

Nous proposons **2 essais CNL** avec charge jusqu'à un **déplacement relatif tangentiel de 15 mm, puis décharge**, aux **contraintes normales respectives de (46 et 164 kPa)**, sur le matériau initialement à son **pooids volumique** et à sa **teneur en eau nominaux**.

#### 3.2.2 Essais monotones CNS

Les données géotechniques antérieures et récentes indiquent respectivement, dans la gamme des profondeurs 7-13 m, des modules pressiométriques  $E_m$  allant de 10 MPa et 15 MPa. Le module pressiométrique  $E_m$  est en principe égal au module de distorsion  $G$ .

Les pieux forés ont un diamètre  $D = 420 \text{ mm}$ , tandis que les pieux battus ont un diamètre  $D = 406 \text{ mm}$ . Si l'on admet que la rigidité horizontale ou latérale ( $k$ ) agissant du sol sur le pieu est de l'ordre de :  $k = \frac{2G}{R}$ , avec  $R$  rayon du pieu, les rigidités normales caractérisant les deux types de pieux sont :

- Pieux forés, à la profondeur  $\frac{2}{3} * 10,5\text{m} = 7\text{m}$ ,

$$k = 2 \frac{10}{0,21} \text{MPa} / \text{m} = 95,2 \text{kPa} / \text{mm} \quad . \text{ Décision } E_m = 15 \text{ MPa}, k = 143 \text{ kPa/mm.}$$

- Pieux battus, à la profondeur  $\frac{2}{3} * 13\text{m} = 8,67\text{m}$ ,

$$k = 2 \frac{15}{0,20} \text{MPa} / \text{m} = 150 \text{kPa} / \text{mm} \quad . \text{ Décision } E_m = 50 \text{ MPa}, k = 500 \text{ kPa/mm}$$

Il est donc proposé **2 essais CNS**, avec charge jusqu'à un **déplacement relatif tangentiel de 15 mm, puis décharge**,

- le premier à la **contrainte normale de 46 kPa** avec une **rigidité normale de 95 kPa/mm**,

- le second à la **contrainte normale de 164 kPa avec une rigidité normale de 150 kPa/mm.**

L'ensemble des essais « monotones » CNL et CNS donnera accès notamment aux résistances réduites de pic ( $\eta_{pic}$ ), et critique ( $\eta_{crit}$ ), ainsi qu'au niveau réduit de cisaillement caractéristique ( $\eta_{cara}$ ).

### 3.3 Essais cycliques

Ces essais seront conduits jusqu'à **5000 cycles** sauf si rupture avant ce stade, le matériau étant initialement à son **poinds volumique** et à sa **teneur en eau nominaux**. La définition du niveau de contrainte normale cyclique moyenne  $\sigma_{ncm}$  est simple (contraintes de référence calculées ci-dessus). Par contre les définitions du niveau cyclique moyen adimensionnel de cisaillement  $\eta_{cm}$ , et de l'amplitude cyclique adimensionnelle  $\Delta\eta$  sont très délicates. Ces deux paramètres doivent être représentatifs localement, à la fois du chargement moyen global et de l'amplitude cyclique globale agissant sur le pieu.

#### 3.3.1 Essais cycliques CNL

Les deux valeurs de  $\sigma_{ncm}$  retenues sont **46 et 164 kPa**. Les idées guidant le choix des deux valeurs de  $\eta_{cm}$  et des deux valeurs de  $\Delta\eta$ , sont d'observer l'effet de petits et de grands cycles, à partir de niveaux cycliques moyens faibles et élevés. Nous avons donc sélectionné :

- $\eta_{cm} = 0$  et  $\eta_{cm} = \eta_{pic}/2$

Les **faibles amplitudes** correspondant aux valeurs ci-dessus sont :

- Pour  $\eta_{cm} = 0$ ,  $\Delta\eta = \eta_{pic}/2$
- Pour  $\eta_{cm} = \eta_{pic}/2$ ,  $\Delta\eta = \eta_{pic}/2$

Les **amplitudes** élevées correspondant aux valeurs ci-dessus sont :

- Pour  $\eta_{cm} = 0$ ,  $\Delta\eta = \eta_{pic}$
- Pour  $\eta_{cm} = \eta_{pic}/2$ ,  $\Delta\eta \approx \eta_{pic}$

#### 3.3.2 Essais cycliques CNS

Les deux valeurs de  $\sigma_{ncm}$  retenues sont **46 et 164 kPa**, et les valeurs respectives de rigidité latérale restent les mêmes que précédemment : **95 kPa/mm** et **150 kPa/mm.** Dans le cas CNS, les essais à faible niveau cyclique moyen ont peu d'intérêt car requérant un extrême grand nombre de cycles pour atteindre la rupture. Il en est de même pour les essais à niveau cyclique moyen et amplitude élevée, qui atteignent la rupture pour un très faible nombre de cycles. Reste à explorer les essais à niveau cyclique moyen et amplitude faible. Nous avons choisi :

- $\eta_{cm} = \eta_{pic}/2$ ,  $\Delta\eta = \eta_{pic}/2$

#### 4. Récapitulation des essais et délivrables

Le tableau 1 ci-après résume les essais initialement initialement décidés (4 monotones et 10 cycliques). Finalement, l'essai cyclique monotone final à grande amplitude de cisaillement a été jugé suffisant pour caractériser les paramètres cycliques de base. Les essais monotones n'ont donc pas été rapportés ici. L'angle critique mesuré en monotone est néanmoins reporté sur les figures.

Essai	Monotone/Cyclique	CNL/CNS	$\sigma_{n0}$ $\sigma_{ncm0}$ (kPa)	k (kPa/mm)	$\eta_{cm} / \eta_{pic}$	$\Delta\eta / \eta_{pic}$
ML1	Monotone	CNL	100			
ML2	Monotone	CNL	400			
MS1	Monotone	CNS	100	143		
MS2	Monotone	CNS	400	500		
CL1	Cyclique	CNL	100		0	1/2
CL5	Cyclique	CNL	400		0	1/2
CL2	Cyclique	CNL	100		0	1
CL6	Cyclique	CNL	400		0	1
CL3	Cyclique	CNL	100		1/2	1/2
CL7	Cyclique	CNL	400		1/2	1/2
CL4	Cyclique	CNL	100		1/2	1
CL8	Cyclique	CNL	400		1/2	1
CS1	Cyclique	CNS	100	143	1/2	1/2
CS2	Cyclique	CNS	400	500	1/2	1/2

Tableau 1

Les délivrables correspondants sont les fichiers complets des essais d'une part (contraintes normale et de cisaillement, déplacements relatifs normal<sup>1</sup> et tangentiel en fonction du temps, sous forme électronique vu leur taille), et leur interprétation préliminaire en termes déplacements relatifs cycliques moyens normal ( $[u]_{cm}$ ) et tangentiel ( $[w]_{cm}$ ) en fonction du nombre de cycles (sous forme de figure et électronique). Seules les figures sont présentées dans ce rapport..

<sup>1</sup> Avec correction éventuelle de perte de matériau



## 5. Cisaillement direct à $\sigma_n = 100$ kPa

### 5.1. Essais CNL (CL1, CL2, CL3, CL4)

Essai CL1 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 0$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$

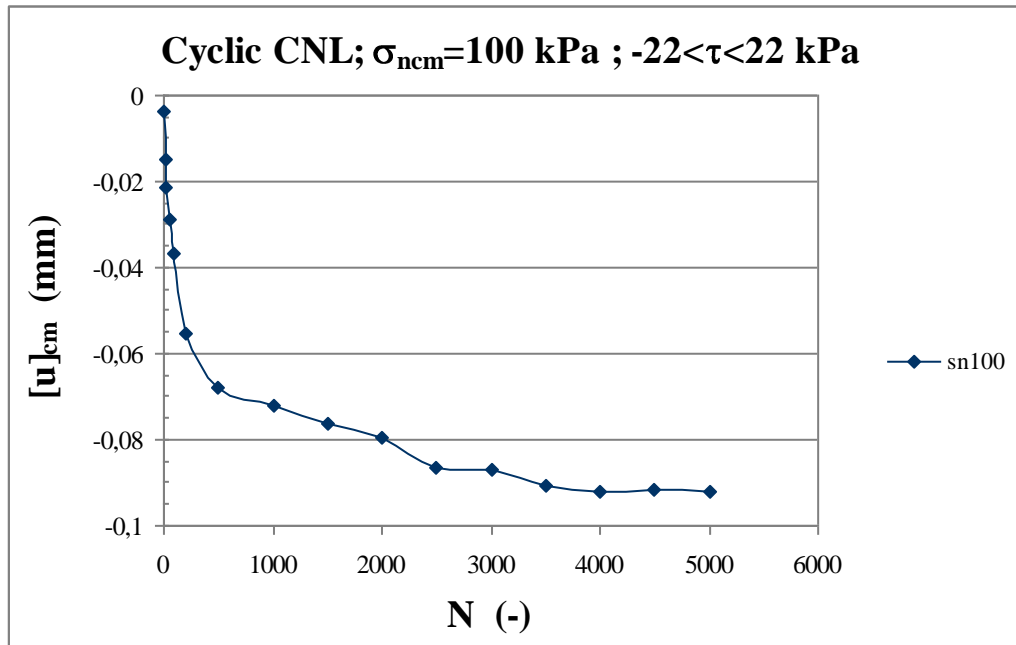


Figure 1.

