

# **CHAPITRE 3**

**ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS  
DES ESSAIS**

### 3.1 INTRODUCTION

Les essais décrits ci-après et dont les résultats ont été utilisés dans cette thèse ont été effectués dans le cadre du projet de recherche Recos intitulé : "Research on the reliability of moment resistance connection of steel buildings " et qui fait l'objet du rapport D.Beg, A. Plumier, C. Remec, L. Sanchez [D5] dont la synthèse est la suivante:

L'objectif visé dans ce projet de recherche était le suivant : Etude de la réponse sismique des structures en acier considérant les propriétés mécaniques des matériaux à vitesse d'allongement élevée. Cette étude exploite un programme d'essais complet qu'on peut résumer comme suit :

- Essais sur éprouvettes qui sont classées en quatre types principaux sont illustrés par les exemples de la figure 3.1. Chaque éprouvette est soumise à un essai de traction dynamique sous une vitesse d'allongement donnée et sous une température donnée. Notre étude consiste à comprendre l'influence de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement des matériaux. Nous nous sommes dès lors proposés de définir des relations mathématiques compatibles avec les résultats obtenus lors des essais en nous basant sur les lois issues de la littérature, et de réaliser une étude plus approfondie destinée à évaluer l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement dynamique des éléments structuraux.
- Essais sur assemblages soudés en vraie grandeur. Ces essais sont exécutés pour obtenir, d'une part, des informations sur le comportement dynamique des assemblages soudés dans le domaine des vitesses de déformation élevées et, d'autre part, pour étudier l'influence des différents procédés de soudage sur la qualité des joints soudés.
- Essais sur les structures en vraie grandeur. Ces essais sont exécutés pour étudier d'une part, l'influence de la vitesse de déformation sur la capacité de déformation des éléments structuraux et, d'autre part, sur la capacité de rotation des assemblages et des sections critiques et enfin d'étudier dans quelle mesure la vitesse de déformation influence le comportement en fatigue oligocyclique des éléments structuraux.

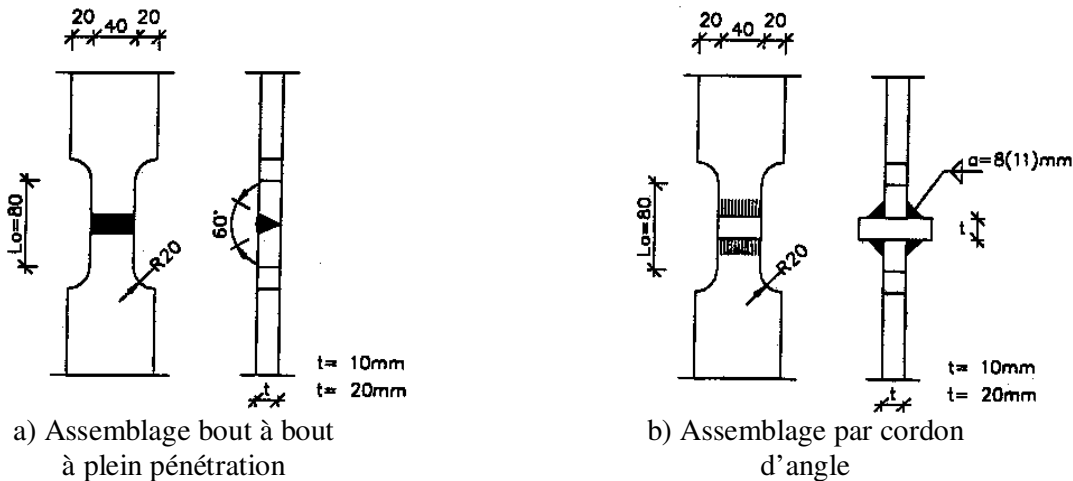
### 3.2. ETUDE EXPERIMENTALE

#### 3.2.1. ESSAIS SUR EPROUVETTES ET PROPRIETES DES MATERIAUX

Les essais de laboratoire sont conduits sur des éprouvettes dont la forme et les dimensions sont données à la figure 3.1. Ces éprouvettes sont plates, de largeur  $l$  égale à 40 mm, et d'une longueur calibrée  $L_C$  égale à 80 mm ; la zone calibrée est raccordée par des congés circulaires de rayon  $r = 20$  mm aux têtes d'amarrage; la longueur  $L_C$  entre repères sert à mesurer les allongements;  $c$ 'est la base de mesure.

Les éprouvettes sont fabriquées en deux épaisseurs 10 mm et 20 mm avec deux types de joints soudés au milieu de la base : le premier est un assemblage bout à bout à pleine pénétration, le deuxième est un assemblage par cordon d'angle.

Les cordons de soudure sont dimensionnés selon les règles de l'EC3 [E1]. Pour éviter la rupture dans le métal déposé, on a réalisé des cordons dont la résistance est supérieure à la plus forte résistance des tôles assemblées.


**Figure 3.1.** Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes d'essai sont classées en quatre groupes, chaque groupe d'éprouvettes est caractérisé par l'épaisseur de la base, le type de joint soudé et par la hauteur de gorge du cordon d'angle. Ces valeurs sont données au Tableau 3.1.

Groupe N°	Type de joint	Epaisseur (mm)	Gorge (mm)	Nombre
1	FW	20	11	7
2	FW	10	8	7
3	FPW	20	--	8
4	FPW	10	--	8

FW – Assemblage par cordon d'angle, FPW – Assemblage bout à bout

**Tableau 3.1.** Caractéristiques géométriques des éprouvettes

Chaque éprouvette est testée sous une vitesse de déformation donnée et sous une température donnée. Les vitesses de déformation d'essai sont ( $0.00035 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.01 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.055 \text{ s}^{-1}$ ) et les températures d'essai sont ( $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Pour des raisons d'identification du métal de base la première éprouvette du premier groupe et du deuxième groupe sont utilisées pour déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les éprouvettes et les essais à  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  sont éliminés dans ces deux groupes. Pour déterminer les propriétés mécaniques du métal de base des tôles assemblées constituant les éprouvettes d'essai, deux essais de traction standard et une série d'essais de résilience (essais sur barreaux entaillés, Charpy-V-notch) sont conduits sur des tôles d'épaisseurs de 10 mm et de 20 mm, les résultats obtenus sont donnés en valeurs moyennes au Tableau 3.2. et à la figure 3.2.

Eprouvette	Epaisseur (mm)	$f_y(\text{MPa})$	$f_u(\text{MPa})$	A	Z
1.8.1	20	243	418	0,326	0,680
1.8.2	20	229	413	0,333	0,678
2.8.1	10	320	485	0,347	0,709
2.8.2	10	326	480	0,344	0,710

A : l'allongement à la rupture Z : réduction de la section

**Tableau 3.2.** Caractéristiques mécaniques du métal de base des éprouvettes testées

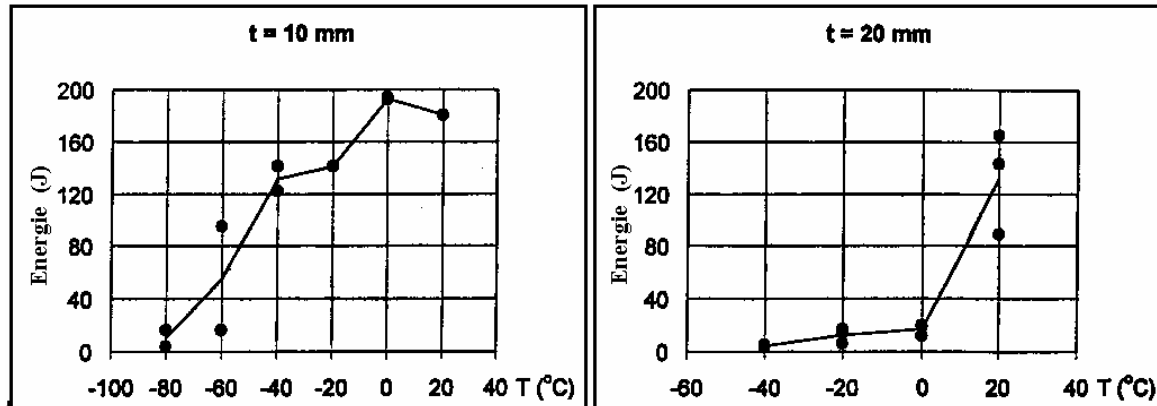


Figure 3.2. Résultats de l'essai de choc sur barreaux entaillés

A partir de ces résultats, le métal constituant les éprouvettes de 20 mm d'épaisseur peut être classé selon les recommandations de l'EC3 [E2] EN 10025 JR comme appartenant à la catégorie des aciers S 235JR. Le métal constituant les tôles de 10 mm ayant une ténacité plus grande est classé comme appartenant à la catégorie des aciers S 275 J2. On constate pour les barreaux de 20 mm d'épaisseur une chute importante d'énergie absorbée pour  $t < 20^{\circ}\text{C}$ . La température de transition est aux alentours de  $+10^{\circ}\text{C}$

### 3.2.1.1. Description d'essai

Tous les essais sur éprouvettes sont réalisés sur la machine ZWICK de capacité 700 kN. La vitesse de déformation maximale permise par cette machine n'est que de  $0.07 \text{ s}^{-1}$ , le contrôle des déplacements a permis d'en déduire la vitesse de déformation de l'éprouvette le long de l'essai, selon la capacité de cette machine, la vitesse maximale pratiquée est de  $0.05 \text{ s}^{-1}$ .

Pour les essais qui sont réalisés à basse température les éprouvettes sont refroidies dans une solution de nitrogène liquéfiée, après avoir atteint la température prescrite par l'essai, l'éprouvette est emballée dans une feuille d'aluminium pour maintenir sa température constante durant l'essai. Cette procédure est autorisée pour les essais effectués sous les vitesses de déformation élevées  $0.01 \text{ s}^{-1}$  et  $0.05 \text{ s}^{-1}$ , dont la durée d'exécution est très courte. Les essais à basse vitesse de déformation  $0.003 \text{ s}^{-1}$  sont effectués uniquement sous température ordinaire. Durant les essais les forces et les déplacements sont enregistrés et les modes de rupture sont observés.

### 3.2.1.2. Résultats d'essai sur éprouvettes

Les diagrammes contrainte-déformation sont déduits des enregistrements force-déplacement et de la géométrie des éprouvettes, ces diagrammes montrent clairement que la résistance et la ductilité des éprouvettes dépendent fortement de la vitesse de déformation et de la température d'essai.

Les caractéristiques mécaniques mesurées au cours de chaque essai constituent un ensemble de paramètres qu'on peut classer en deux types :

- Les paramètres qui décrivent la résistance

La limite élastique  $f_y$  définie conformément à la procédure d'essai ECCS [E3] et la contrainte ultime  $f_u$ .

Spécimen	Epaisseur (mm)	Type de soudage	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Temp, (°C)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	ε <sub>max</sub>	Mode de rupture
1.1	20	FW	0,05	+20	291	481	0,309	BM
1.2	20	FW	0,0003	+20	255	450	0,315	BM
1.3	20	FW	0,01	+20	283	470	0,302	BM
1.4	20	FW	0,01	-20	228	494	0,312	BM
1.5	20	FW	0,05	-20	313	507	0,327	BM
1.6	20	FW	0,01	0	298	485	0,304	BM
1.7	20	FW	0,05	0	291	493	0,324	BM
2.1	10	FW	0,05	+20	396	519	0,238	BM
2.2	10	FW	0,0003	+20	358	497	0,233	BM
2.3	10	FW	0,01	+20	382	511	0,224	BM
2.4	10	FW	0,01	-20	393	545	0,227	BM
2.5	10	FW	0,05	-20	395	552	0,231	BM
2.6	10	FW	0,01	0	367	530	0,224	BM
2.7	10	FW	0,05	0	361	534	0,223	BM
3.1	20	FPW	0,05	+20	281	458	0,337	BM
3.2	20	FPW	0,0003	+20	244	437	0,405	BM
3.3	20	FPW	0,01	+20	274	447	0,342	BM
3.4	20	FPW	0,01	-20	300	476	0,367	BM
3.5	20	FPW	0,05	-20	296	484	0,388	BM
3.6	20	FPW	0,01	0	276	461	0,392	BM
3.7	20	FPW	0,05	0	285	468	0,346	BM
3.8	20	FPW	0,05	-40	317	502	0,374	BM
4.1	10	FPW	0,05	+20	350	503	0,278	BM
4.2	10	FPW	0,0003	+20	315	438	0,322	BM
4.3	10	FPW	0,01	+20	334	496	0,286	BM
4.4	10	FPW	0,01	-20	373	525	0,301	BM
4.5	10	FPW	0,05	-20	363	531	0,302	BM
4.6	10	FPW	0,01	0	356	511	0,281	BM
4.7	10	FPW	0,05	0	352	514	0,288	BM
4.8	10	FPW	0,05	-40	396	548	0,300	BM

FW – Assemblage par cordon d'angle, FPW – Assemblage bout à bout, BM – Métal de base

**Tableau 3.3.** Résultats des essais sur éprouvettes

- Les paramètres qui décrivent la ductilité

La déformation maximum  $\epsilon_{\max}$  ou l'allongement à la rupture, la déformation ultime  $\epsilon_u$  et

le rapport de la contrainte ultime à la limite élastique  $\frac{f_u}{f_y}$ .

Les valeurs mesurées et les modes de rupture observés des éprouvettes sont représentés au Tableau 3.3. En ce qui concerne le mode de ruine des éprouvettes, il est intéressant de noter que toutes les ruptures ont pris place dans le métal de base et non pas dans le métal déposé.

Pour faciliter l'analyse des résultats, on a représenté graphiquement à la figure 3.5 les principaux paramètres de résistance et de ductilité  $f_y$ ,  $f_u$ ,  $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_{\max}$ ,  $\frac{f_u}{f_y}$ , en fonction de la

vitesse de déformation et de la température. Ces valeurs sont normalisées par rapport à leurs valeurs de base correspondantes obtenues sous la vitesse de déformation de 0.003 s<sup>-1</sup> et sous la température ordinaire. En examinant les diagrammes des paramètres étudiés, on peut tirer des conclusions qu'on détaille selon le type de paramètres.

### 3.2.1.2.1. Paramètres de résistance

La limite élastique  $f_y$  croît avec la vitesse de déformation et décroît avec la température. De plus la sensibilité de cette limite d'élasticité s'accroît continuellement avec la vitesse de déformation. La contrainte ultime  $f_u$  croît également avec la vitesse de déformation et décroît quand la température croît. Toutefois sa sensibilité à la vitesse de déformation est moindre que celle de la limite élastique. Le taux de variation maximum atteint par la limite élastique  $f_y$  est égal à 24% , ce taux est enregistré par l'éprouvette d'essai 3.8 ( Temp.  $-40^\circ\text{C}$  , strain-rate  $0.05 \text{ s}^{-1}$  ) , Alors que le taux de variation maximum atteint par la contrainte ultime  $f_u$  est égal à 15 % , ce taux est enregistré par l'éprouvette d'essai 3.8 ( voir Tableau 3.3 ) , il faut noter que les éprouvettes d'essai 3.8 et 3.8 sont testées sous les conditions les plus sévères.

Les diagrammes qui représentent la résistance à la traction sont mesurés directement et présentent une très bonne régularité, les diagrammes qui représentent la limite d'élasticité sont établis indirectement selon la procédure d'essai ECCS [E3] .

Si on regarde uniquement les résultats des essais sous la température ordinaire, on constate que la limite d'élasticité  $f_y$  a subi une variation maximum égale à 10% , la contrainte ultime a subi une variation maximum égale à 5% .

Si on regarde uniquement les résultats des essais sous la vitesse de déformation maximum  $0.05 \text{ s}^{-1}$  , on constate que la limite d'élasticité a subi une variation maximum égale à 10% sous la température  $20^\circ\text{C}$  et 13% sous la température  $-40^\circ\text{C}$  , les variations de  $f_u$  sont relativement faibles.

### 3.2.1.2.2. Paramètres de ductilité

Les paramètres qui décrivent la ductilité  $\frac{f_u}{f_y}$  et  $\epsilon_{\max}$  présentent des variations moins importantes que celles des paramètres qui caractérisent la résistance  $f_y$  et  $f_u$  . On constate une

décroissance modérée de ductilité  $\frac{f_u}{f_y}$  quand la vitesse de déformation croît et la température

decroît. Une plus large décroissance de  $\frac{f_u}{f_y}$  est observée au groupe 4, elle est égale à 9% .

Dans le cas des éprouvettes à assemblages bout à bout à pleine pénétration ( groupes 1 et 2 ) , la déformation de rupture décroît quand la vitesse de déformation croît. Une décroissance maximum égale à 17% est observée pour l'éprouvette d'essai 3.1 .

Les variations de  $\epsilon_{\max}$  avec la température restent faibles. Dans le cas des assemblages par cordons d'angles, il n'y a presque pas de variation de la déformation de rupture  $\epsilon_{\max}$  quand la vitesse de déformation et la température varient. Les variations enregistrées par  $\epsilon_{\max}$  restent inférieures à 4% , relativement aux éprouvettes testées sous la température  $20^\circ\text{C}$  et à la vitesse de déformation  $0.003 \text{ s}^{-1}$ .

Cet échec n'est pas le fruit du type d'assemblage, il s'explique par une grande déformation du cordon d'angle qui est due à des défauts localisés dans la zone de raccordement de la surface du cordon et de la surface du métal de base. A la fin de chaque essai des entailles géométriques sous forme de vide étaient clairement visibles. C'est cette déformabilité excessive qui a compensé la décroissance de  $\epsilon_{\max}$  pour les vitesses de déformation élevées.

En se référant toujours aux résultats des essais, on constate qu'indépendamment des propriétés du métal de base, l'épaisseur des éprouvettes a une influence non négligeable sur

les paramètres de résistance et de ductilité. En effet  $f_y$  et  $f_u$  présentent un accroissement plus important dans le cas des éprouvettes épaisses et la ténacité du matériau diminue lorsque l'épaisseur des pièces augmente, la ténacité du matériau diminue également quand la vitesse de déformation augmente et/ou quand la température baisse.

En ce qui concerne les deux types de joints soudés utilisés, la plus importante différence concerne la grande déformabilité des joints à cordons d'angles. Une étude comparative de l'influence de la vitesse de déformation et de la température montre que  $f_y$  et  $f_u$  croissent plus ou moins linéairement quand la température croît. Alors l'augmentation de la vitesse de déformation produit un accroissement non linéaire pour  $f_y$  et  $f_u$ . Cet accroissement est plus prononcé au seuil de la vitesse de déformation  $0.01 \text{ s}^{-1}$  et encore plus graduel aux vitesses de déformations plus élevées.