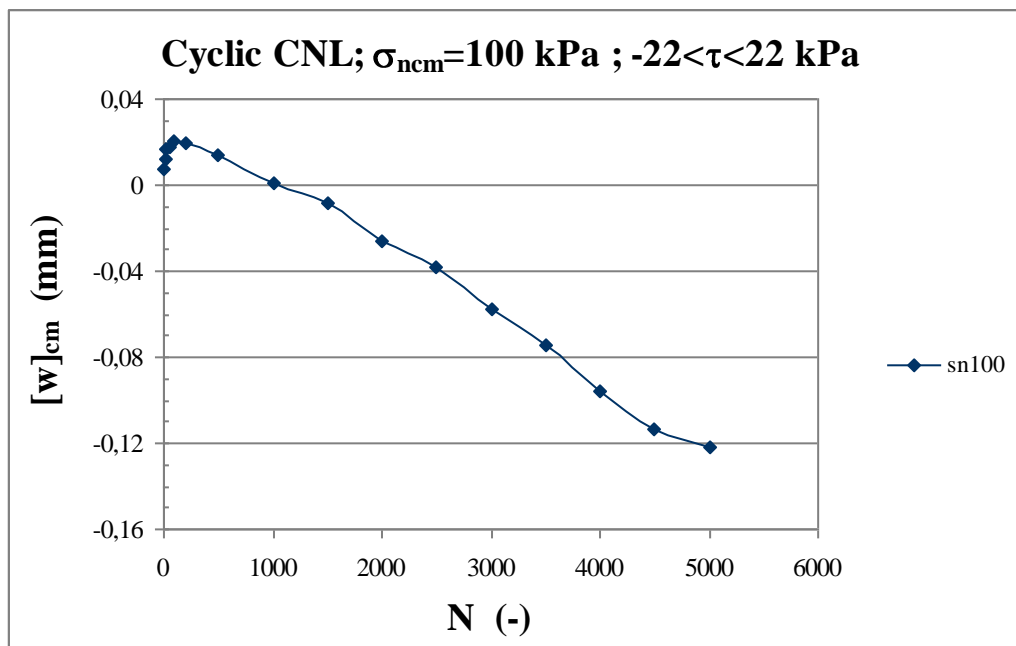


Figure 2. On notera une dérive de  $[w]_{cm}$ , qui devrait en toute rigueur être nul.

Essai CL2 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 0$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1$

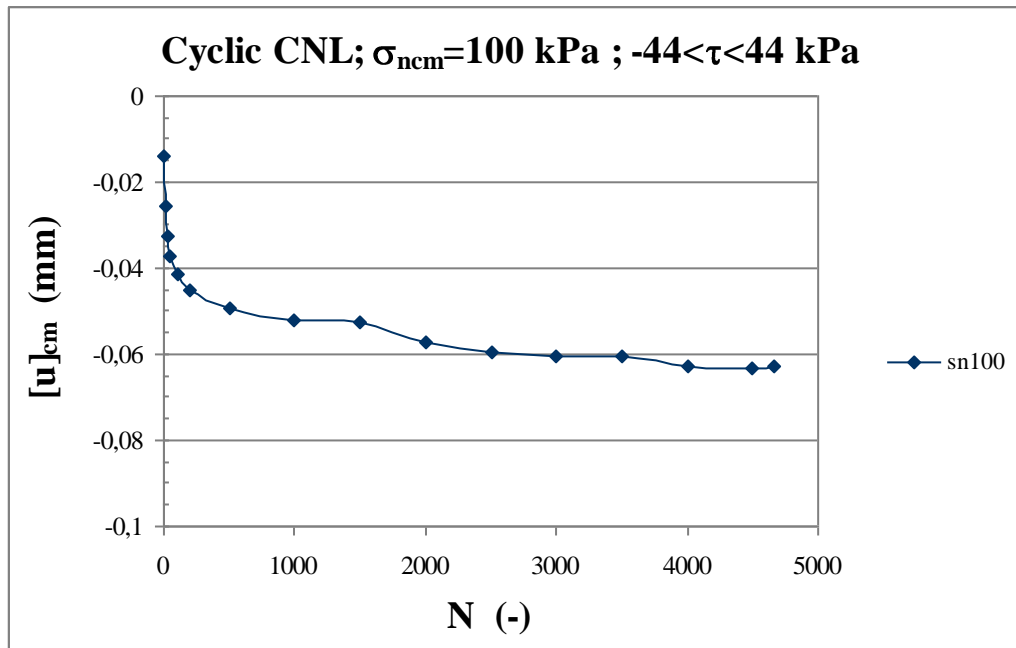


Figure 3.

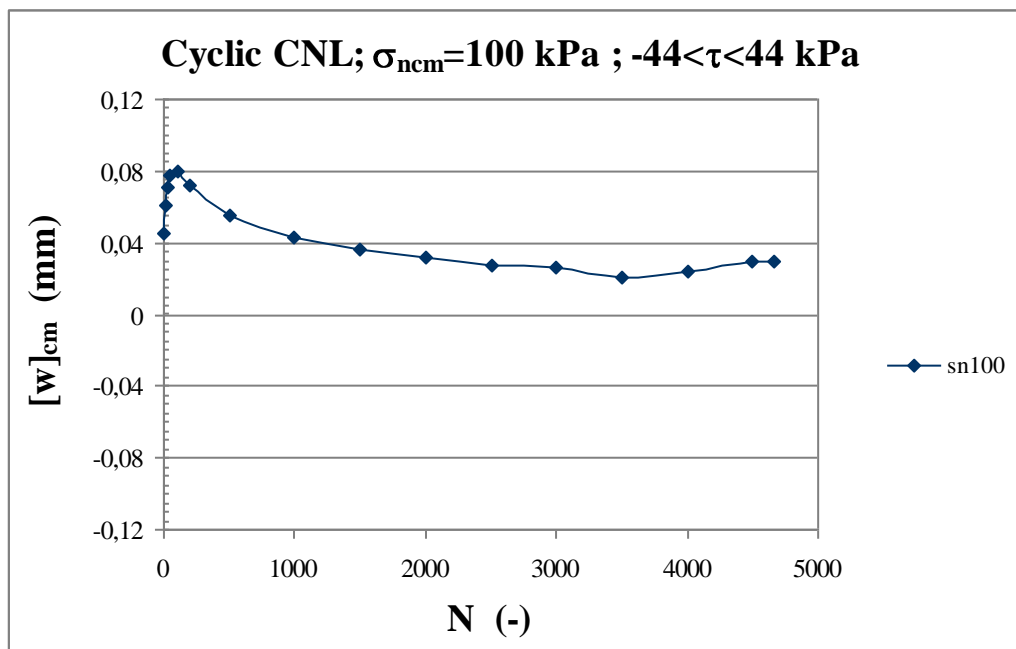


Figure 4. On notera une légère dérive de  $[w]_{cm}$ , qui devrait en toute rigueur être nul.

Essai CL3 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$

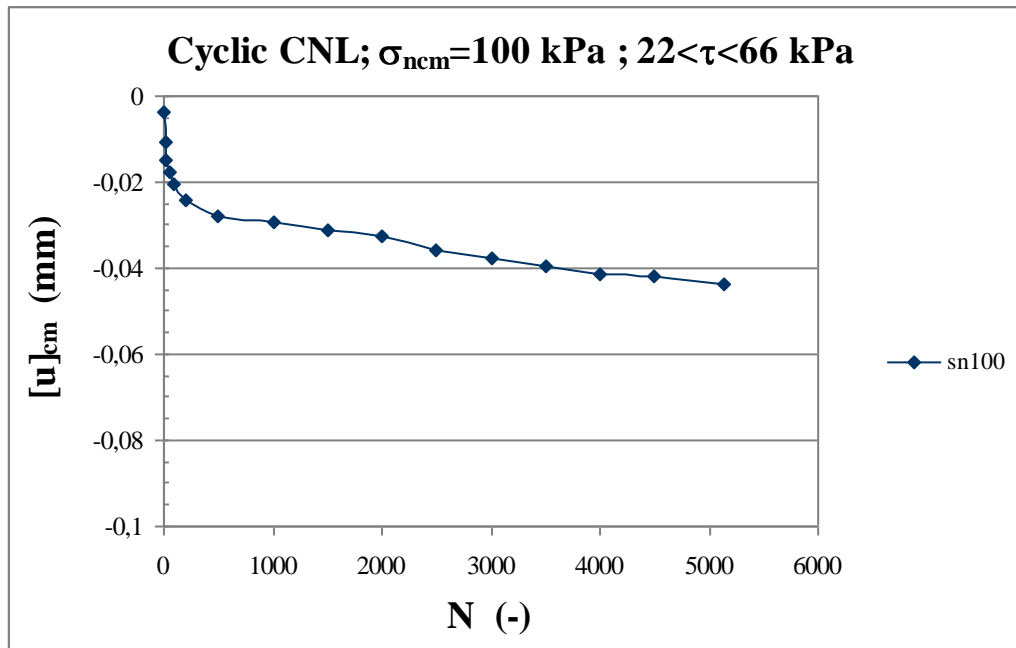


Figure 5.