Les diagrammes des figures 3.3 et 3.4 représentent respectivement l'évolution de la limite élastique et de la contrainte ultime en fonction de la vitesse de déformation. On a reporté sur les courbes analytiques qui sont établies au Chap.2-§ 2.3.3.7 les points expérimentaux obtenus pour les quatre groupes d'éprouvettes d'essais définies au paragraphe 3.2. On a représenté seulement les résultats des éprouvettes testées sous la température ordinaire ( $+20^\circ\text{C}$ ), car les courbes analytiques représentées sont établies dans les conditions de la température ordinaire. Ces diagrammes montrent que les points expérimentaux se situent au voisinage des courbes établies analytiquement avec un écart moyen de 4%. Donc, on peut conclure que les résultats obtenus expérimentalement sont en bon accord avec les résultats issus de la littérature.

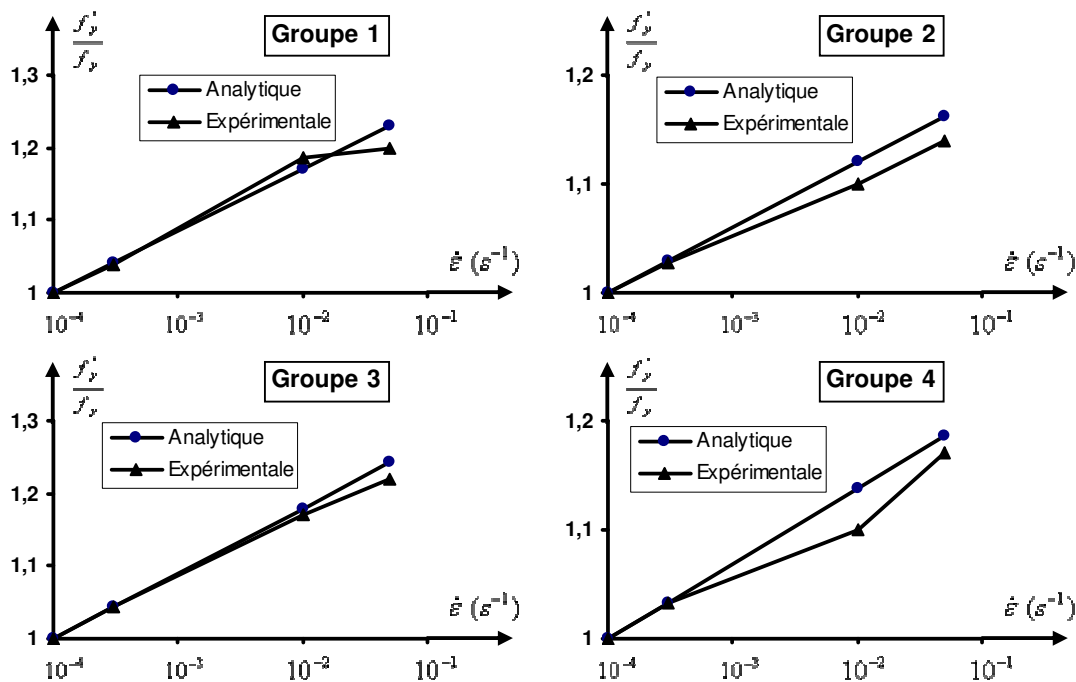


Figure 3.3. Effet de la vitesse de déformation sur la limite élastique

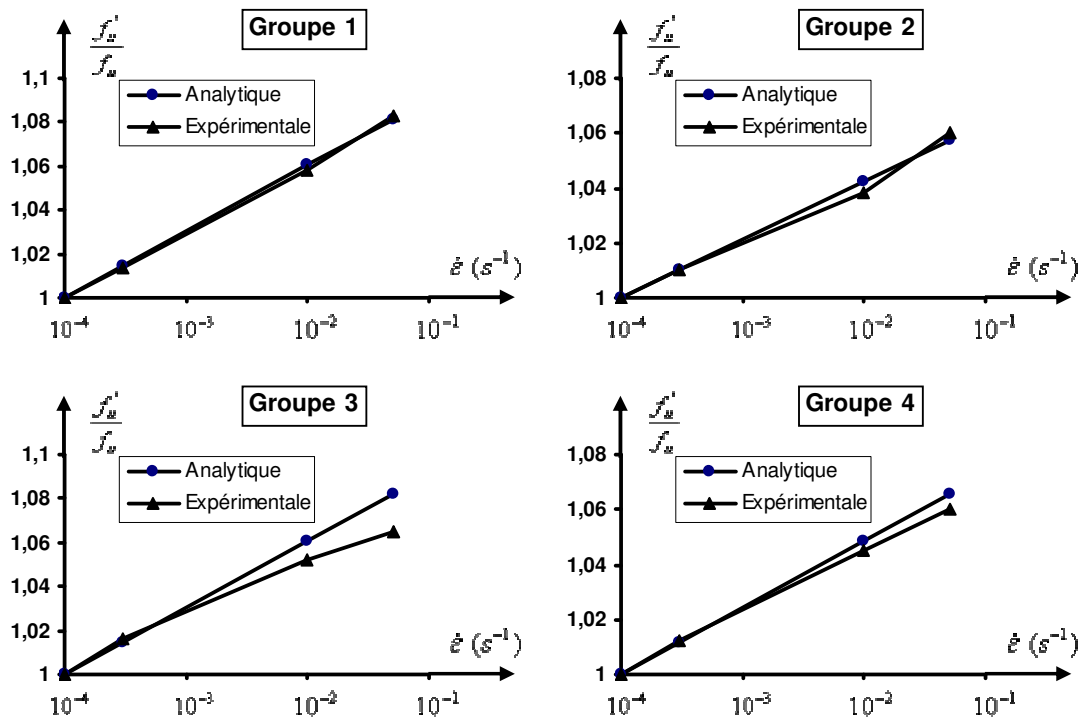


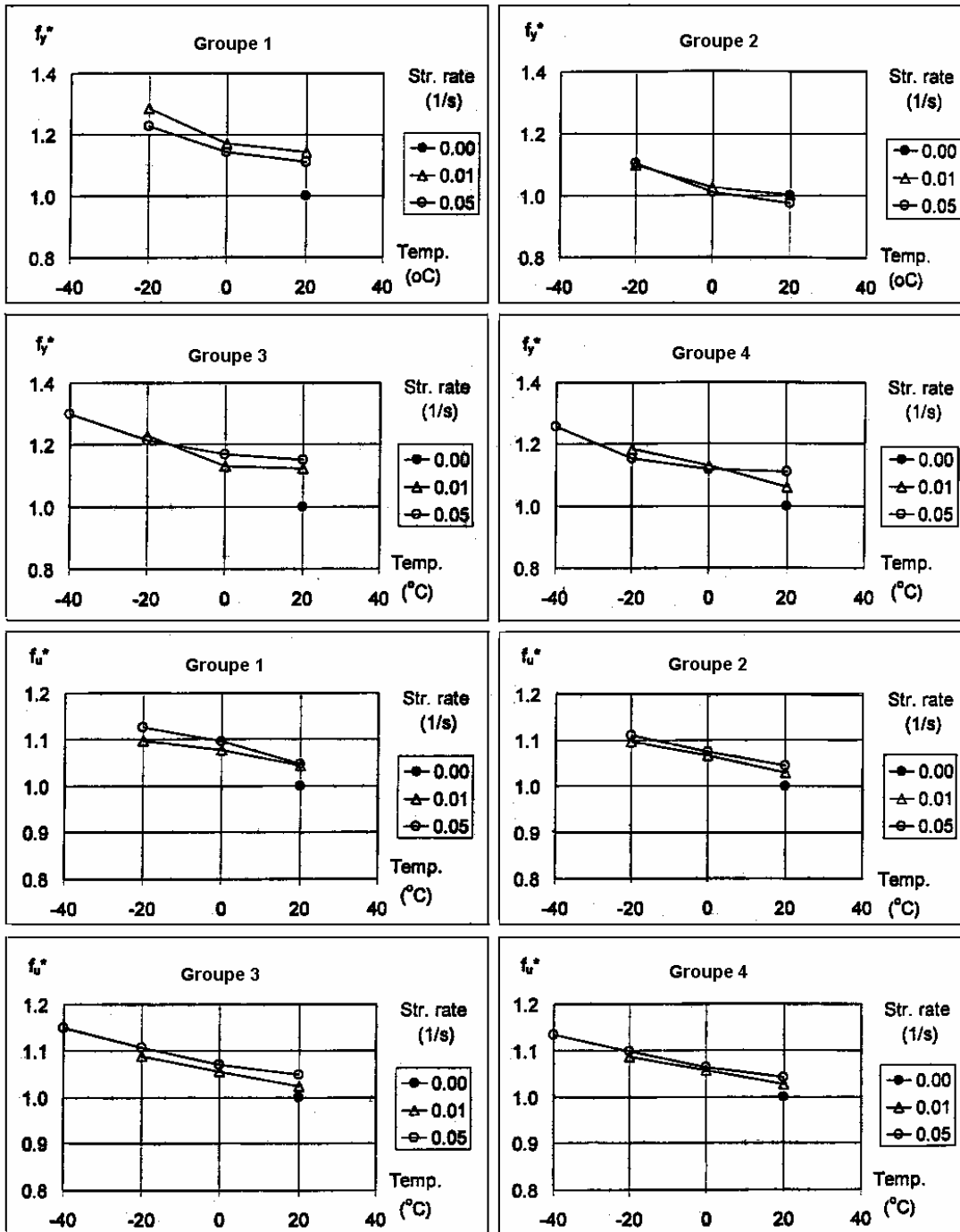
Figure 3.4. Effet de la vitesse de déformation sur la contrainte ultime

### 3.2.1.3. Conclusion

De cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Dans les conditions simples d'un chargement croissant similaire aux essais de traction sur éprouvettes, si la température baisse et/ou la vitesse de déformation augmente, l'effet séparé ou combiné de ces deux paramètres ne doit causer aucune rupture prématurée si les cordons de soudure sont dimensionnés pour être plus résistants que les tôles des plats assemblés.
- Des effets de la croissance de la capacité de résistance et de la décroissance de la ductilité due aux effets combinés de la vitesse de déformation et des variations de la température peuvent être attendus dans un événement sismique réel car les vitesses de déformation sont plus élevées que dans les essais effectués ici et les paramètres de ductilité doivent prendre des valeurs nettement plus défavorables.

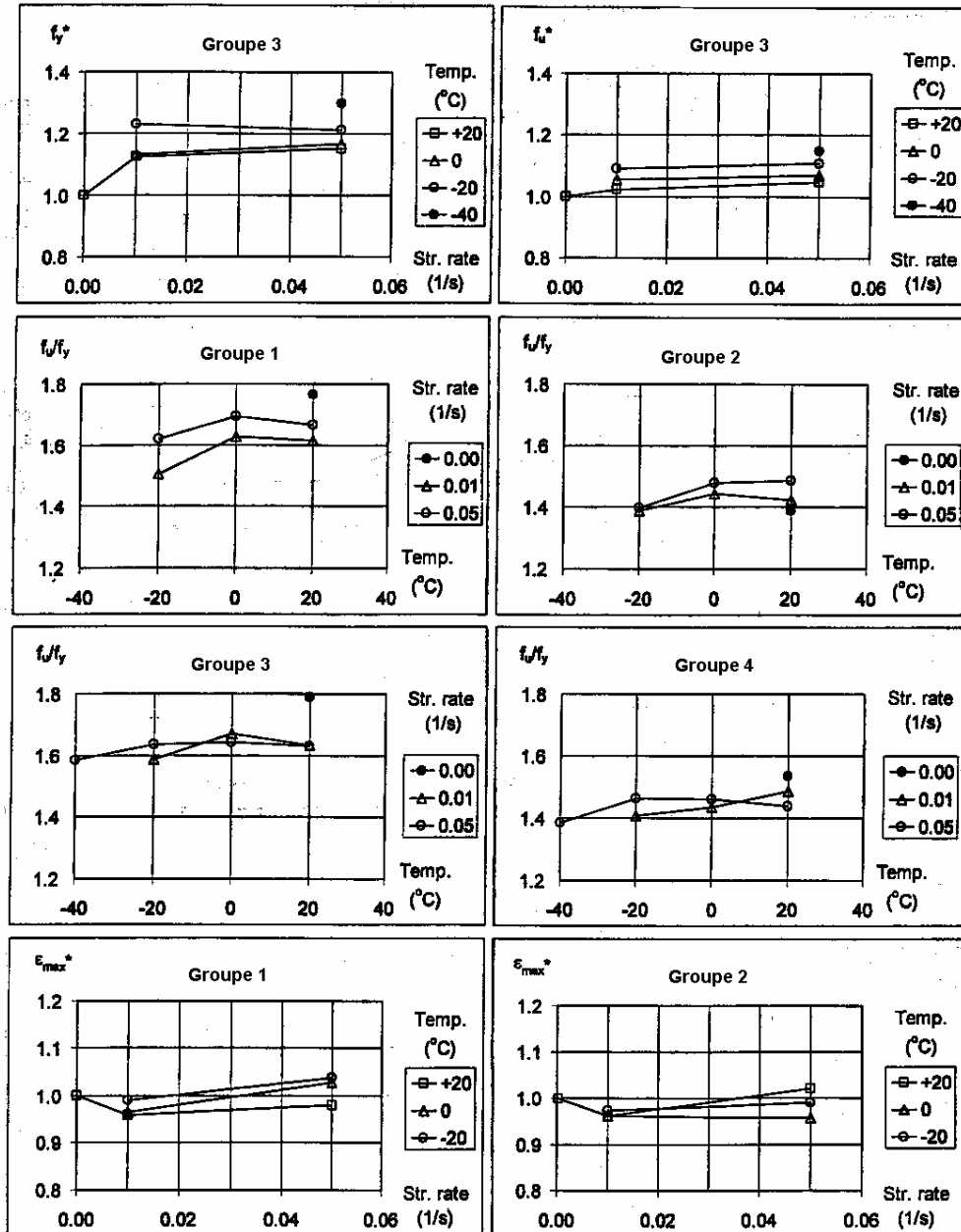




$$f_y^* = f_y' / f_y \quad (T = 20^\circ\text{C}, \text{ str.rate} = 0.0003 \text{ s}^{-1})$$

$$f_u^* = f_u' / f_u \quad (T = 20^\circ\text{C}, \text{ str.rate} = 0.0003 \text{ s}^{-1})$$

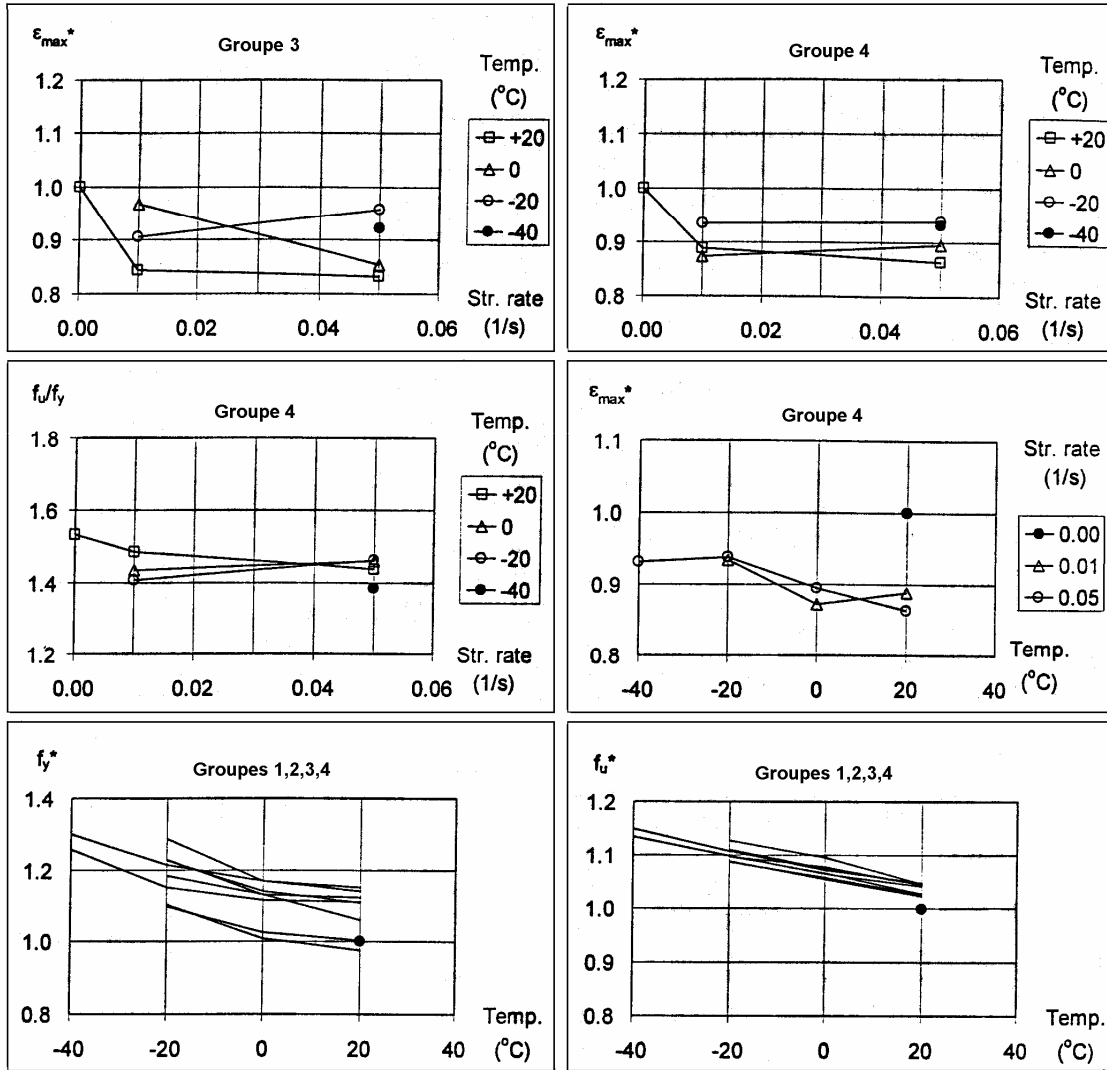
**Figure 3.5.** Diagrammes des résultats des essais sur éprouvettes en fonction de la température et de strain-rate



$$f_y^* = f_y / f_y \quad (T = 20^\circ\text{C}, \text{ str.rate} = 0.0003 \text{ s}^{-1})$$

$$\epsilon_{max}^* = \epsilon_{max} / \epsilon_{max} \quad (T = 20^\circ\text{C}, \text{ str.rate} = 0.0003 \text{ s}^{-1})$$

Figure 3.5. ( suite )



$f_y^* = f_y/f_y$  ( T =20°C, str.rate = 0.0003 s<sup>-1</sup> )  
 $f_u^* = f_u/f_u$  ( T =20°C, str.rate = 0.0003 s<sup>-1</sup> )  
 $\epsilon_{max}^* = \epsilon_{max}/\epsilon_{max}$  ( T =20°C, str.rate = 0.0003 s<sup>-1</sup> )

Figure 3.5. ( suite )

### 3.2.2. ESSAIS SUR LES STRUCTURES EN VRAIE GRANDEUR

#### 3.2.2.1. Spécimens testés

Les spécimens testés sont des poutres connectées aux colonnes en forme de T reproduisant le fonctionnement mécanique des éléments structuraux dans une structure réelle sous l'action sismique. Les essais ont été effectués, à déplacements contrôlés, sur cinq spécimens constitués tous d'une colonne HEB 200 et d'une poutre IPE 300. La poutre et la colonne sont des profilés laminés à chaud.