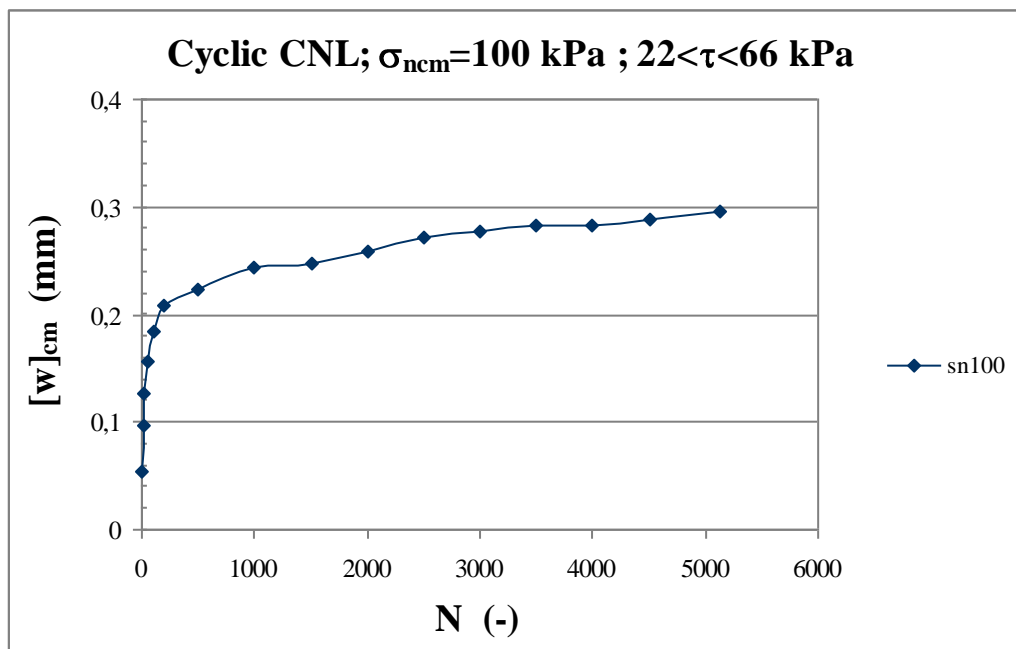


Figure 6.

Essai CL4 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2, \Delta\eta / \eta_{pic} = 1$

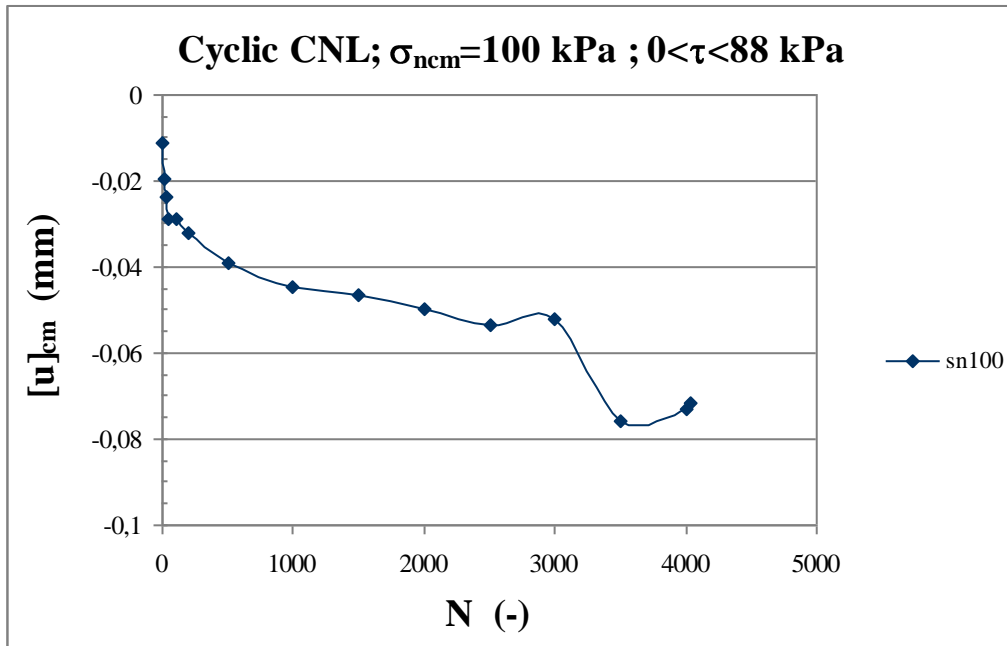


Figure 7.

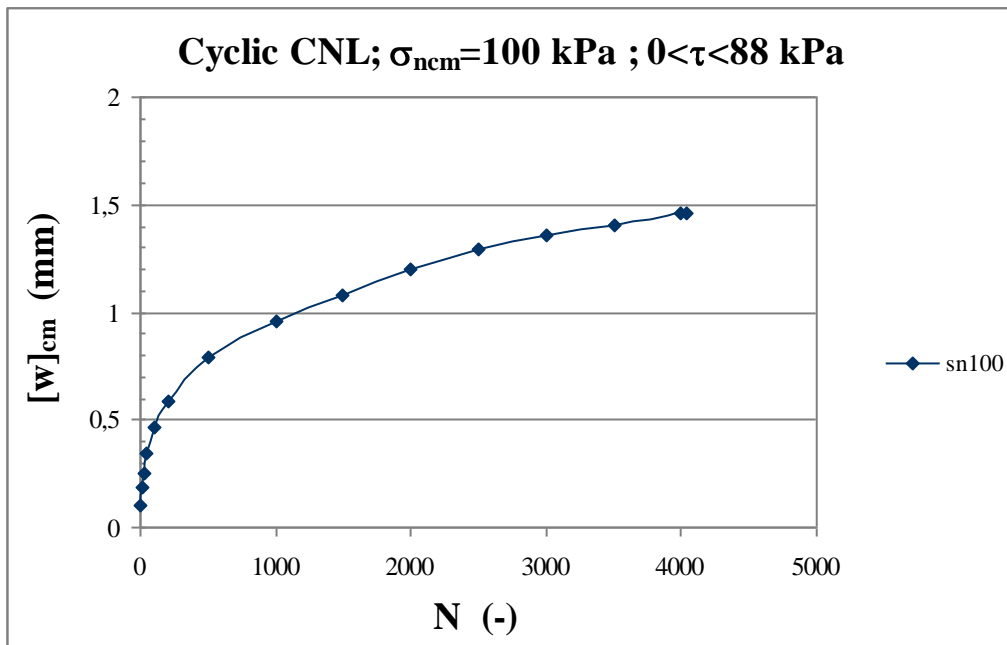


Figure 8.

5.2. Essai CNS (CS1) :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $k = 143 \text{ kPa/mm}$

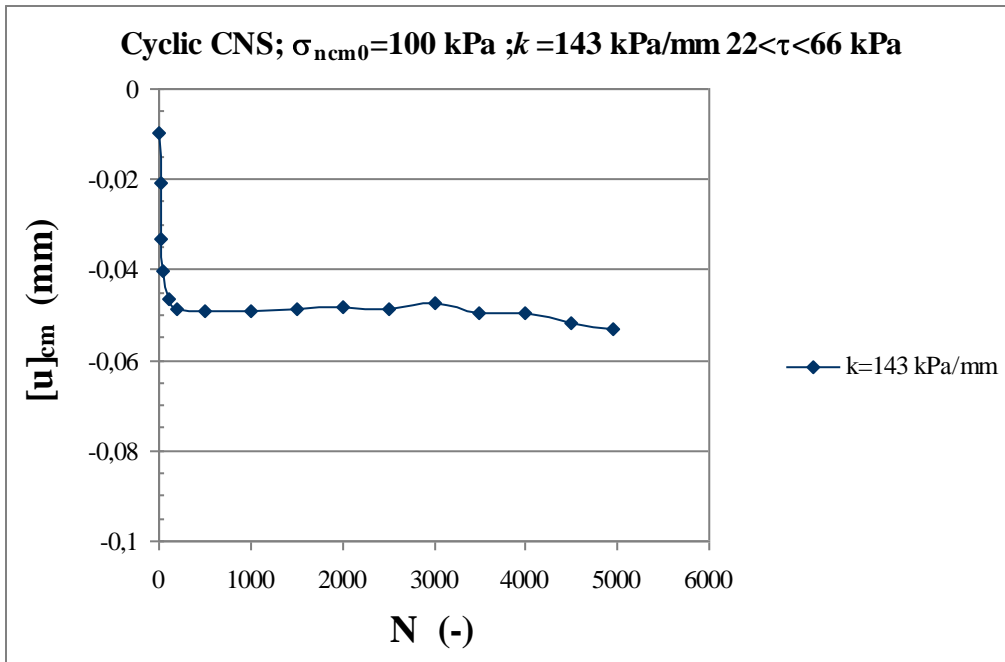


Figure 9.

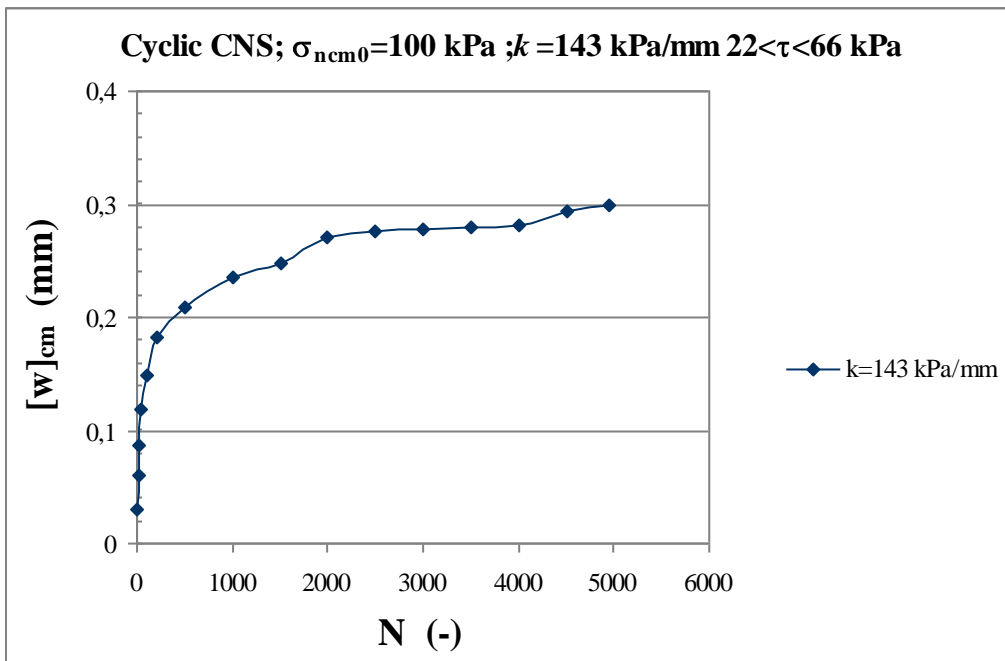


Figure 10.

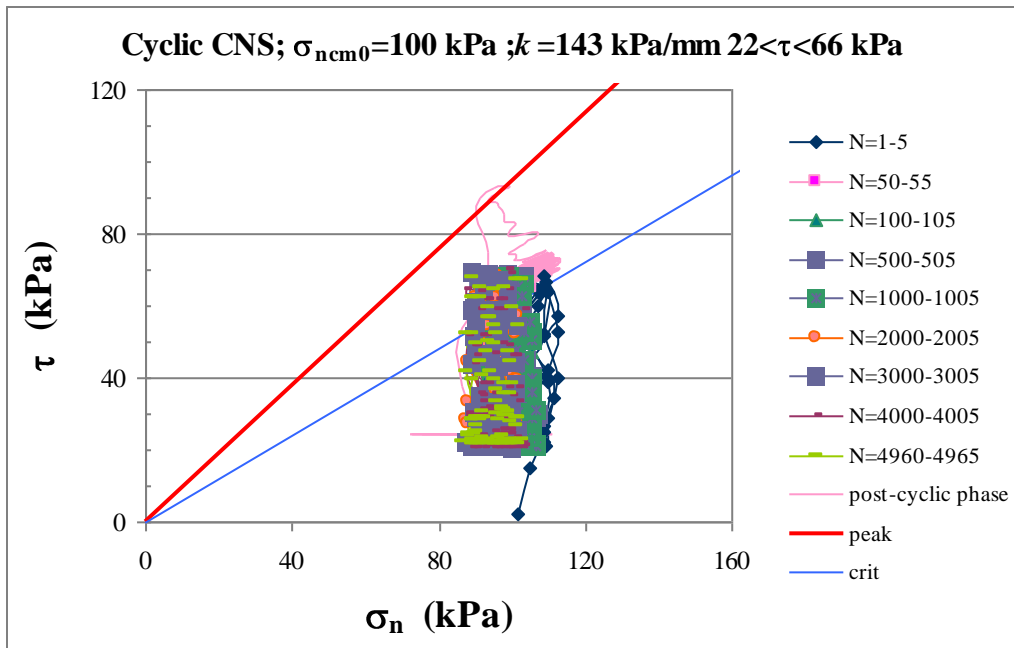


Figure 11. On notera que la rupture ( $\sigma_{ncm}$  atteignant la valeur critique, ligne rouge) est encore loin au bout de 4965 cycles.

## 6. Cisaillement direct à $\sigma_n = 400$ kPa

### 6.1. Essais CNL (CL5, CL6, CL7, CL8)

Essai CL5 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 0$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$

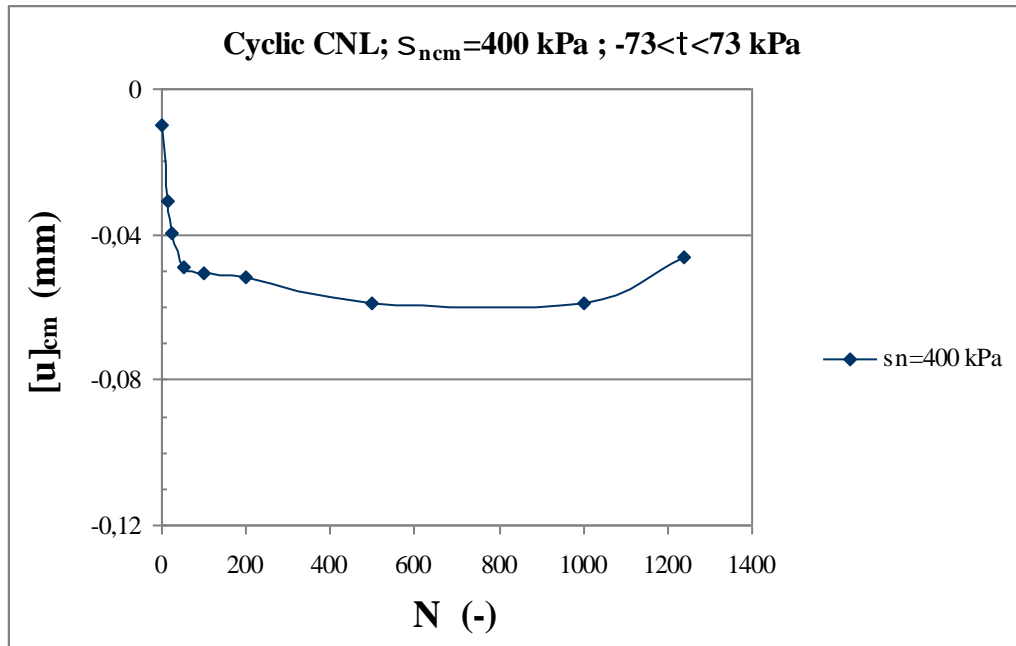


Figure 12.