Trois types d'assemblages poutre-colonne ont été considérés :

- Spécimens SW1 et SW2 , assemblages soudés, symétriques.
- Spécimen SB1, assemblage soudé et boulonné avec plat d'about, symétrique.
- Spécimens UB1et UB2, assemblages soudés et boulonnés avec plat d'about dissymétrique.

### 3.2.2.2. Description des spécimens testés

Les spécimens testés sont faits par un atelier qui respecte les règles de qualité et de mise en œuvre. Tous les assemblages soudés sont des assemblages en bout à pleine pénétration. La poutre et la colonne se rencontrent à angle droit, le chanfrein adopté est celui qui convient mieux il est en forme de demi V, ce chanfrein a permis d'obtenir une bonne pénétration. Deux ouvertures en forme d'un quart de cercle de rayon  $R = 30$  mm sont réalisées dans la partie inférieure et dans la partie supérieure de la poutre afin de rendre possible la reprise au dos de la soudure en V.

Les spécimens SW1 et SW2 sont soudés, le procédé de soudage utilisé pour ces spécimens est MMA c'est le soudage manuel à l'arc, avec électrode enrobée, ce type d'assemblage se réalise très souvent sur chantier. Les spécimens UB1, UB2, et SB1 sont soudés et boulonnés avec plat d'about débordant ; le procédé de soudage utilisé MGA est le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée. L'assemblage boulonné a été dimensionné pour reprendre 120% du moment plastique de la poutre. Les boulons utilisés sont des M20 preserrés de type 10.9. La force de preserrage appliquée par boulon est égale à 50% de sa résistance ultime à la traction soit 125 kN. Ces assemblages sont dimensionnés comme rigide-résistance complète à l'exception du panneau d'âme qui ne confirme pas ces exigences.

Tous les cordons de soudure sont contrôlés à l'aide d'ondes ultrasoniques, et aucun défaut n'est détecté. Les détails des spécimens soudés SW1 et SW2 sont donnés respectivement sur les figures 3.6 et 3.7 et ceux des spécimens boulonnés SB1, UB1 et UB2 sont donnés respectivement aux figures 3.8 et 3.9.

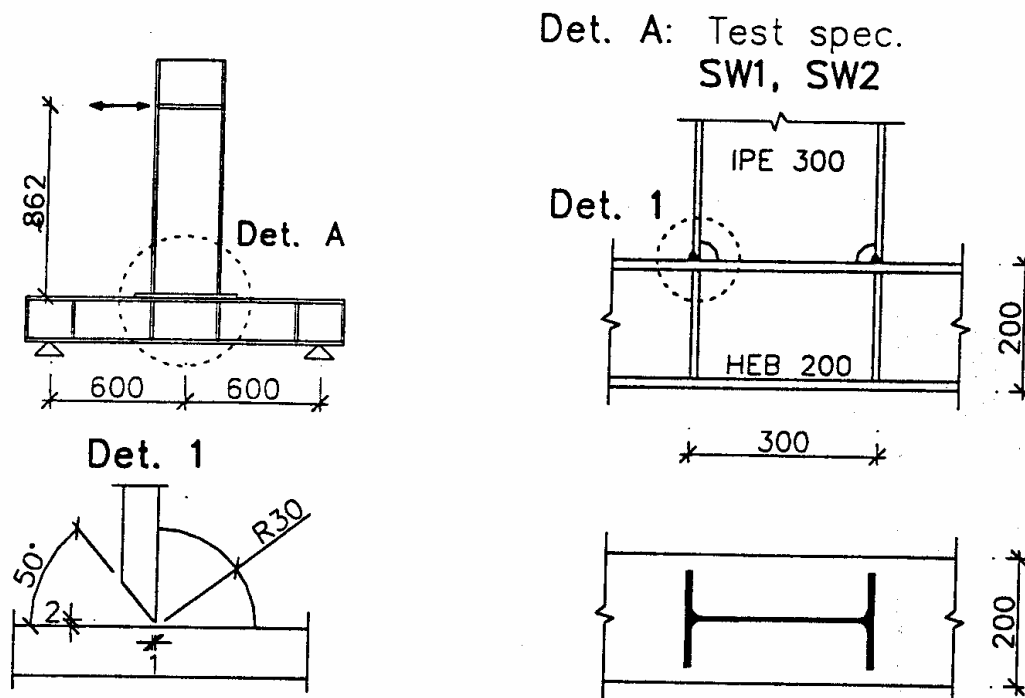


Figure 3.6. Géométrie des spécimens SW1 et SW2

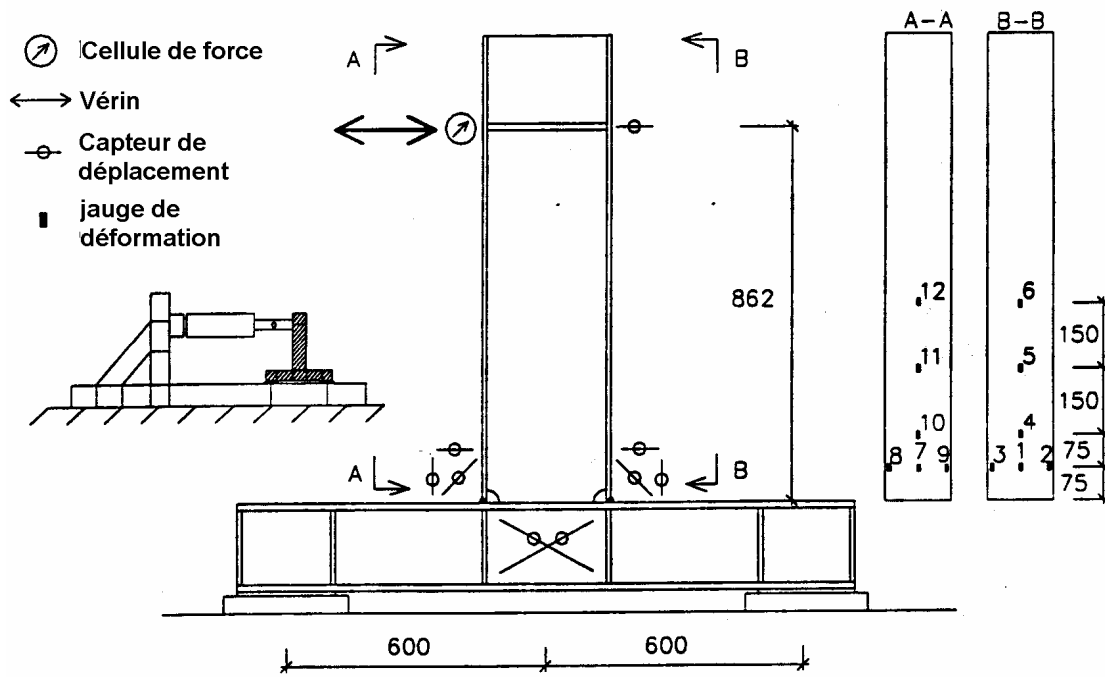
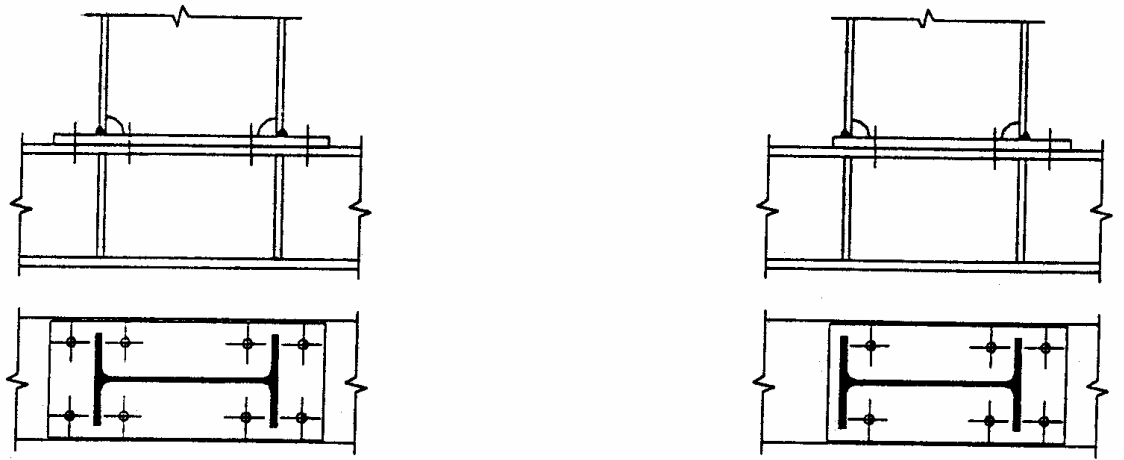


Figure 3.7. Installation d'essai



Assemblage boulonné symétrique  
avec plat d'about débordant

Assemblage boulonné dissymétrique  
avec plat d'about

Figure 3.8. Assemblages boulonnés symétriques et dissymétriques avec plat d'about

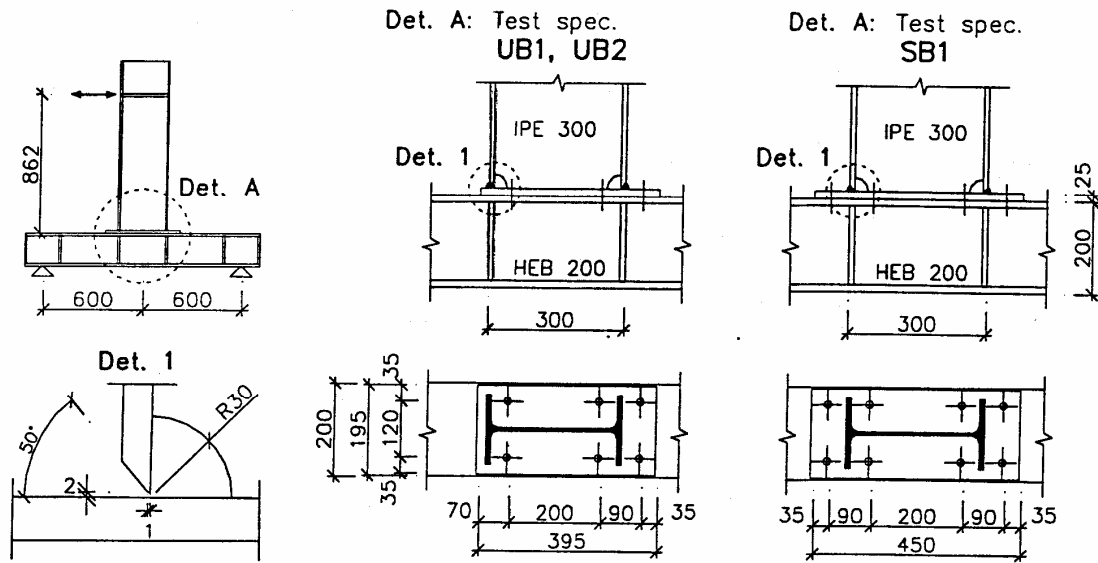


Figure 3.9. Géométrie des spécimens SB1, UB1 et UB2

### 3.2.2.3. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques de l'acier des spécimens testés ont été mesurées sur des éprouvettes prélevées par usinage respectivement dans l'âme et la semelle de la poutre et de la colonne. Deux essais de traction ont été réalisés sur chaque type d'éprouvette, les résultats de ces essais de traction sont donnés en valeurs moyennes au Tableau 3.4 pour les aciers des spécimens soudés SW1 , SW2 et au Tableau 3.5 pour les aciers de spécimens boulonnés UB1, UB2 et SB1. La dureté du matériau constituant la semelle de la poutre est déterminée selon l'essai standard sur barreaux entaillés ( Charpy V-notch ).

Les résultats de ces essais sont donnés au Tableau 3.6 pour les semelles des poutres des spécimens SW1 , SW2 et au Tableau 3.7 pour les semelles des poutres UB1, UB2 et SB1.

Le matériau constituant la poutre était classé selon les règles EN 10025 de l'EC3 [E2] comme acier S235J2. Mais après tests sur éprouvettes entaillées prélevées dans l'âme et la semelle de la poutre, les caractéristiques mécaniques mesurées sont quelque peu supérieures et ce matériau est reclassé comme acier satisfaisant pratiquement aux exigences de l'acier S275JR selon les règles EN 10025 de l'EC3 [E2].

Spécimen	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_u/f_y$	A (%)
Semelle de la poutre - SW1	306	432	1,41	36,8
Ame de la poutre - SW1	366	467	1,28	25,2
Semelle de la colonne - SW1	305	429	1,41	32,4
Ame de la colonne - SW1	313	440	1,41	32,0
Semelle de la poutre - SW1	313	428	1,37	33,4
Ame de la poutre - SW1	317	440	1,39	33,2
Semelle de la colonne - SW1	299	431	1,44	36,8
Ame de la colonne - SW1	350	460	1,31	29,6

Tableau 3.4. Caractéristiques mécaniques de l'acier des spécimens SW1 et SW2

Spécimen	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_u/f_y$	A (%)
Semelle de la poutre - UB1,UB2	314	429	1,37	33,8
Ame de la poutre - UB1,UB2	326	439	1,35	34,1
Semelle de la colonne - UB1,UB2	303	440	1,45	34,0
Ame de la colonne - UB1,UB2	350	463	1,32	28,6
Plat d'about- UB1,UB2	360	604	1,68	25,8
Semelle de la poutre - SB1	269	403	1,50	37,1
Ame de la poutre - SB1	339	434	1,28	36,4
Semelle de la colonne - SB1	276	430	1,56	35,8
Ame de la colonne - SB1	309	438	1,42	33,4
Plat d'about- SB1	297	410	1,38	36,5

**Tableau 3.5.** Caractéristiques mécaniques de l'acier des spécimens UB1, UB2 et SB1

Spécimen	Temp. (°C)	Energie absorbée (J)		
Semelle de la poutre - SW1,SW2	+20	154	161	163
	0	135	130	135
	-20	28	38	19

**Tableau 3.6.** Résultats des essais sur barreaux entaillés–semelle de la poutre SW1 et SW2

Spécimen	Temp. (°C)	Energie absorbée (J)		
Semelle de la poutre - UB1,UB2	+20	154	161	163
	0	135	130	135
	-20	28	38	19
Semelle de la poutre - SB1	+20	161	150	147
	0	125	149	152
	-20	128	125	137

**Tableau 3.7.** Résultats des essais sur barreaux entaillés–semelle de la poutre UB1, UB2 et SB1

Spécimen	Nombre de cycles	$f_y$ (MPa)	$v_y$ (mm)	( $v$ (mm))	( $v_{pl}$ (mm))	$\Delta T$ (°C)	Mode de rupture	position de rupture
SW1	39*	306	9	38	20	16,5	Propagation stable de la fissuration	Poutre-pied de soudure
SW2	35*	313	10	35	15	7,5	Propagation stable de la fissuration	Poutre-pied de soudure

\* Critère de capacité de résistance

**Tableau 3.8.** Résultats des essais dynamiques sur les assemblages poutre-colonne soudés

Spécimen	Nombre de cycles	$f_y$ (MPa)	$v_y$ (mm)	( $v$ (mm))	( $v_{pl}$ (mm))	$\Delta T$ (°C)	Mode de rupture	position de rupture
UB1	93**	315	9	35	17	8,7	Propagation stable de la fissuration	Poutre-pied de soudure
UB2	118*	313	10	32	12	15,5	Propagation stable de la fissuration	Poutre-pied de soudure
SB1	48*	269	9	37,5	19,5	26,1	Propagation stable de la fissuration	Poutre-métal de base

**Tableau 3.9.** Résultats des essais dynamiques sur les assemblages boulonnés avec plat d'about

### 3.2.2.4. Montage d'essai et instrumentation

Les essais ont été effectués sur l'installation pour essais cycliques sur structures. Cette installation d'essai est montrée à la figure 3.7. Cette machine électromécanique consiste en un bâti horizontal qui sert de support pour le spécimen à tester et une partie verticale qui supporte le vérin

La force introduite dans le spécimen est mesurée au moyen d'une cellule de force installée entre le vérin et l'extrémité libre de la poutre comme indiqué à la figure 3.7. Les déplacements horizontaux de l'extrémité supérieure de la poutre sont mesurés au niveau du vérin. La rotation relative de la poutre par rapport à la colonne et les déformations de cisaillement dans la zone du panneau d'âme sont mesurées par des capteurs de déplacement. Les allongements dans la poutre sont mesurés au moyen de jauges de déformations installées sur les deux faces externes des semelles de la poutre à 7.5, 15.0, 30.0, et 45.0 cm à partir de la face externe de la semelle supérieure de la colonne. Les jauges de déformation sont orientées selon l'axe longitudinal de la semelle de la poutre ( voir figure 3.7 )

Spécimen	Fréquence (Hz)	$v_y$ (mm)	Amplitude des déplacements (mm)
SW1	0,3	9	±18
SW1	0,5	10	±20

**Tableau 3.10.** Amplitude des déplacements et fréquences des spécimens SW1 et SW2

Spécimen	Fréquence (Hz)	$v_y$ (mm)	Amplitude des déplacements (mm)
UB1	0,5	9	±18
UB2	0,5	10	±16
SB1	0,5	9	±20

**Tableau 3.11.** Amplitude des déplacements et fréquences des spécimens UB1, UB2 et SB1

### 3.2.3. MESURES EXPERIMENTALES ET PROCEDURE D'ESSAI

Les essais sont effectués à déplacements contrôlés. Les valeurs caractéristiques des paramètres mesurés sont enregistrées à la fin de chaque pas de temps  $\Delta t$  variable. L'histoire des déplacements comporte deux phases. Une phase statique suivie immédiatement d'une phase dynamique :

- La phase statique est établie conformément à la procédure d'essai de la ECCS [E3] .
- La phase dynamique est établie selon une forme sinusoïdale d'amplitude constante  $2v_y$  ( $v_y$  est le déplacement élastique limite de l'extrémité de la poutre au niveau du vérin).