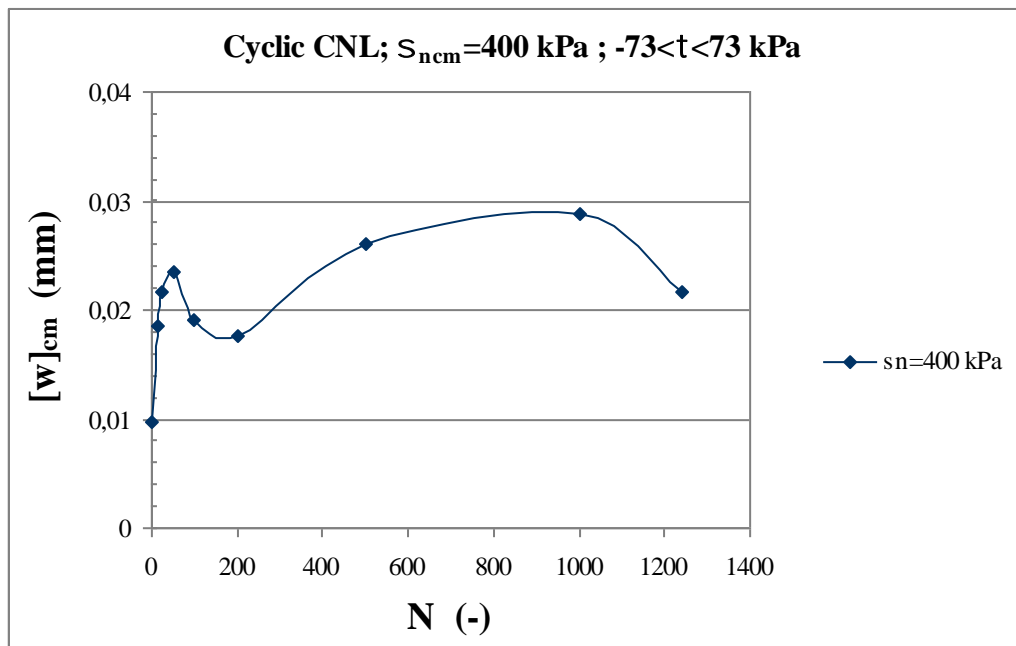


Figure 13.

L'essai CL5 a du être interrompu prématurément (1240 cycles) par suite d'un problème d'asservissement (cf. figure 14). Ce problème est vraisemblablement imputable au niveau élevé de contrainte normale.

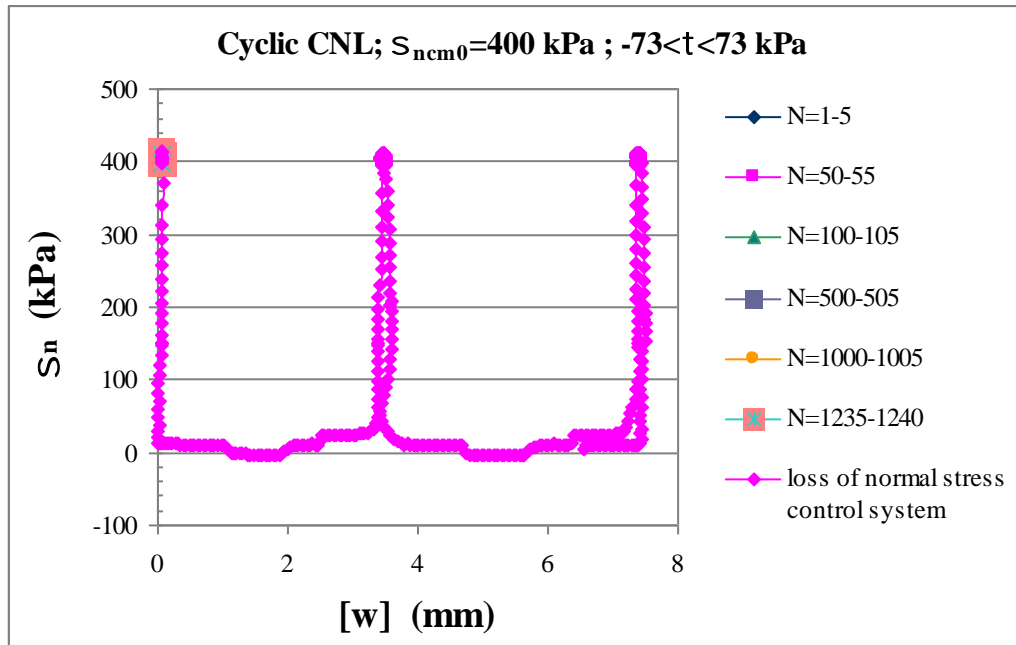


Figure 14. .

**Essai CL6 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 0$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1$**

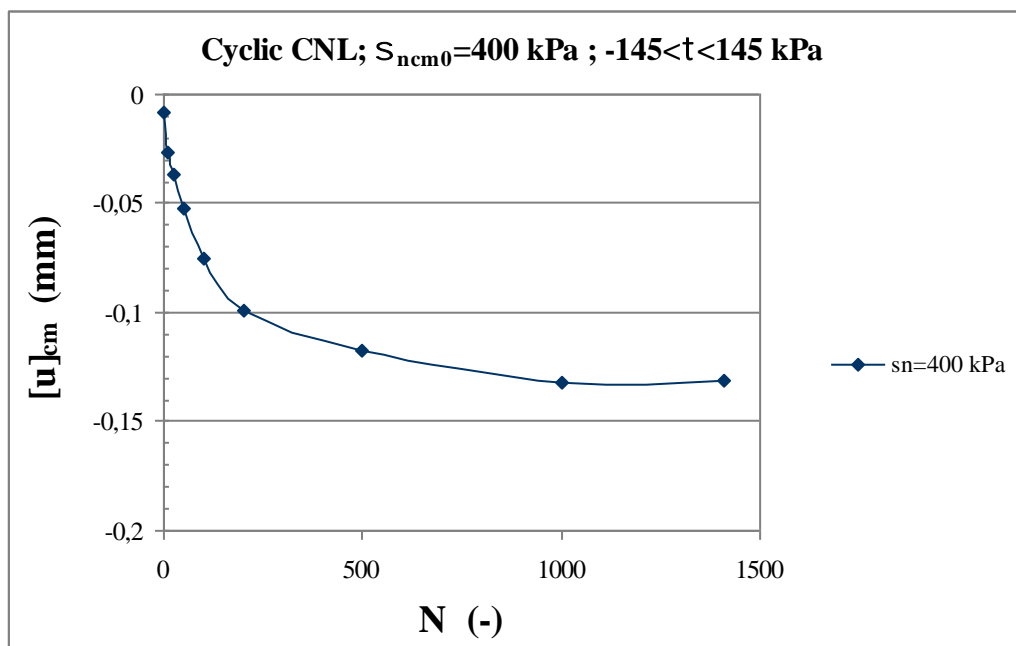


Figure 15.



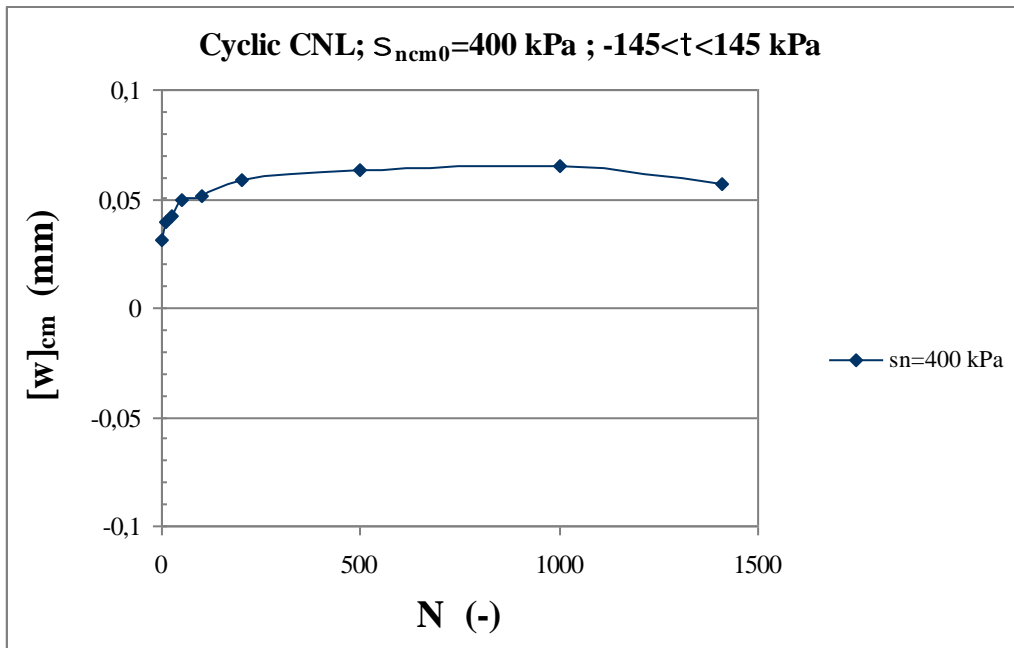


Figure 16.

L'essai CL6 a du être interrompu prématurément (1414 cycles) par suite d'un problème d'asservissement (cf. figure 17). Ce problème est vraisemblablement imputable au niveau élevé de contrainte normale.