La fréquence d'excitation de l'essai SW1 est de 0.3 Hz, celle des essais SW2, UB1, UB2 et SB1 est égale à 0.5 Hz. Les spécimens testés sont simplement appuyés aux extrémités de la colonne, ils sont sollicités à l'extrémité de la poutre sous déplacements horizontaux produits par un vérin hydraulique, permettant de réaliser un déplacement autour de la position de l'origine de -200 à +200 mm. Ce vérin hydraulique possède une capacité égale à ±250 kN. Chaque spécimen est sollicité au-delà de sa limite élastique pendant la première phase de chargement statique conformément à la procédure d'essai ECCS [E3] . Les paramètres des spécimens soudés SW1 et SW2 sont rassemblés au Tableau 3.10 et ceux des spécimens



bouloonnés UB1 , UB2 et SB1 sont rassemblés au Tableau 3.11. Avant d’entamer l’analyse des résultats des essais il est essentiel de donner les valeurs caractéristiques de chaque essai et un résumé relatif aux différentes définitions des critères de ruines adoptés par les chercheurs à l’heure actuelle.

### 3.3. COMPORTEMENT AU VOILEMENT DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DES STRUCTURES D’ESSAIS

A fin de faciliter l’analyse des résultats des essais, il est essentiel d’examiner les règles de l’EC3 et les propositions de certains auteurs concernant les limitations géométriques des parois des structures d’essais. Au Tableau 3.12, on donne les caractéristiques des éléments qui permettent de vérifier leur comportement au voilement.

Elément	b (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	d (mm)	f <sub>yf</sub> (MPa)	f <sub>uf</sub> (MPa)	f <sub>yw</sub> (MPa)
Poteau	100	15	9,2	134	327	434	334
Poutre	150	10,7	7,1	248,6	303	424	336

**Tableau 3.12.** Caractéristiques géométriques et mécaniques des profilés constituant la poutre et le poteau

- b** : est égale à la moitié de la largeur de la semelle
- t<sub>f</sub>** : est l’épaisseur de la semelle
- d** : hauteur nette de l’âme
- f<sub>yf</sub>** : limite élastique moyenne de la semelle comprimée
- f<sub>uf</sub>** : Contrainte ultime moyenne de la semelle comprimée
- f<sub>yw</sub>** : la limite élastique moyenne de l’âme
- E** : est le module d’élasticité, E = 210.10<sup>3</sup> MPa
- E<sub>n</sub>** : module d’écrouissage, E<sub>n</sub> = 4.10<sup>3</sup> MPa

#### 3.3.1.VOILEMENT ELASTIQUE DE LA SEMELLE COMPRIMEE

L’élançement maximum de la semelle comprimée qui résulte des conditions de prévention du voilement élastique peut être évalué en utilisant les relations suivantes

$$EC3 \quad \left(\frac{b}{t_f}\right)_{max} = 19 \times \left(\frac{235}{f_{yf}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.1}$$

TIMOSHENKO et GERE [T4] proposent une relation moins restrictive que celle qui est proposé par l’EC3

$$\left(\frac{b}{t_f}\right)_{max} = 16 \times \left(\frac{235}{f_{yf}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.2}$$

- Poteau

$$\frac{100}{15} \leq 19 \times \left(\frac{235}{327}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ Soit } 6.666 \leq 16.10 \tag{3.3}$$

- Poutre

$$\frac{75}{10.7} \leq 19 \times \left( \frac{235}{303} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Soit } 7.00 \leq 16.73 \quad (3.4)$$

### 3.3.2. VOILEMENT PLASTIQUE DE LA SEMELLE COMPRIMÉE

Dans le but de prévenir le voilement plastique de la semelle comprimée LAY [L8] propose la relation suivante :

$$\left( \frac{b}{t_f} \right)_{\min} = \frac{1.126}{\left[ \left( 1 + 0.6 \frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right) \left( 1 + 0.192 \frac{E}{E_h} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{E}{f_{yf}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

- Poteau

$$\frac{100}{15} \leq \frac{1.126}{\left[ \left( 1 + 0.6 \frac{434}{327} \right) \left( 1 + 0.192 \frac{210 \cdot 10^3}{4000} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{210 \cdot 10^3}{327} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 6.66 \leq 8.22 \quad (3.6)$$

- Poutre

$$\frac{75}{10.7} \leq \frac{1.126}{\left[ \left( 1 + 0.6 \frac{424}{303} \right) \left( 1 + 0.192 \frac{210 \cdot 10^3}{4000} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{210 \cdot 10^3}{303} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 7.00 \leq 8.88 \quad (3.7)$$

### 3.3.3. VOILEMENT PAR FLEXION ELASTIQUE DE L'ÂME

Pour prévenir le voilement par flexion élastique de l'âme l'EC3 [E1] propose la relation suivante

$$\left( \frac{d}{t_w} \right)_{\max} = 139 \times \left( \frac{235}{f_{yw}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

TIMOSHENKO et GERE [T4] proposent une relation moins restrictive :

$$\left( \frac{d}{t_w} \right)_{\max} = 124 \times \left( \frac{235}{f_{yw}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

- Poteau

$$\frac{134}{9.2} \leq 139 \times \left( \frac{235}{334} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 14,56 \leq 116.59 \quad (3.10)$$

- Poutre

$$\frac{248}{7.1} \leq 139 \times \left( \frac{235}{336} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 34.92 \leq 116.24 \quad (3.11)$$

### 3.3.4. VOILEMENT PAR CISAILLEMENT ELASTIQUE DE L'AME

Pour prévenir le voilement par cisaillement élastique de l'âme TIMOSHENKO et GERE [T4] proposent la relation suivante

$$\left(\frac{d}{t_w}\right) \leq 85 \times \left(\frac{235}{f_{yw}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

Cette relation est plus restrictive que la relation proposée pour le voilement par flexion élastique

- Poteau

$$\frac{134}{9.2} \leq 85 \times \left(\frac{235}{334}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 14,56 \leq 71.29 \quad (3.13)$$

- Poutre

$$\frac{248}{7.1} \leq 85 \times \left(\frac{235}{336}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ soit } 34.92 \leq 71.08 \quad (3.14)$$

### 3.3.5. VOILEMENT PLASTIQUE DE L'AME

Pour prévenir le voilement plastique de l'âme l'EC3 [1] propose la relation suivante

$$\left(\frac{d}{t_w}\right) \leq k \left(\frac{E}{f_{yf}}\right) \left(\frac{A_w}{A_f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Cette relation est plus restrictive que la relation proposée pour le voilement par flexion élastique

$k$  dépend de la classe de section,  $k = 0.3$  pour classe 1

- Poteau :  $A_w = 1232.3 \text{ mm}^2$  ,  $A_f = 3000 \text{ mm}^2$

$$\frac{134}{9.2} \leq 0.3 \times \frac{210.10^3}{327} \cdot \left(\frac{1232.3}{3000}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

soit  $14.56 \leq 123.47$

- Poutre :  $A_w = 1765.06 \text{ mm}^2$  ,  $A_f = 1605 \text{ mm}^2$

$$\frac{248.6}{7.1} \leq 0.3 \times \frac{210.10^3}{303} \cdot \left(\frac{1765.06}{1605.00}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

soit  $35.01 \leq 110.04$

### 3.3.6. CONCLUSION

On peut conclure des évaluations des élancements de parois présentées en 3.3.1 à 3.3.5 que les sections des éléments constitutifs des structures d'essais sont compactes ; elles sont donc peu sujettes à voilement

### 3.4. CRITERES DE RUINE

L'évolution du nombre de cycles à la ruine d'une structure ou d'un élément structural requiert une définition basée sur un état limite ultime. Sur la base d'observations expérimentales BALLIO, [B7] et CALADO, [C18] définissent le nombre de cycles à la rupture comme un état limite ultime pour lequel la structure est considérée comme inutilisable, donc la ruine d'une structure pourrait être associée à la réduction de la résistance ou de la capacité de dissipation d'énergie d'un ou plusieurs éléments de cette structure.

La plupart des chercheurs admettent que la rupture d'une structure sous chargement cyclique est atteinte lorsque la capacité globale de dissipation d'énergie est suffisamment réduite. En général la dissipation de cette énergie se fait par le biais des déformations cumulées et il est admis que les éléments des structures en acier possèdent une réserve importante de ce type de dissipation. Mais, le plus souvent les phénomènes d'instabilité globaux, le voilement local, la propagation de la fissuration et la fatigue oligocyclique peuvent détériorer de façon significative la résistance et la capacité de dissipation d'énergie de la structure. Pour être appliqué, un critère de ruine doit permettre une évaluation des conditions de ruine aussi proche que possible de la réalité et du côté de la sécurité. Le critère de ruine devrait donc être basé sur l'atteinte d'un niveau donné de détérioration des propriétés de résistance et de ductilité de la structure ou de l'élément structural. Divers chercheurs ont proposé des critères de ruine dont l'application dépend de la nature des sollicitations.

CALADO [ C18 ] et BALLIO [ B8 ] proposent un critère de ruine valable pour des chargements cycliques d'amplitude constante, ce critère est basé sur la réduction de l'énergie dissipée, les auteurs admettent que la rupture est atteinte lorsque l'énergie dissipée dans un cycle par la structure ou par l'élément structural est égale à 50% de celle qui serait dissipée dans le même cycle si l'élément avait un comportement élastoplastique parfait sous la même histoire de chargement cyclique.

BALLIO, CASTIGLIONI [B9] CASTIGLIONI, CALADO [C19], CASTIGLIONI [C20] CALADO et FERREIRA [C21] proposent un critère de ruine valable pour les chargements cycliques d'amplitudes variables, ce critère est considéré comme l'extension du précédent au cas d'un chargement quelconque, qu'on peut formuler de la manière suivante :

$$e_1 = \frac{E_1}{E_{1p}}, \dots, e_i = \frac{E_i}{E_{ip}} \quad (3.18)$$

$E_i$  = l'énergie réelle dissipée dans le  $i^{\text{ème}}$  cycle

$E_{ip}$  = l'énergie fictive dissipée dans le  $i^{\text{ème}}$  cycle si l'élément avait un comportement élastoplastique parfait sous la même histoire de chargement cyclique

On suppose que la rupture a lieu lorsque  $\frac{e_i}{e_1} \leq 0.5$

La mise en œuvre de ce critère nécessite une quantité de travail très importante. Il existe d'autres critères de ruine dont l'application est très simple

- Le premier critère correspond à la perte de 50% de la capacité de résistance par rapport à la capacité de résistance de la structure au premier ou au deuxième cycle de chargement dynamique
- Le deuxième critère correspond à la réduction de 50% de la capacité de dissipation d'énergie par rapport à la capacité de dissipation d'énergie au premier ou au deuxième cycle de chargement dynamique

En général, le premier cycle dynamique manifeste un écoulement plastique, une vitesse de déformation et une dissipation d'énergie très importante; et le comportement se stabilise à

partir du deuxième cycle de chargement dynamique ; pour cela le critère que nous avons adopté est celui qui consiste à comparer la résistance et l'énergie dissipée dans le  $i^{\text{ème}}$  cycle de chargement dynamique par rapport à la résistance et l'énergie dissipée dans le  $2^{\text{ème}}$  cycle de chargement dynamique.

### 3.5. RESULTATS DES ESSAIS

Dans le but de comparer les résultats expérimentaux, les quantités suivantes ont été introduites et comparées comme paramètres représentatifs du comportement mécanique du spécimen :

$M_y$  : moment élastique limite conventionnel mesuré sur le diagramme expérimental comme indiqué dans la procédure d'essai de la CECM [E8],  $M_y$  correspond à l'intersection entre la pente de la partie élastique et la ligne tangente à la branche plastique (figure 3.10)

$\theta_y$  : rotation totale correspondante à  $M_y$  (rotation élastique limite)

$M_{\max}$  : est le moment maximum atteint au cours de la durée de chargement

$\theta_{\max}$  : est la rotation correspondante à  $M_{\max}$

On présente au Tableau 3.13 quelques valeurs caractéristiques des essais effectués :

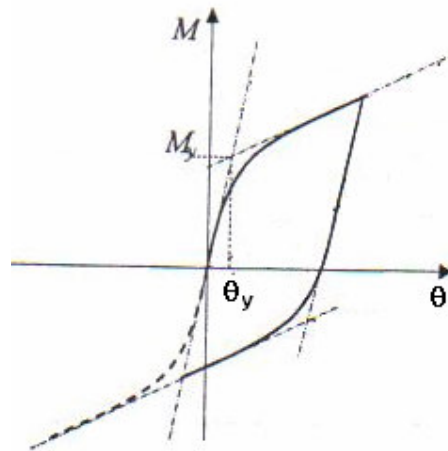


Figure 3.10. Détermination de  $M_y$  et  $\theta_y$  selon la procédure CECM [E8]

Spécimen	$M_y$ (kNm)	$M_{\max}$ (kNm)	$\theta_y$ (rad)	$\theta_{\max}$ (rad)	$\frac{\theta_{\max}}{\theta_y}$
SW1	192	242	0,01	0,031	3,10
SW2	196	265	0,01	0,027	2,72
SB1	169	227	0,01	0,029	2,94
UB1	197	236	0,01	0,025	2,54
UB2	197	241	0,01	0,028	2,84

Tableau 3. 13. Valeurs caractéristiques des résultats des essais

Les résultats les plus importants obtenus durant chaque essai sont présentés ci-après sous forme de graphes. Il s'agit de diagrammes :

- Moment de flexion mesuré par rapport à l'axe de la colonne en fonction de la rotation totale  $\theta$  de l'assemblage.
- Moment de flexion mesuré par rapport à l'axe de la colonne en fonction de la rotation de cisaillement  $\theta_s$  du panneau d'âme de la colonne.
- Energie totale dissipée cumulée en fonction du nombre de cycles.
- Energie totale  $E_c$  dissipée dans chaque cycle de chargement dynamique normalisée par rapport à l'énergie totale  $E_2$  dissipée dans le deuxième cycle de chargement dynamique en fonction du nombre de cycles.
- Amplitude des moments ( positifs et négatifs ) normalisées par rapport aux amplitudes des moments du deuxième cycle de chargement dynamique en fonction du nombre de cycles.
- Les vitesses de déformation de cisaillement du panneau d'âme dans les quinze premiers cycles dynamiques en fonction du temps.
- La vitesse de déformation ( strain-rate ) de la jauge numéro 1 qui se situe à 7.5 cm de la semelle du poteau pendant les quinze premiers cycles dynamiques en fonction du temps

Pour interpréter le comportement cyclique des structures d'essai sous charges dynamiques nous avons adoptés deux critères de ruines :

- Le premier critère correspond à la perte de 50% de la capacité de résistance par rapport à la capacité de résistance de la structure au deuxième cycle de chargement dynamique.
- Le deuxième critère correspond à la réduction de 50% de la capacité d'absorption d'énergie chaque cycle par rapport au deuxième cycle de chargement dynamique.

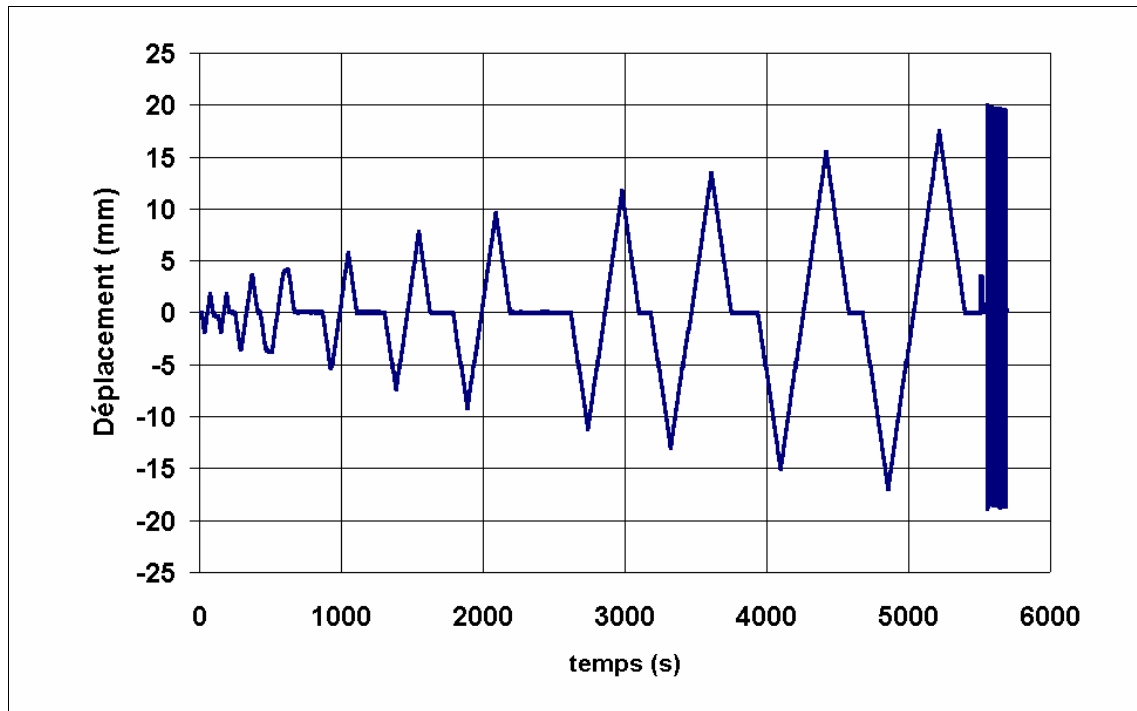
### 3.5.1. STRUCTURE D'ESSAI SW1

Cet essai est arrêté au 38<sup>ème</sup> cycle quand la perte de résistance était évidente. L'essai SW1 était le premier essai dynamique à être réalisé sur l'équipement décrit au paragraphe 3.2.2.4 . Cet essai est arrêté pour empêcher un éventuel dommage que pourrait causer la ruine brusque du spécimen SW1 à l'équipement de l'essai.

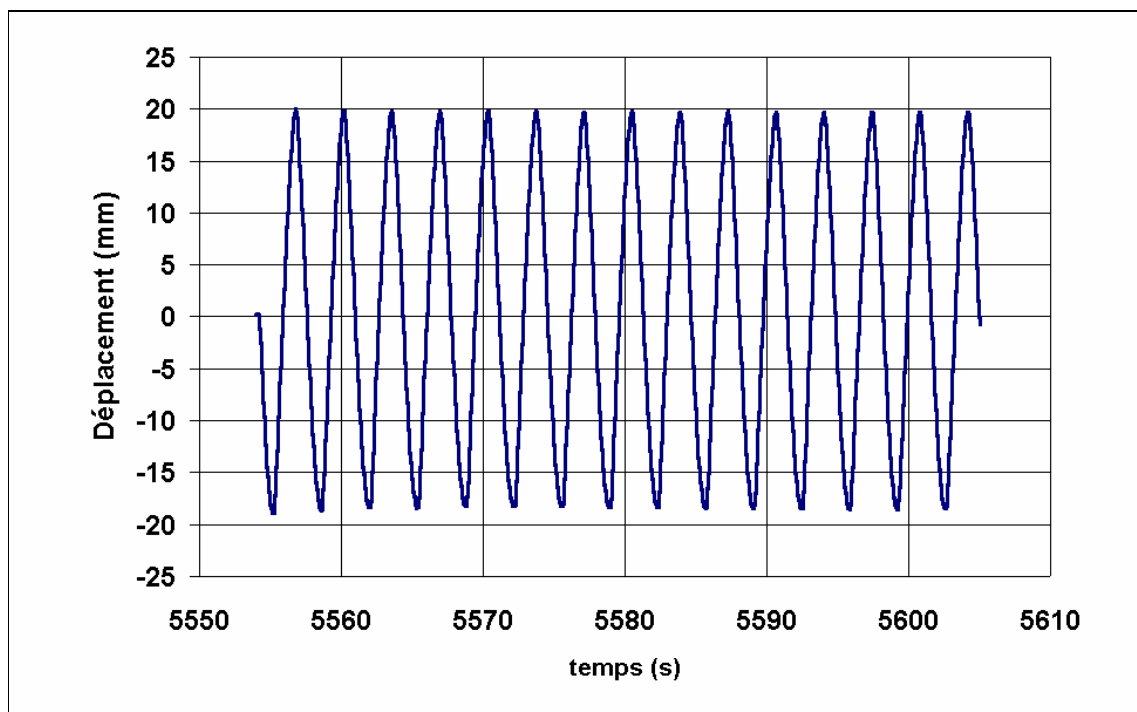
En examinant le diagramme de la figure 3.15, amplitudes du moment en fonction du nombre de cycles, on peut en déduire selon le premier critère de ruine que la rupture est atteinte au 39<sup>ème</sup> cycle , soit  $M_{39} = 50\% M_2$  .

La détérioration du spécimen SW1 est causée par la rupture d'une des semelles de la poutre , cette rupture était précédée par une propagation stable de la fissuration . La fissuration est amorcée à partir de la partie centrale de la surface de la poutre au voisinage du pied du cordon de soudure et par la suite elle s'est propagée en profondeur et en longueur pour atteindre les deux bords de la semelle de la poutre. Les premiers signes du voilement local de la semelle de la poutre ont été observés. Un amorçage de fissuration est apparu avec retard au niveau de la deuxième semelle de la poutre. Cet amorçage était identique au premier. Au stade final les deux semelles de la poutre ont cédé après avoir perdu leur capacité de résistance. Cette perte de résistance a provoqué l'apparition d'autres fissures qui ont pris naissance aux coins du trou d'accès de soudure. Le comportement hystérétique était stable avec une large capacité d'absorption d'énergie (voir figures 3.13, 3.14, 3.15 et 3.16).

La vitesse de déformation en fonction du temps mesurée à la surface externe de la semelle de la poutre à 7.5 cm de la semelle supérieure de la colonne est présentée à la figure 3.18 pour les quinze premiers cycles seulement, cette vitesse de déformation possède une amplitude moyenne qui se situe au voisinage de  $0.01 \text{ s}^{-1}$  . La vitesse de déformation dûe au cisaillement du panneau d'âme est présentée à la figure 3.19 ; cette vitesse de déformation possède une amplitude moyenne qui se situe au voisinage de  $0.030 \text{ rad.s}^{-1}$



**Figure 3.11.** Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SW1  
- phases statique et dynamique -



**Figure 3.12.** Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SW1  
- phase dynamique -

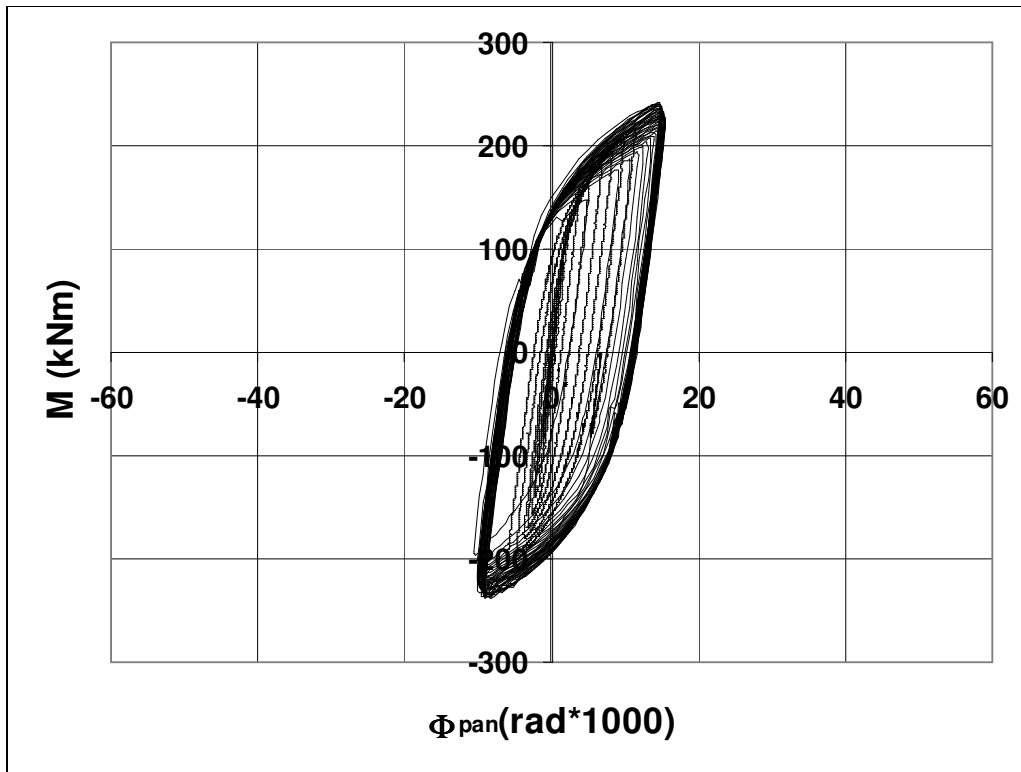


Figure 3.13. Diagramme moment-rotation du panneau d'âme, essai SW1

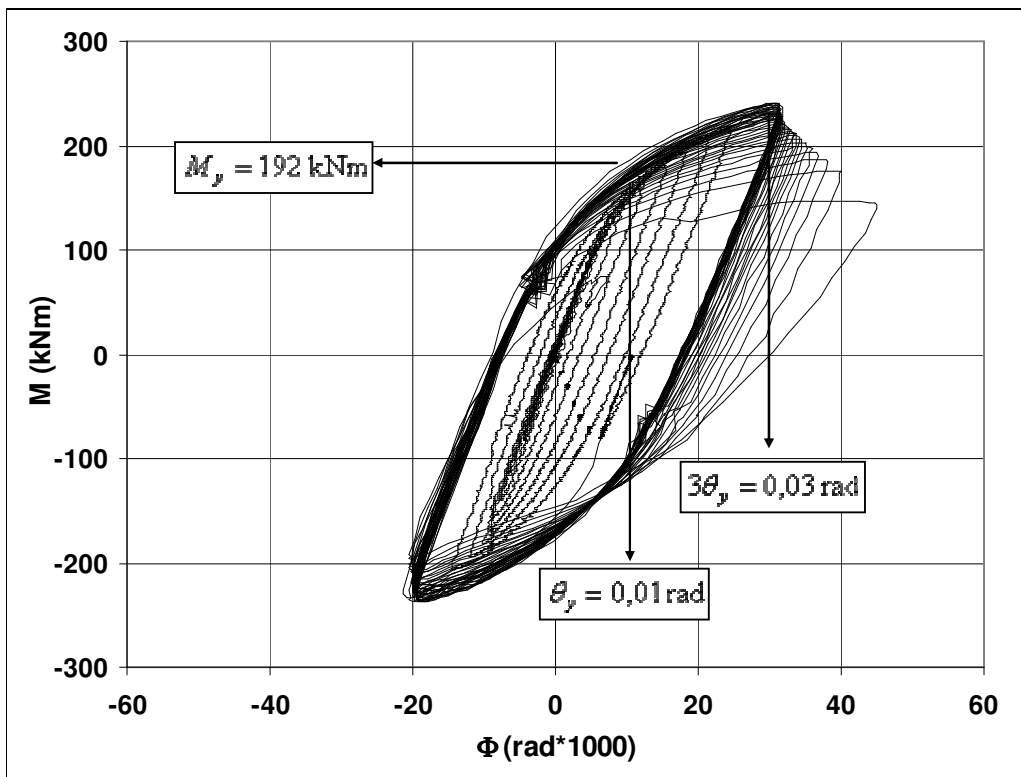


Figure 3.14. Diagramme moment-rotation totale, essai SW1



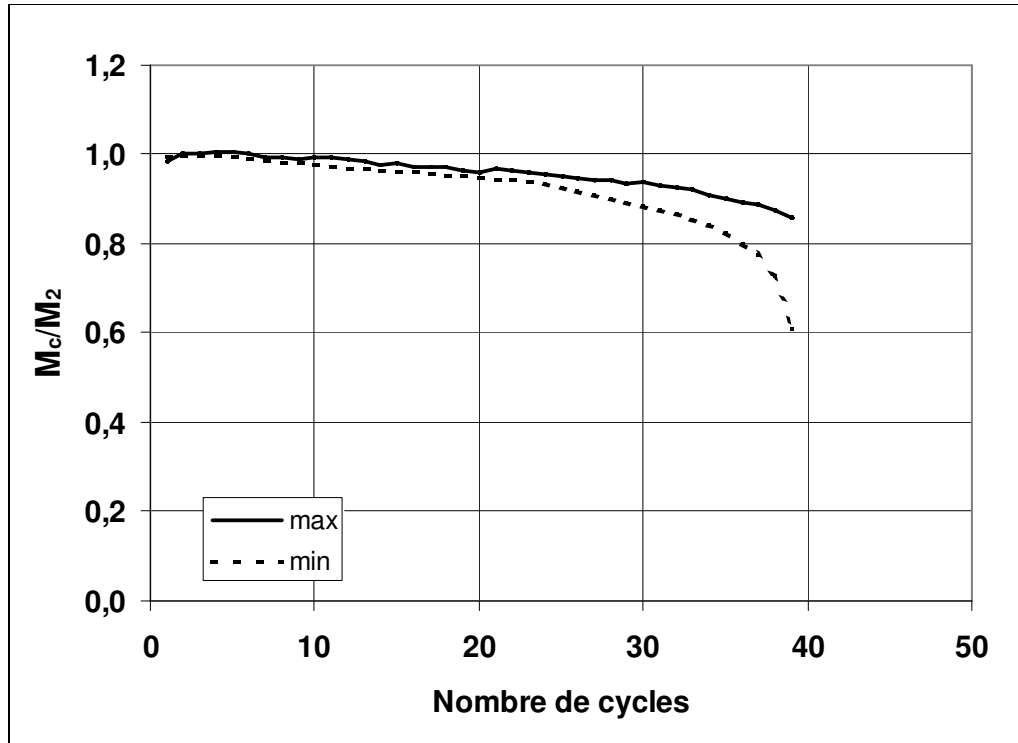


Figure 3.15. Amplitudes normalisées des moments, essai SW1

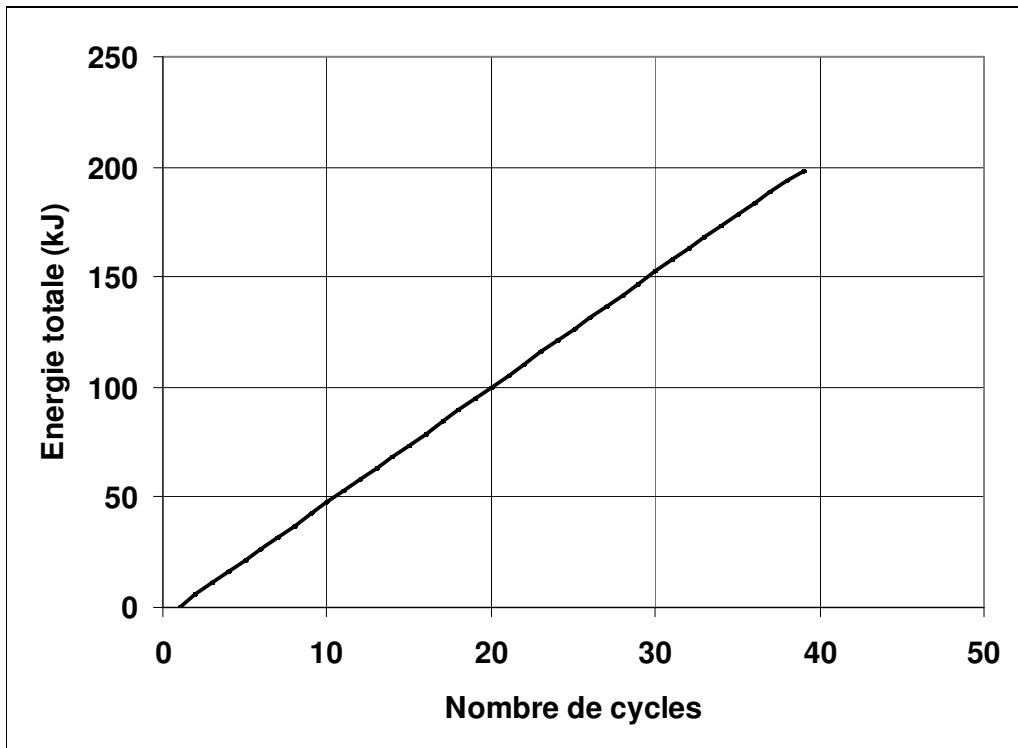


Figure 3.16. Energie totale dissipée cumulative à la fin de chaque cycle, essai SW1