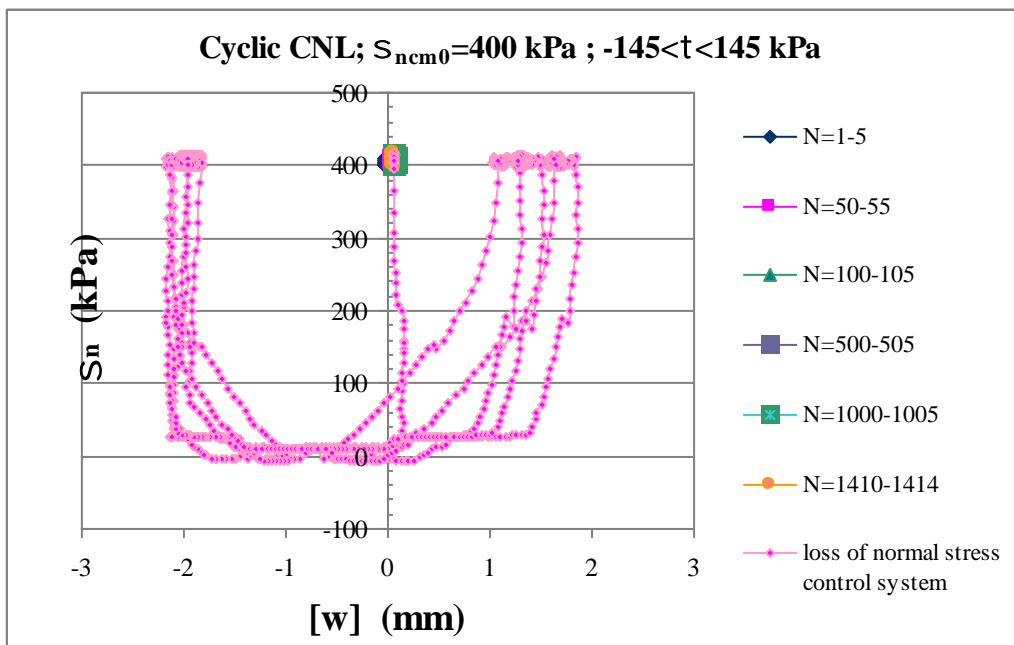


Figure 17.

Essai CL7 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$

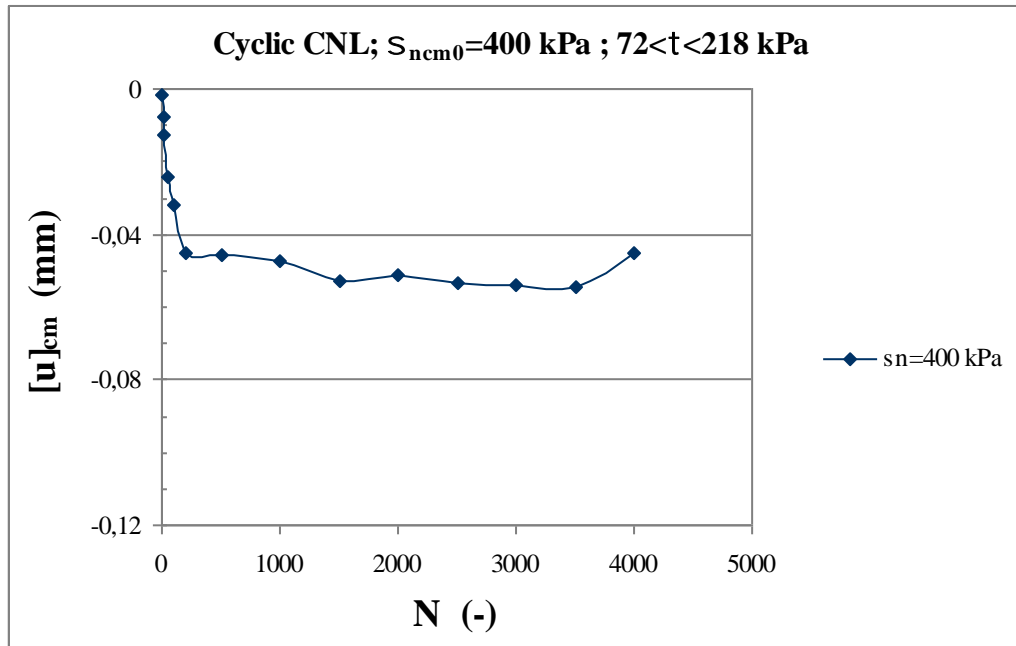


Figure 18.

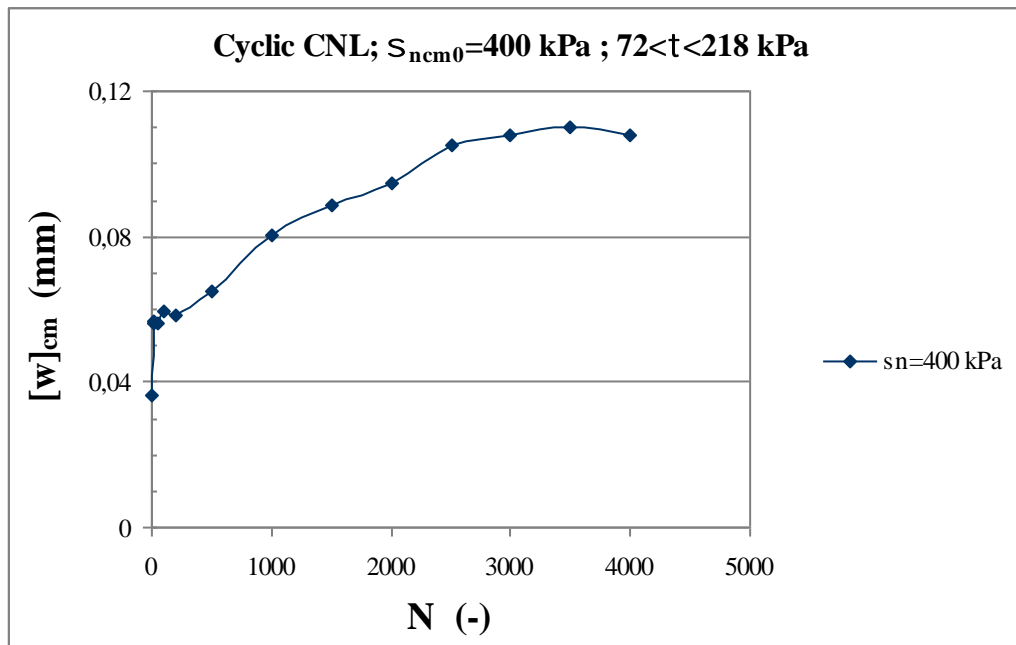


Figure 19.

L'essai CL7 a du être interrompu prématurément (3785 cycles) par suite d'un problème d'asservissement (cf. figure 20). Ce problème est vraisemblablement imputable au niveau élevé de contrainte normale

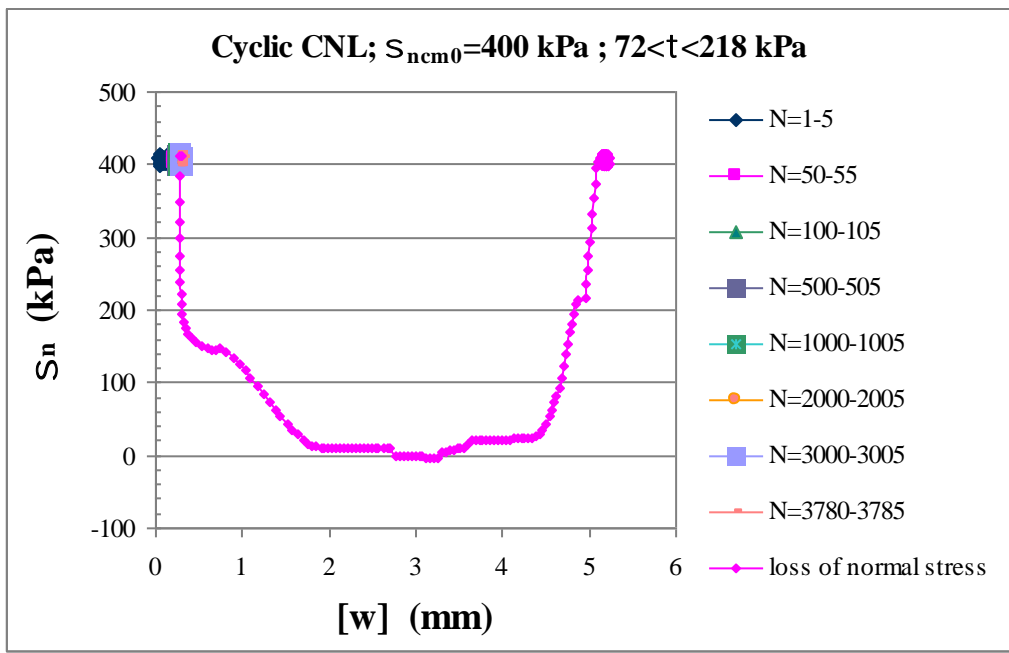


Figure 20.