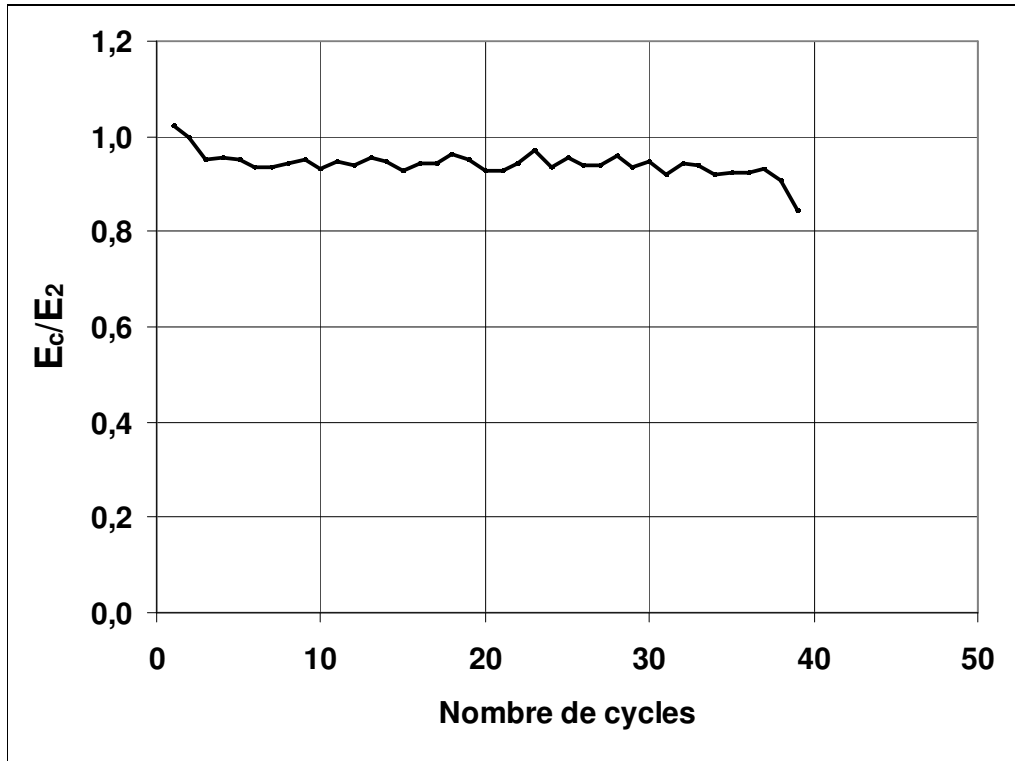


Figure 3.17. Energie normalisée dissipée dans chaque cycle, essai SW1

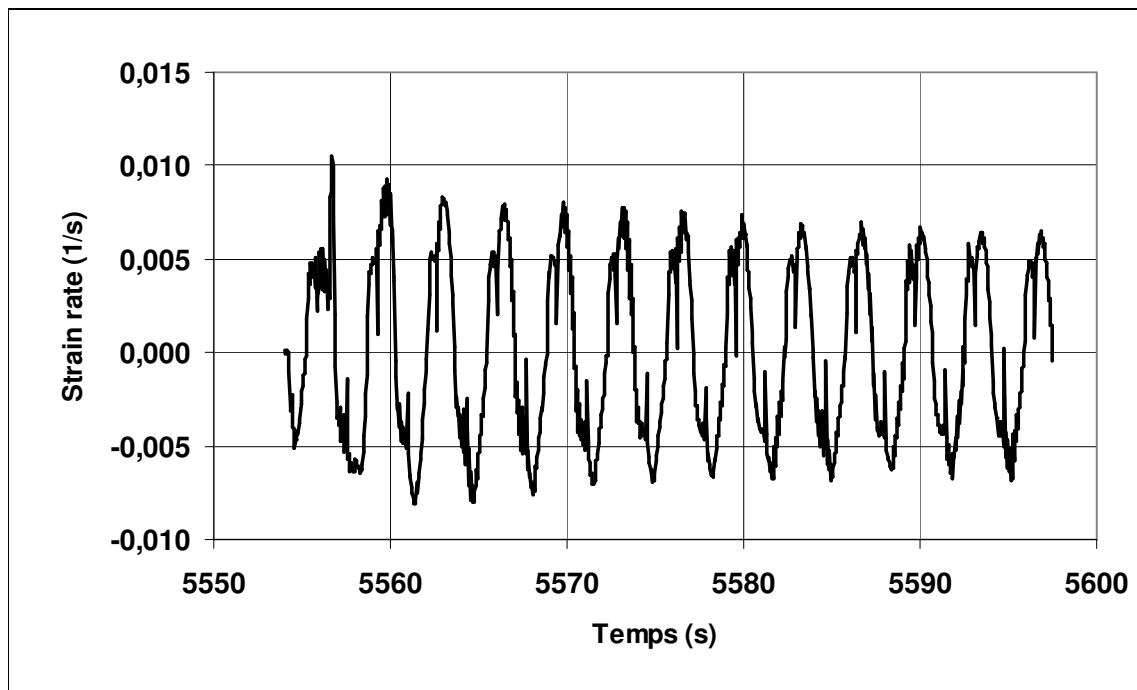


Figure 3.18. Vitesse de déformation dans la poutre, essai SW1: jauge N° 1

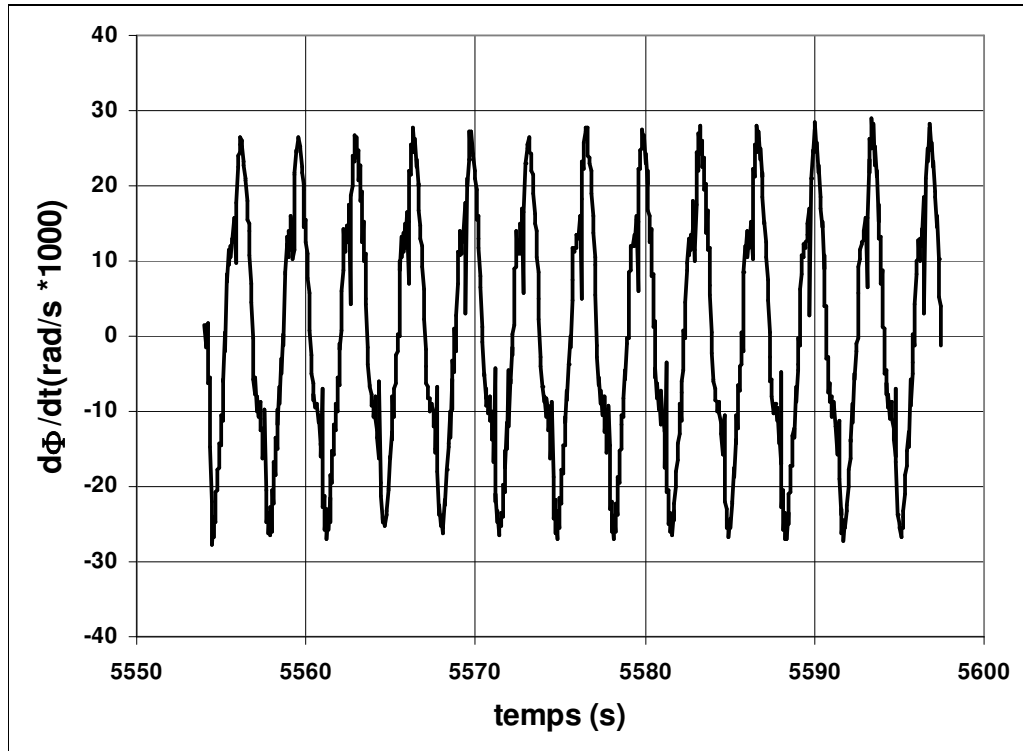
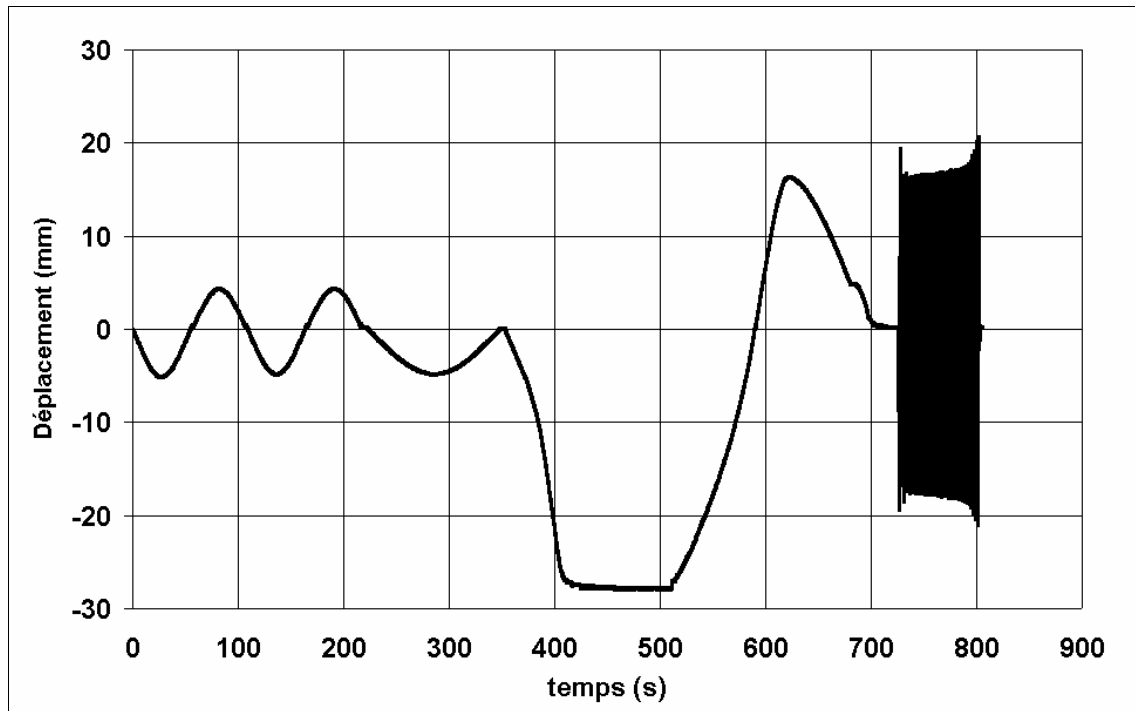


Figure 3.19. Vitesse de rotation dans le panneau d'âme, essai SW1

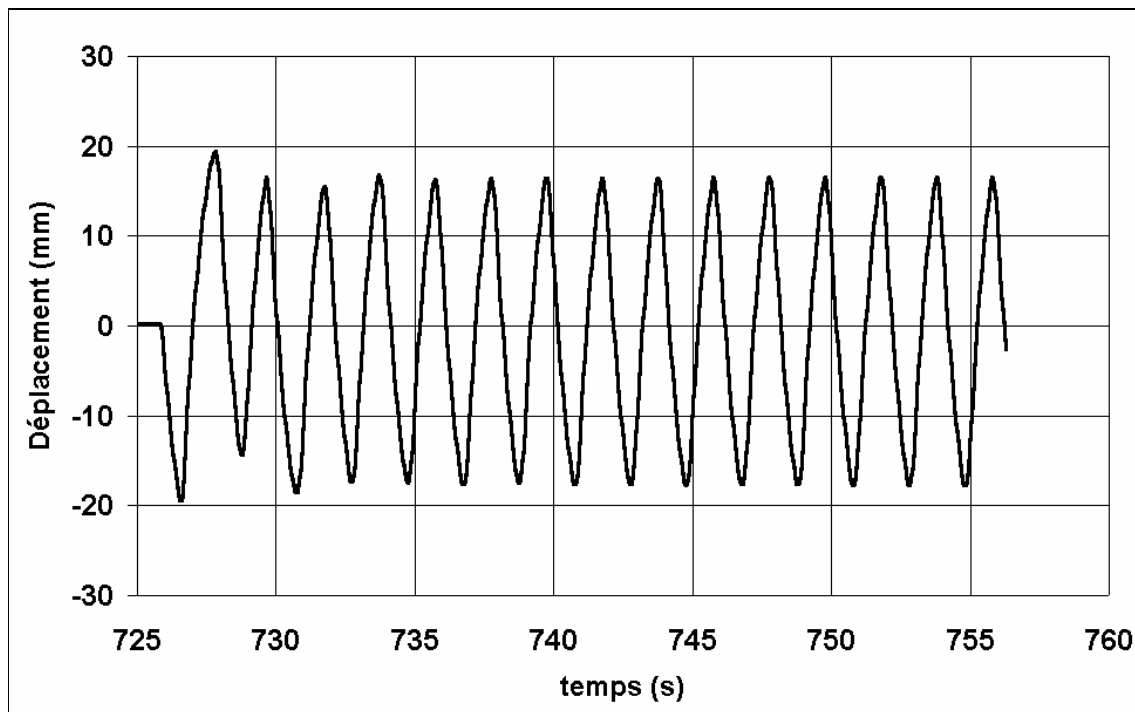
### 3.5.2. STRUCTURE D'ESSAI SW2

Les résultats de cet essai sont très semblables aux résultats de l'essai SW1. Le spécimen SW2 a résisté à 35 cycles de chargement dynamique avant de perdre 50 % de sa capacité de résistance (voir figure 3.24). Une stable propagation de la fissuration est observée avant la rupture finale d'une des semelles de la poutre. Le comportement hystérétique est similaire à celui de l'essai SW1. La vitesse de déformation mesurée au même endroit que l'essai SW1 a une amplitude moyenne voisine de  $0.01 \text{ s}^{-1}$ . Une vitesse de déformation plus élevée ayant une amplitude moyenne de l'ordre de  $0.05 \text{ s}^{-1}$  à  $0.10 \text{ s}^{-1}$  proche des conditions sismiques est attendue dans les zones des semelles de la poutre au voisinage de la semelle du poteau.

La vitesse de déformation due au cisaillement du panneau d'âme est représentée à la figure 3.28. Cette vitesse de déformation possède une amplitude moyenne qui se situe au voisinage de  $0.035 \text{ rad.s}^{-1}$  et qui est supérieure à celle de l'essai SW1. Les résultats des essais SW1 et SW2 sont rassemblés au Tableau 3.8. Durant l'essai, la température est mesurée dans les cordons de soudure qui font la jonction des deux semelles de la poutre et la semelle de la colonne. L'accroissement de la température  $\Delta T$  mesuré qui est dû aux déformations plastiques est de  $16.5^\circ\text{C}$  pour l'essai SW1 et de  $7.5^\circ\text{C}$  pour l'essai SW2. Cet accroissement de température est une information indicative, car les déformations plastiques les plus importantes ont eu lieu dans les semelles de la poutre en dehors des cordons de soudure, d'une part, et, d'autre part, la chaleur se propage rapidement par conduction vers les parties non plastifiées (extrémité de la poutre-colonne).



**Figure 3.20.** Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SW2  
- phases statique et dynamique -



**Figure 3.21.** Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SW2  
- phase dynamique -

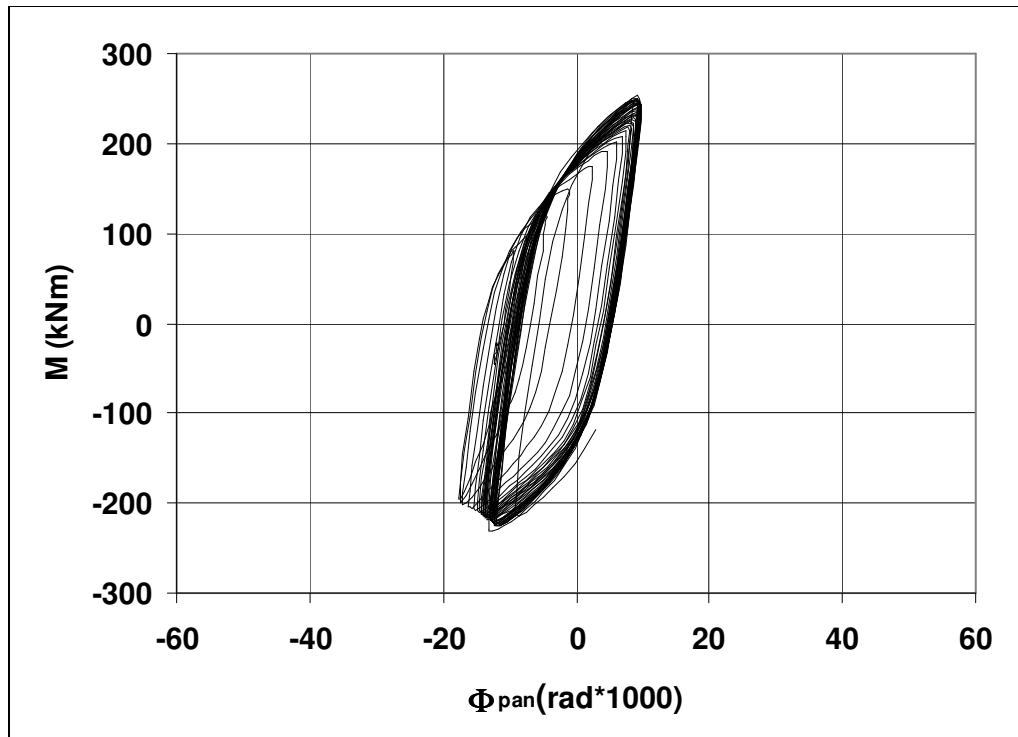


Figure 3.22. Diagramme moment-rotation du panneau d'âme, essai SW2

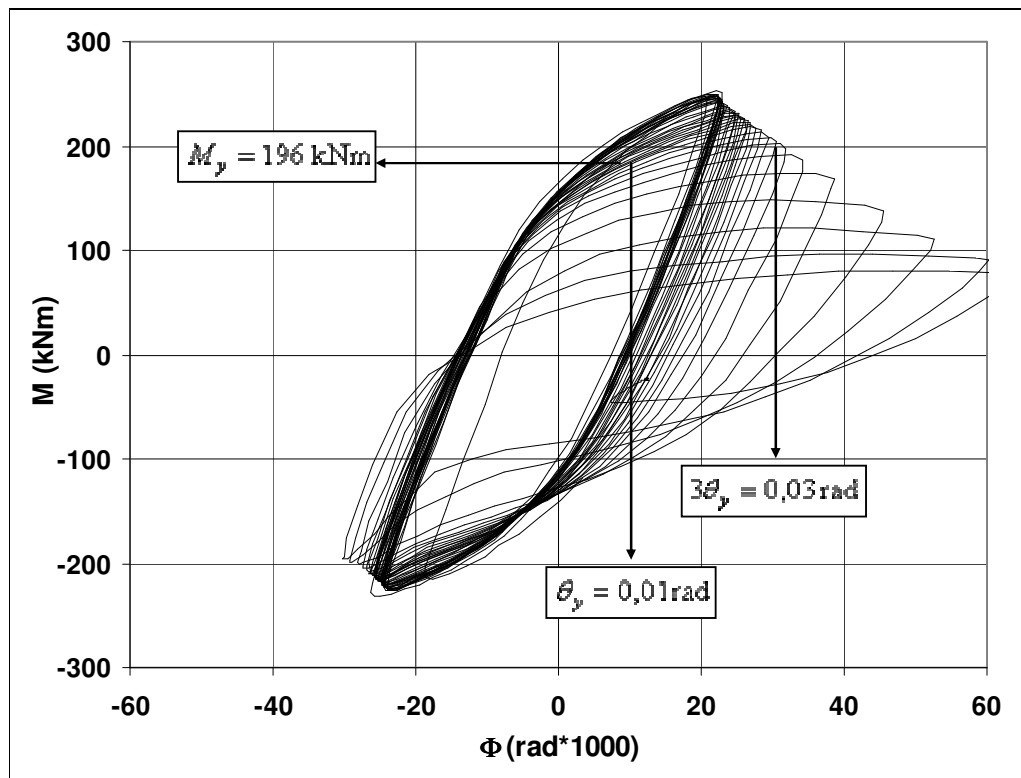


Figure 3.23. Diagramme moment-rotation totale, essai SW2

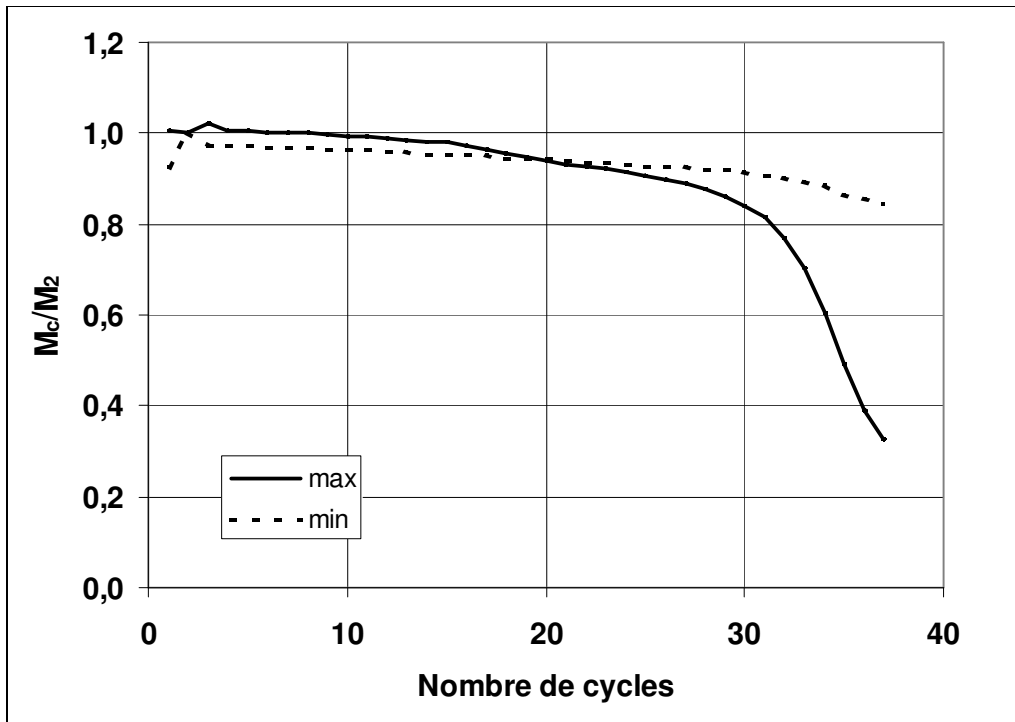


Figure 3.24. Amplitudes normalisées des moments, essai SW2

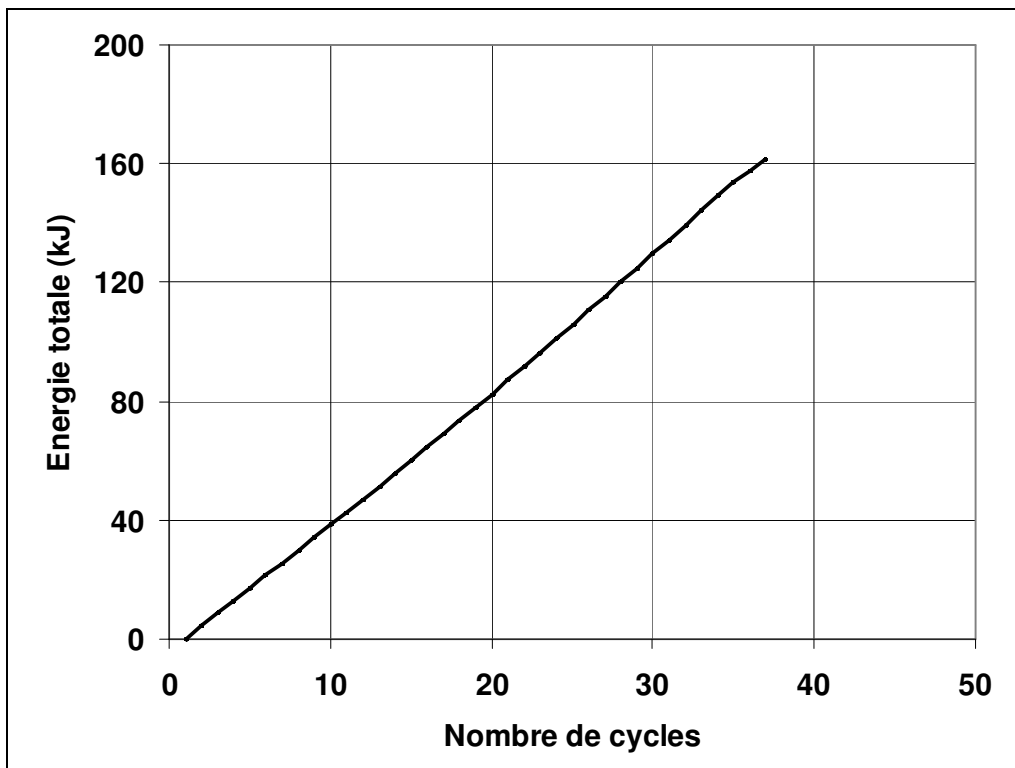


Figure 3.25. Energie totale dissipée cumulative à la fin de chaque cycle, essai SW2

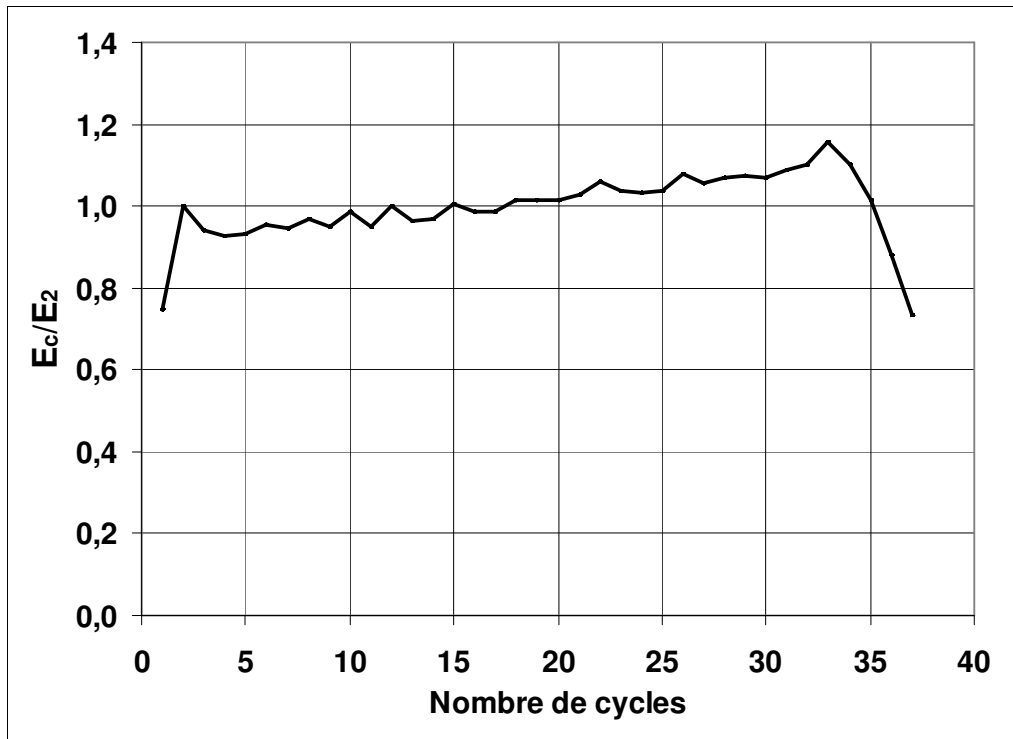


Figure 3.26. Energie normalisée dissipée dans chaque cycle, essai SW2

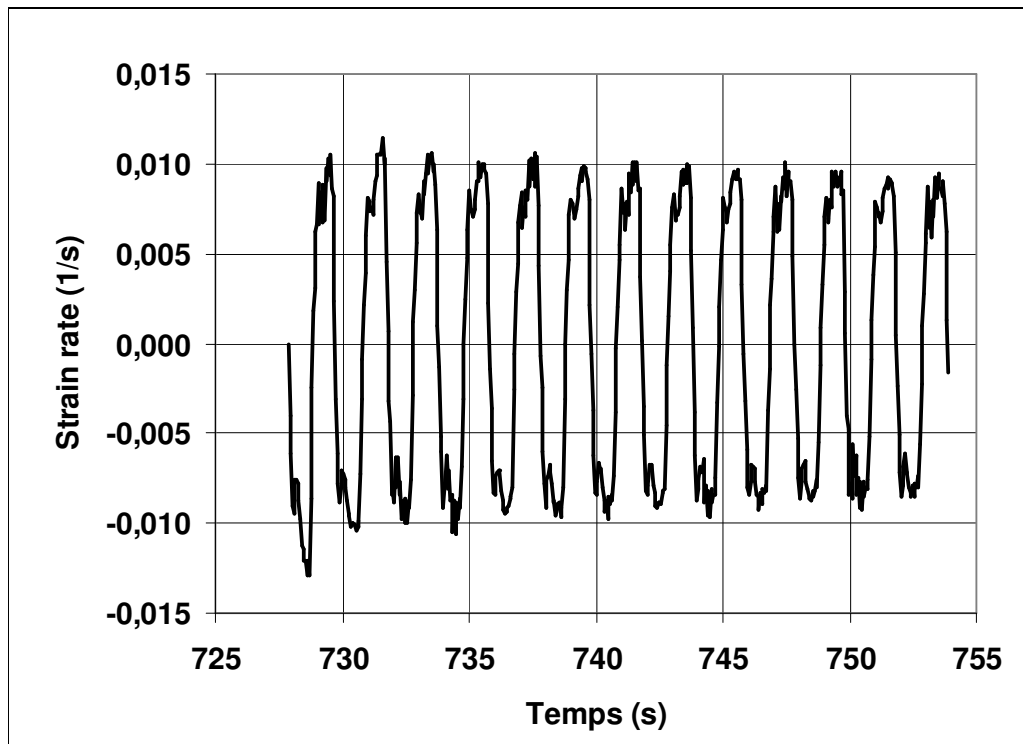


Figure 3.27. Vitesse de déformation dans la poutre, essai SW2: jauge N° 1

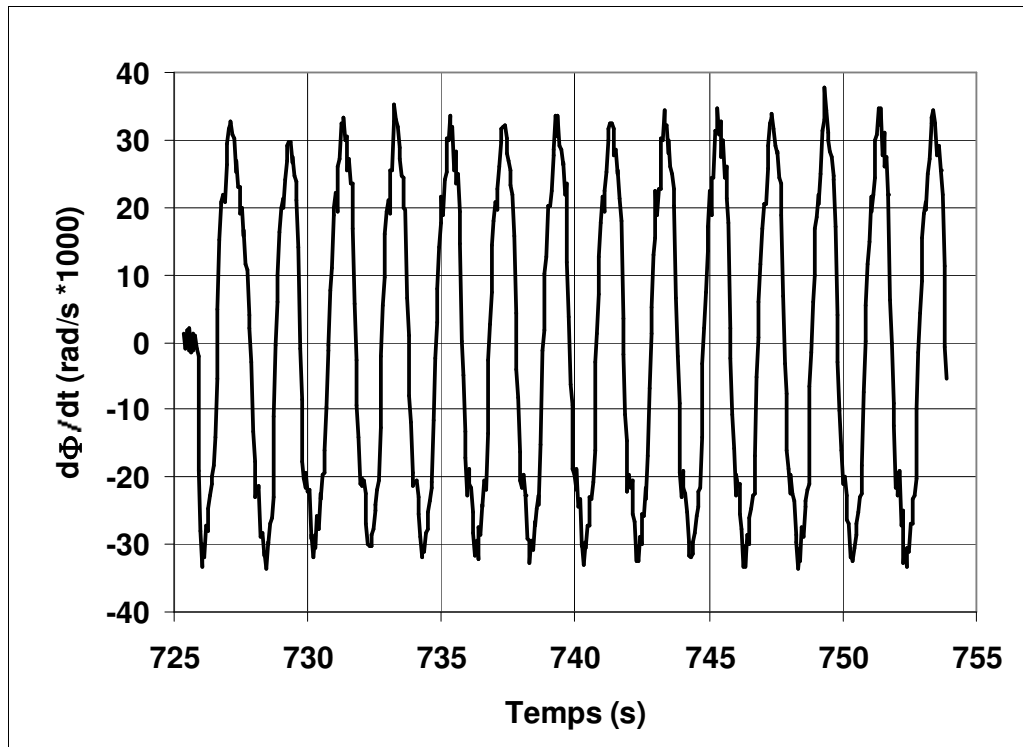


Figure 3.28. Vitesse de rotation dans le panneau d'âme, essai SW2

### 3.5.3. STRUCTURE D'ESSAI UB1

Pendant le premier cycle de chargement dynamique, la rangée de boulons du côté faible de l'assemblage est sollicitée au-delà de sa limite élastique, elle a subi des allongements excessifs pendant ce cycle. Bien que les deux rangées de boulons du côté fort de l'assemblage sont dimensionnées selon les règles de l'EC8 [E4] avec un supplément de résistance égale à 20%, les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les profilés IPE 300 et HEB 200 laminés à chaud étaient très élevées, ce qui a causé un léger dépassement de la limite élastique des boulons en traction et un glissement de 1 mm dans chaque direction pendant chaque cycle de chargement dynamique. Aucun dommage additionnel, ni de rupture prématurée due au glissement des boulons ni de surcharge du plat d'about, n'a été observé.

Le spécimen a résisté à 195 cycles de chargement dynamique avant de perdre 50% de sa capacité de résistance. Une stable propagation de fissuration est observée avant la rupture d'une des semelles de la poutre. Cette fissuration est amorcée à partir de la partie centrale de la semelle de la poutre au voisinage du pied du cordon de soudure et par la suite elle s'est propagée en longueur et en profondeur pour atteindre les deux bords de la semelle de la poutre jusqu'à la rupture complète de la semelle de la poutre. Le critère de rupture fondé sur la décroissance d'absorption d'énergie pendant chaque cycle de chargement dynamique est atteint au 93<sup>ème</sup> cycle de chargement dynamique, l'énergie absorbée pendant ce cycle est approximativement égale à 50% de l'énergie absorbée pendant le deuxième cycle de chargement dynamique ( voir figure 3.34). Cette figure met en évidence une décroissance très rapide de la capacité d'absorption d'énergie hystérétique totale entre le premier et le 30<sup>ème</sup> cycle voir entre le premier et le 40<sup>ème</sup> cycle. Cette perte prématurée de la capacité d'absorption d'énergie est due probablement à la plastification des boulons dès le premier cycle dynamique. Juste après le 40<sup>ème</sup> cycle de chargement dynamique la décroissance de la capacité d'absorption d'énergie par cycle est très lente et progressive avec des valeurs peu inférieures à 50 % de



l'énergie dissipée pendant le deuxième cycle de chargement dynamique. Le comportement hystérétique à amplitude constante de l'essai UB1 peut être interpréter facilement à l'aide du diagramme 3.30. Les boucles d'hystérésis sont dissymétriques et un très fort effet de glissement, dû principalement à la plastification des boulons, est observé. Les branches de déchargement ont exhibé une grande raideur similaire à la raideur initiale de l'assemblage.

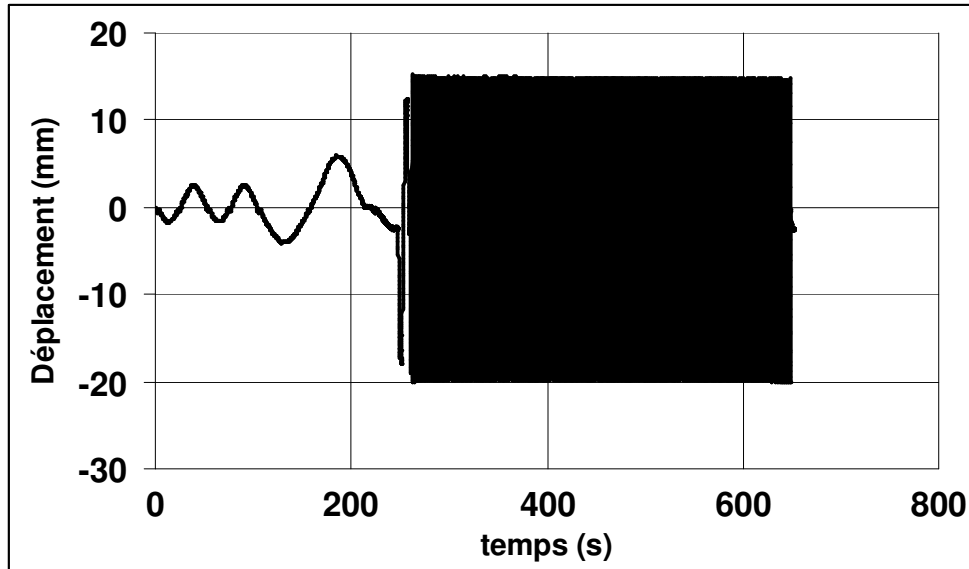


Figure 3.29. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai UB1 - phases statique et dynamique -

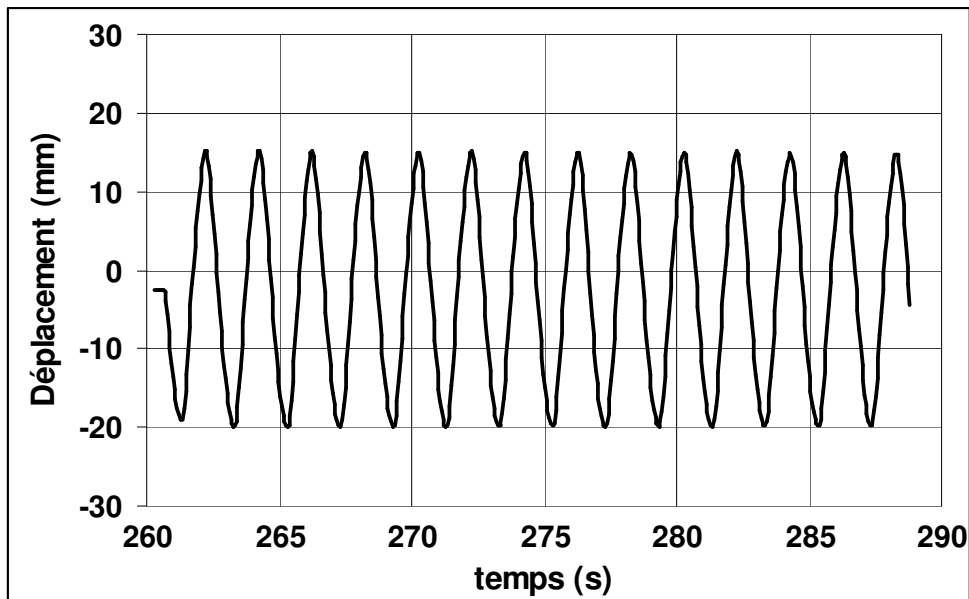


Figure 3.30. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai UB1 - phase dynamique -