Essai CL8 :  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2, \Delta\eta / \eta_{pic} = 1$

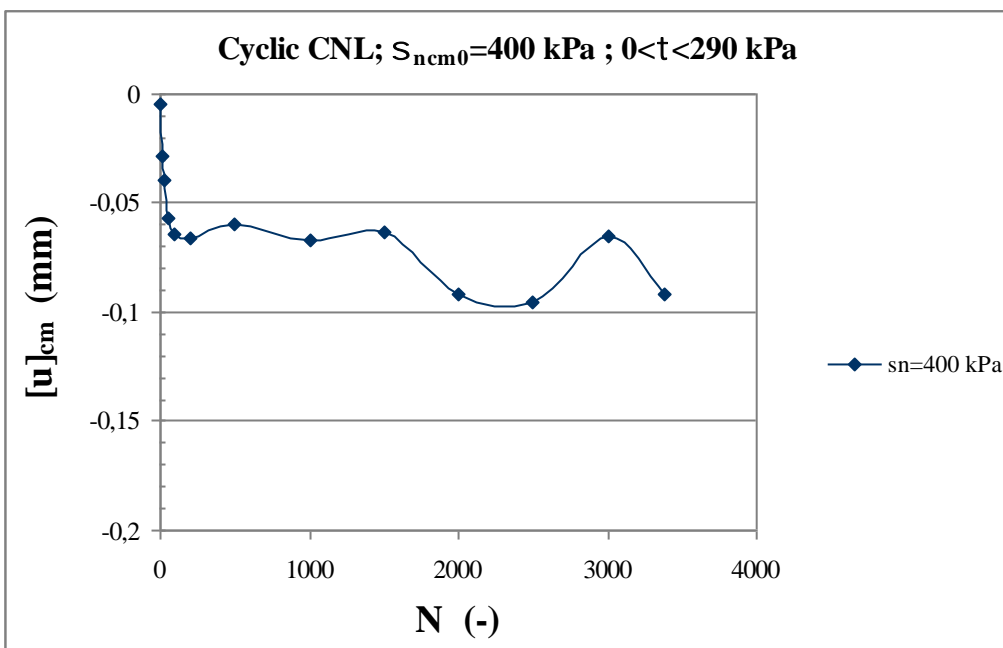


Figure 21.

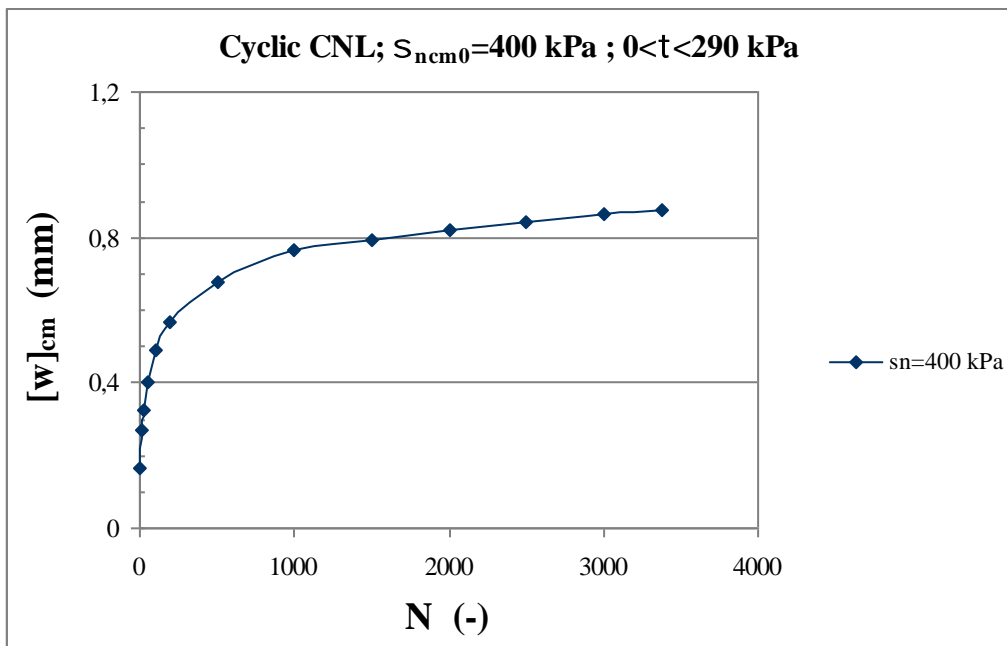


Figure 22.

L'essai CL8 a du être interrompu prématurément (3380 cycles) par suite d'un problème d'asservissement (cf. figure 23). Ce problème est vraisemblablement imputable au niveau élevé de contrainte normale

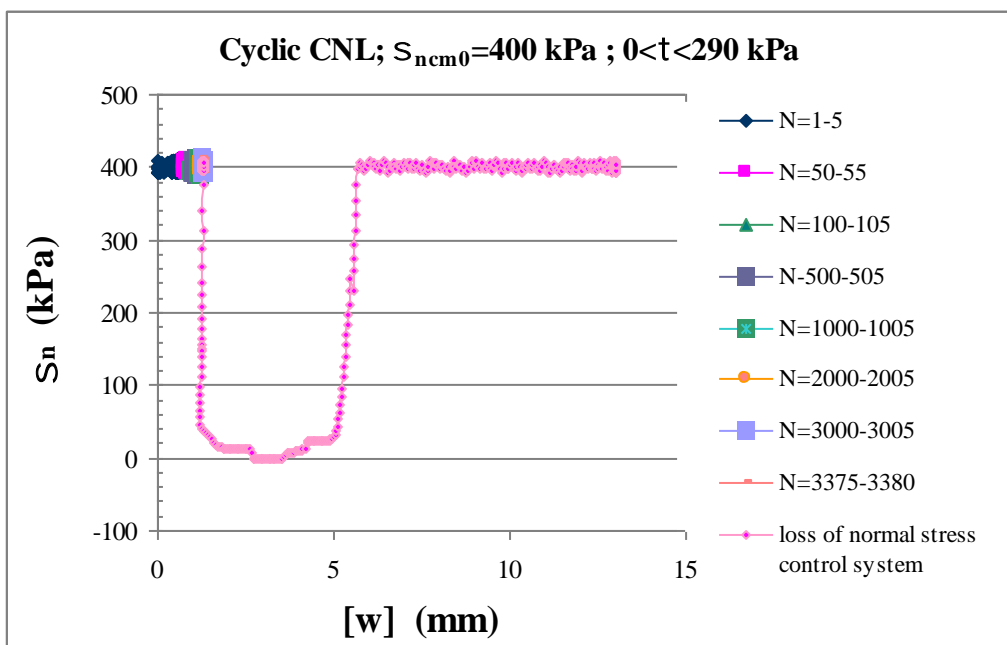


Figure 23.

6.2. Essai CNS (CS2) ;  $\eta_{cm} / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $\Delta\eta / \eta_{pic} = 1/2$ ,  $k = 500 \text{ kPa/mm}$

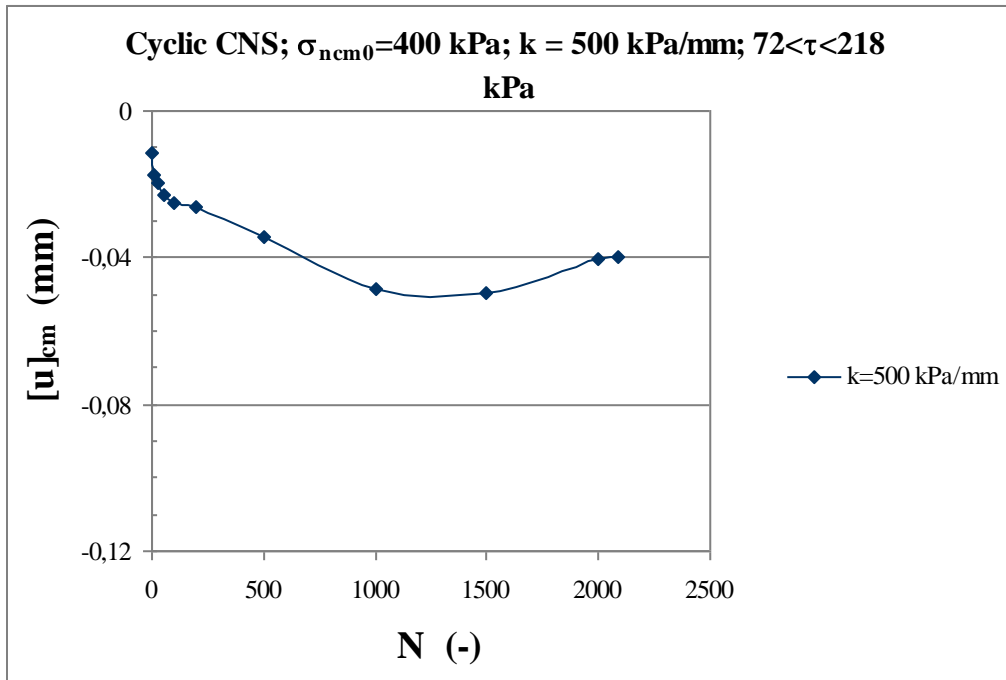


Figure 24.

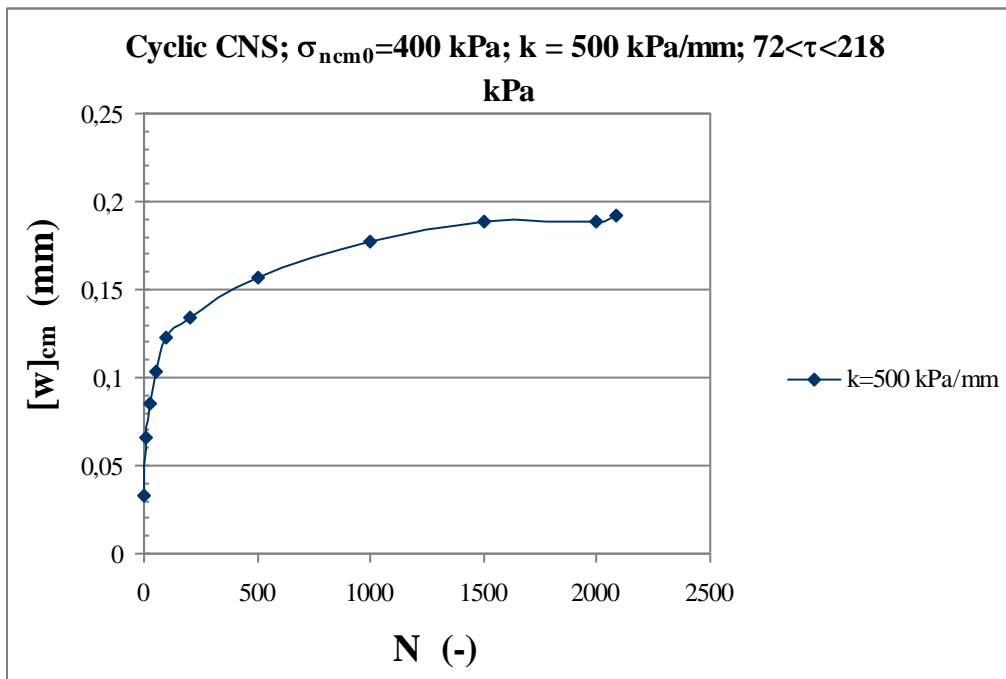


Figure 25.

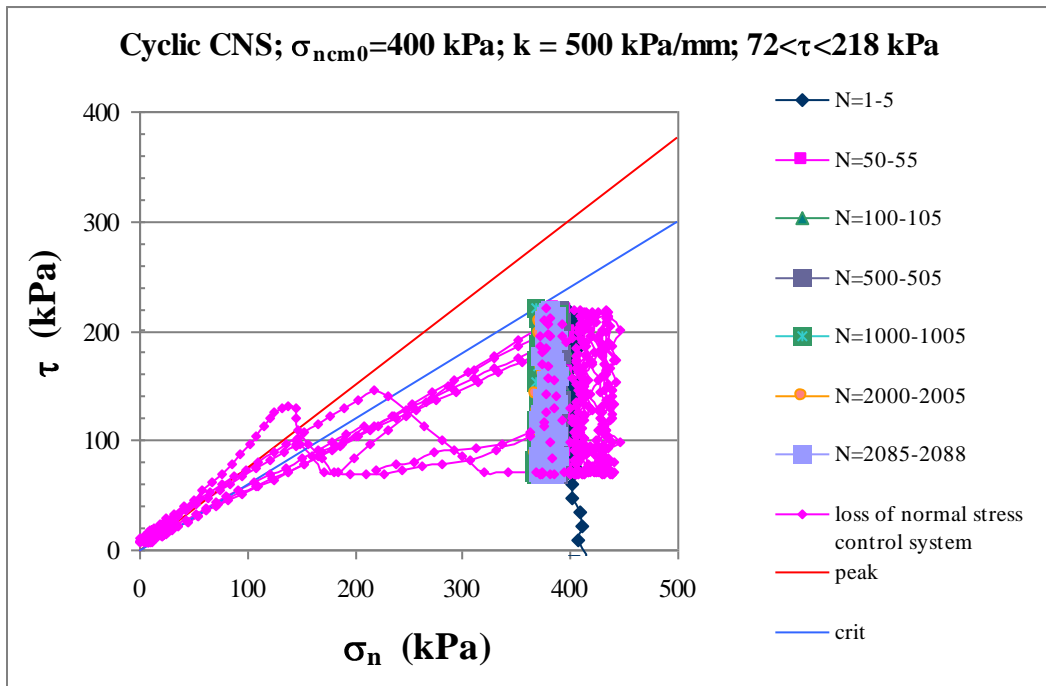


Figure 26. On notera que la rupture ( $\sigma_{ncm}$  atteignant la valeur critique, ligne rouge) est encore loin au bout de 2088 cycles.

L'essai CS2 a du être interrompu prématurément (2088 cycles) par suite d'un problème d'asservissement (cf. figure 27). Ce problème est vraisemblablement imputable au niveau élevé de contrainte normale

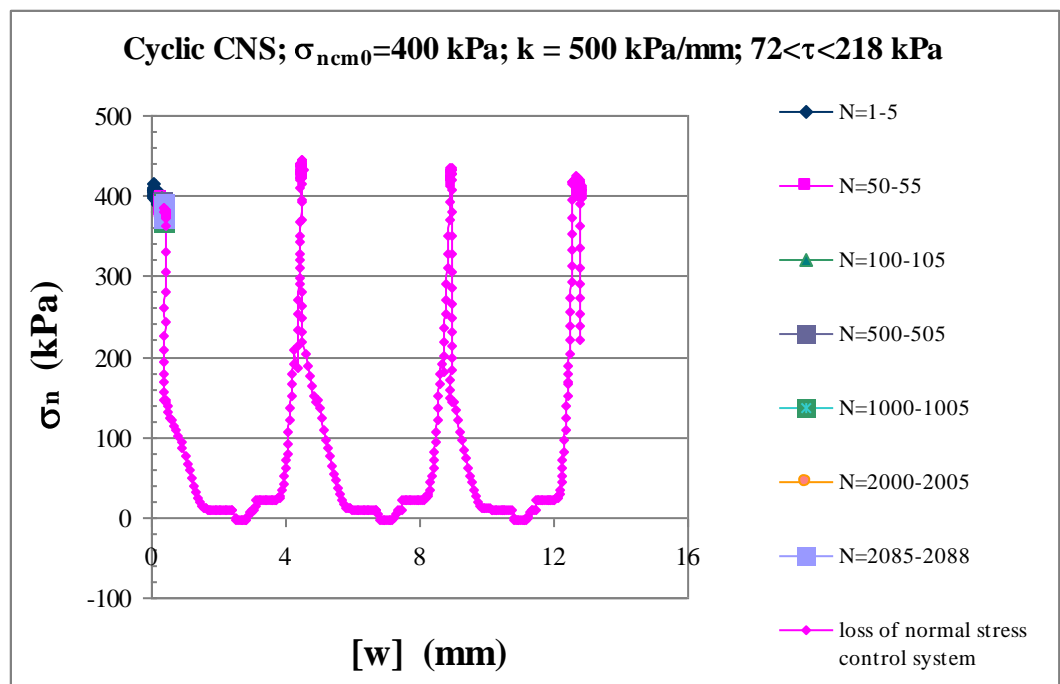


Figure 27.

## **7. En conclusion**

Compte tenu de notre expérience concernant le cisaillement direct cyclique sol structure relatif au sable de Fontainebleau (thèse de Suriyavut Pra-ai, accessible au public depuis le site TEL - thèses en lignes), il nous semble que cette série d'essais est fiable, à ceci près que les essais à forte contrainte normale n'ont pu être menés à leur terme prévu, 5000 cycles. Il convient maintenant pour les utilisateurs, d'exploiter les résultats de ces essais, le formalisme du chemin cyclique moyen nous paraissant le plus approprié.