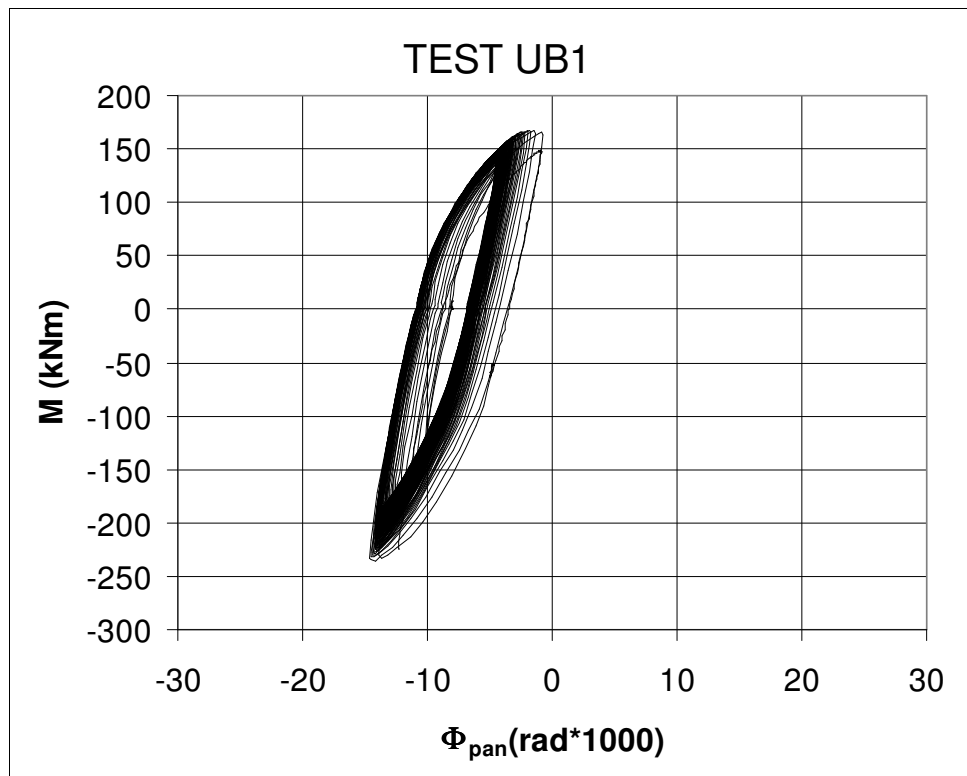


Figure 3.31. Diagramme moment-rotation du panneau d'âme, essai UB1

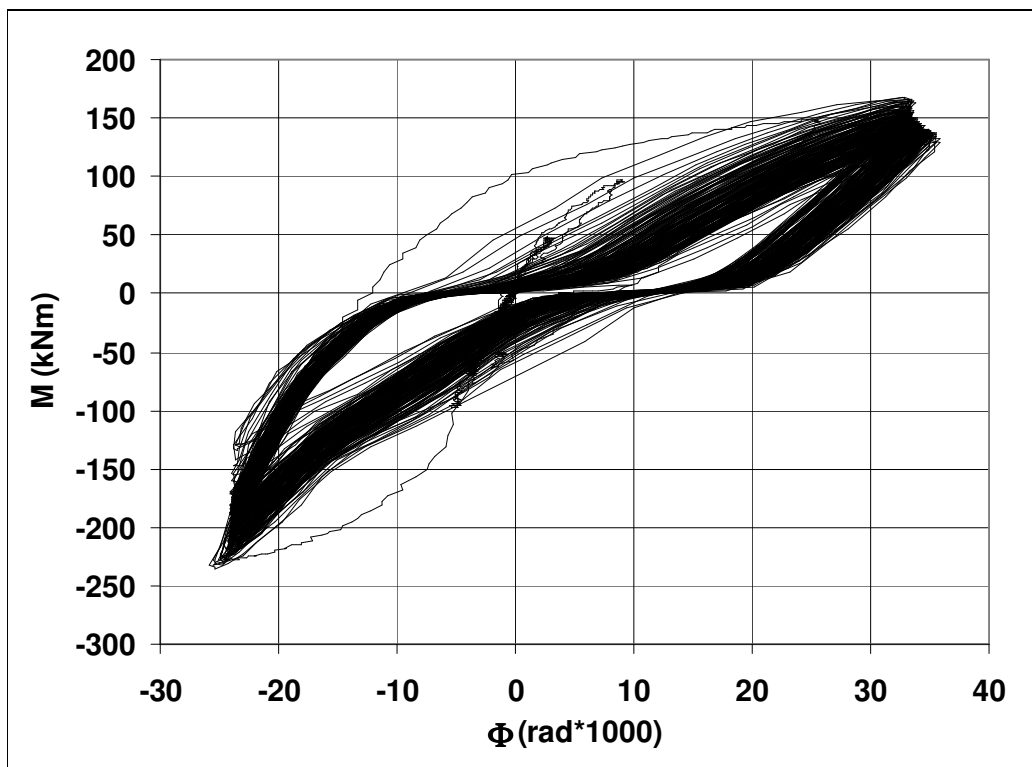


Figure 3.32. Diagramme moment-rotation totale, essai UB1

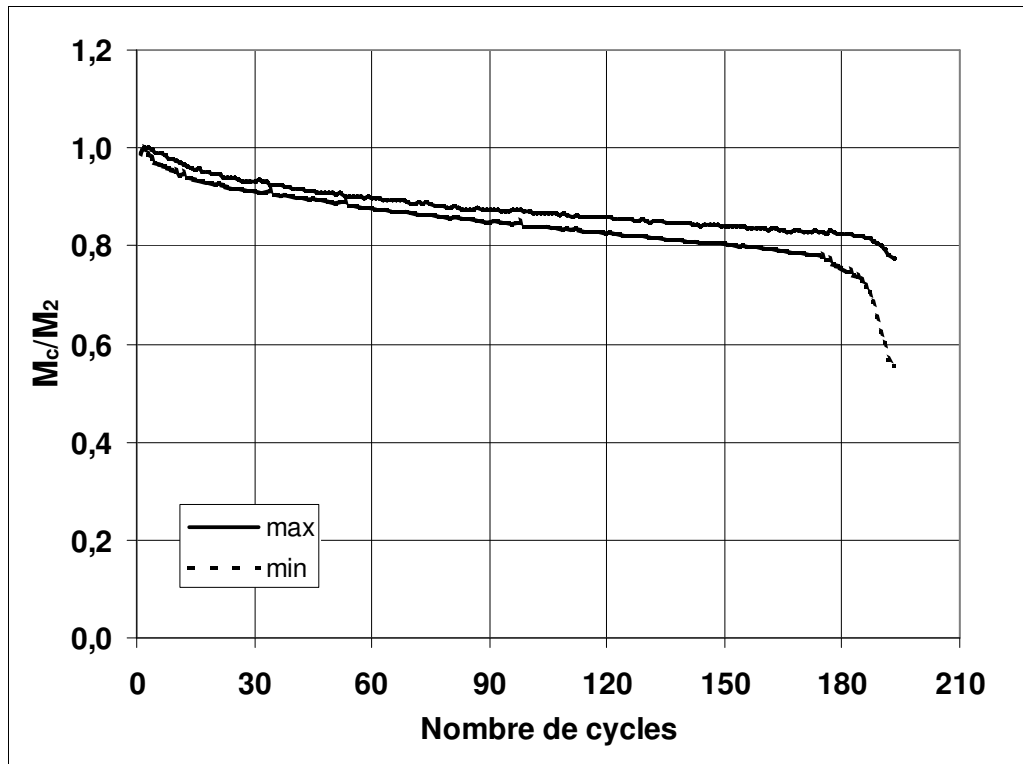


Figure 3.33. Amplitudes normalisées des moments, essai UB1

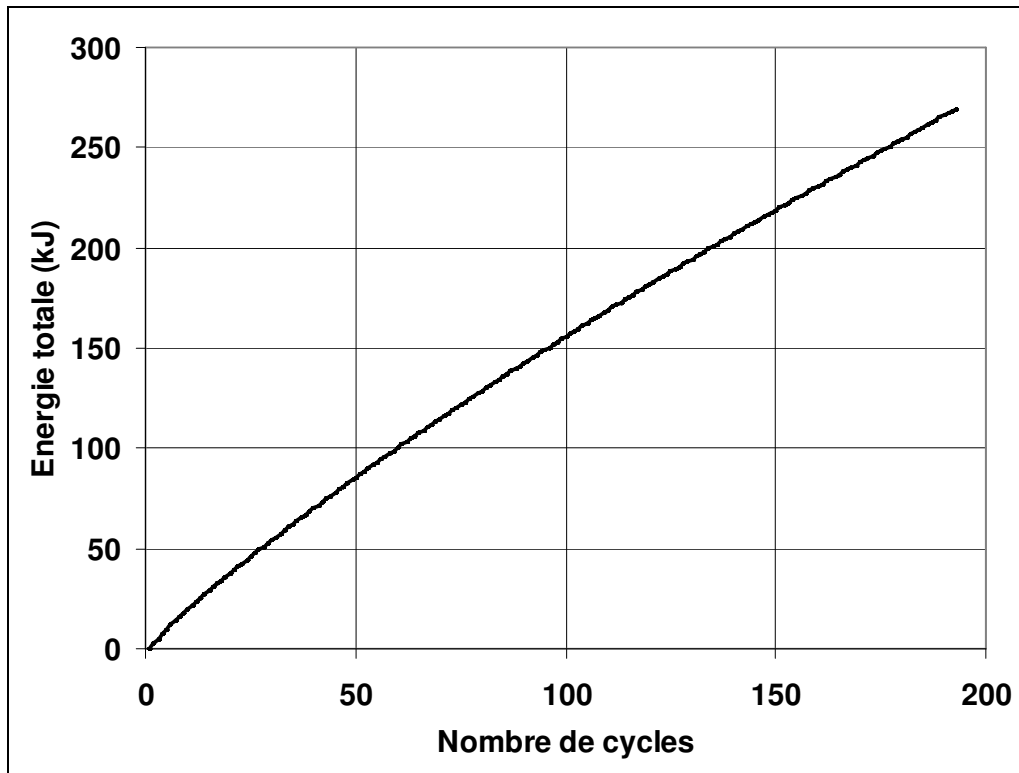


Figure 3.34. Energie totale dissipée cumulative à la fin de chaque cycle, essai UB1

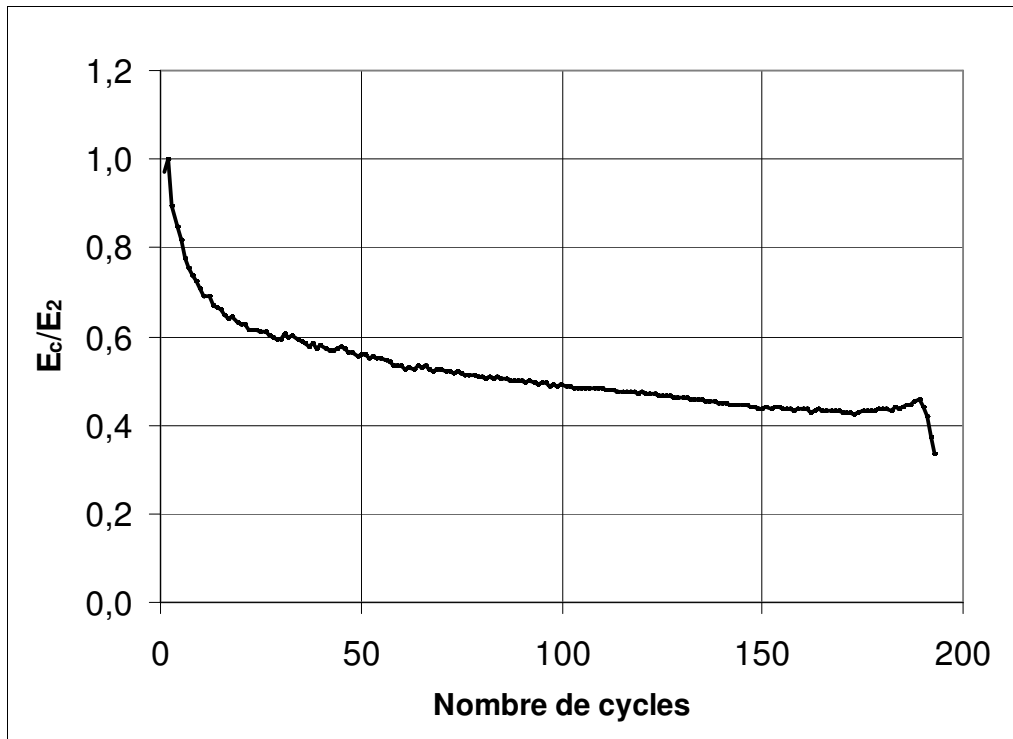


Figure 3.35. Energie normalisée dissipée dans chaque cycle, essai UB1

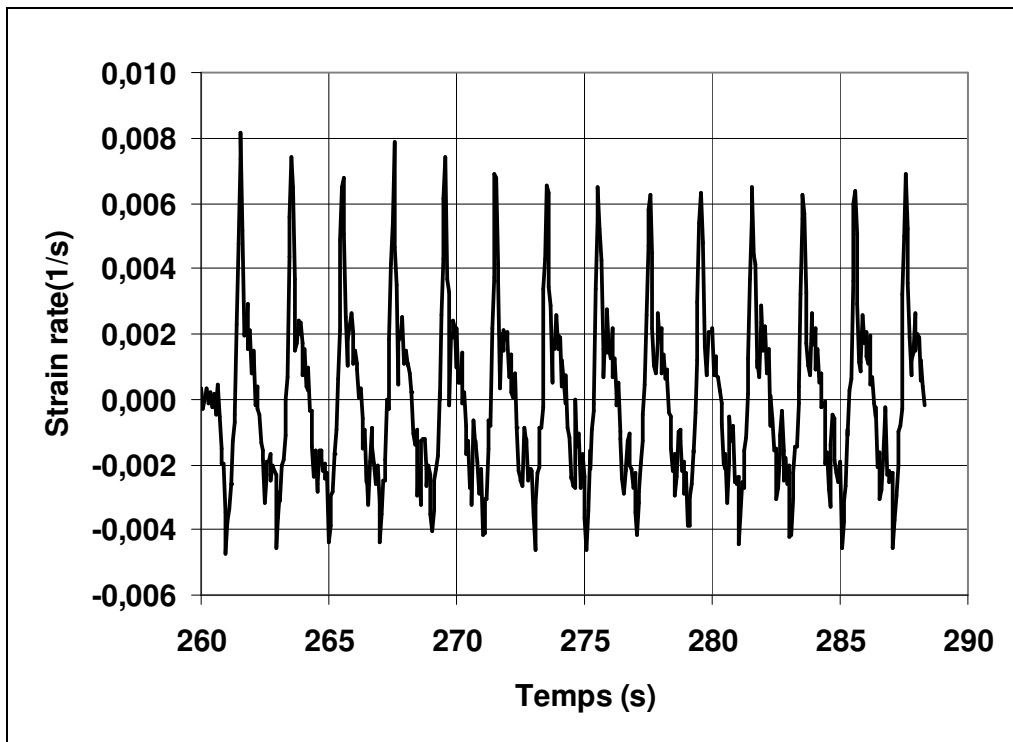
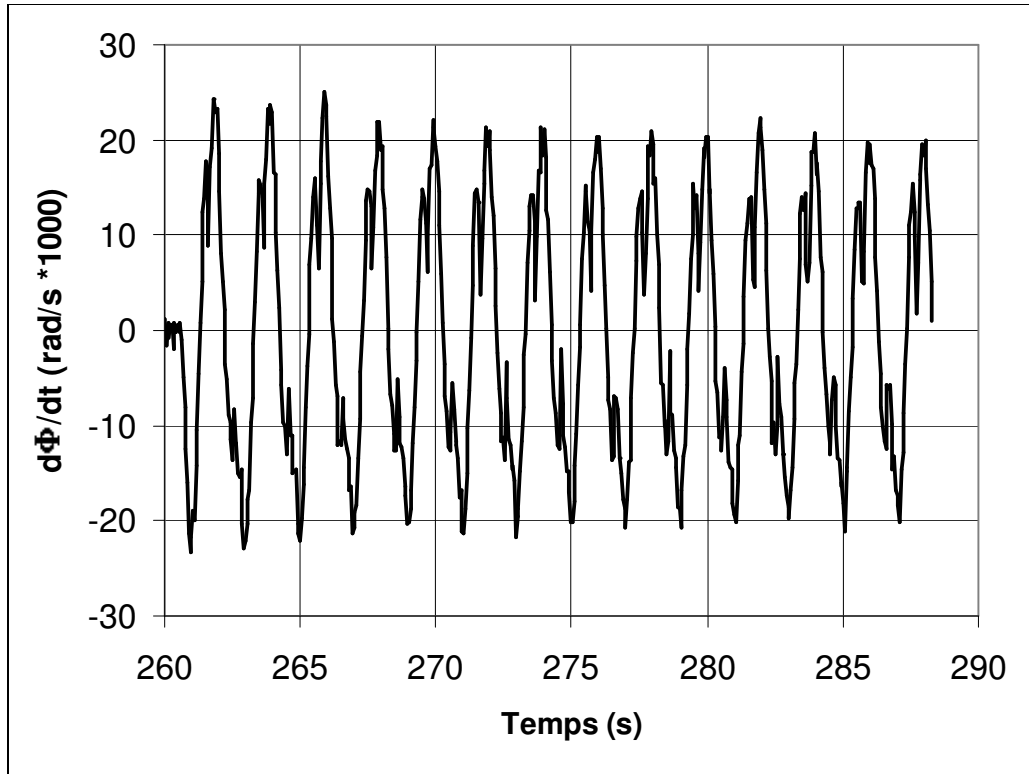


Figure 3.36. Vitesse de déformation dans la poutre, essai UB1: jauge N° 1



**Figure 3.37.** Vitesse de rotation dans le panneau d'âme, essai UB1

#### 3.5.4. STRUCTURE D'ESSAI UB2

Cet essai a montré une limite élastique ( $v_y = 10 \text{ mm}$ ) un peu plus grande que celle de l'essai UB1 ( $v_y = 9 \text{ mm}$ ), soit avec une étendue d'amplitude des déplacements ( $2v_y = 20 \text{ mm}$ ) qui était assez grande pour la rangée des boulons du côté faible de l'assemblage, cette rangée de boulons a cédé dès le premier cycle de chargement dynamique. L'essai est arrêté, puis il est recommencé de nouveau après avoir remplacé la rangée de boulons qui a cédé.

Les résultats de l'essai UB2 sont similaires aux résultats de l'essai UB1. La seule différence réelle réside dans le mécanisme de dissipation d'énergie, aucune perte de la capacité de dissipation d'énergie dans les premiers cycles de chargement dynamique n'est observée pour le spécimen UB2. Le critère de ruine admis pour ce spécimen est la perte de 50% de la capacité de résistance qui a eu lieu au 118<sup>ème</sup> cycle de chargement dynamique ( figure 3.42).

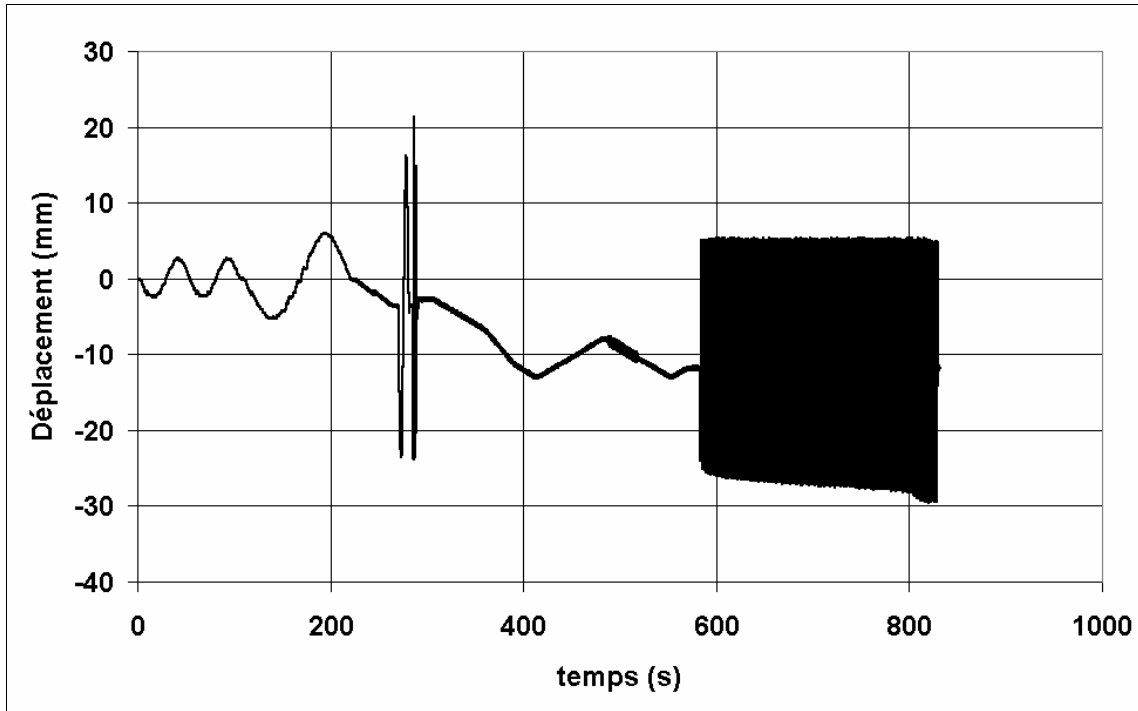


Figure 3.38. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai UB2  
- phases statique et dynamique -

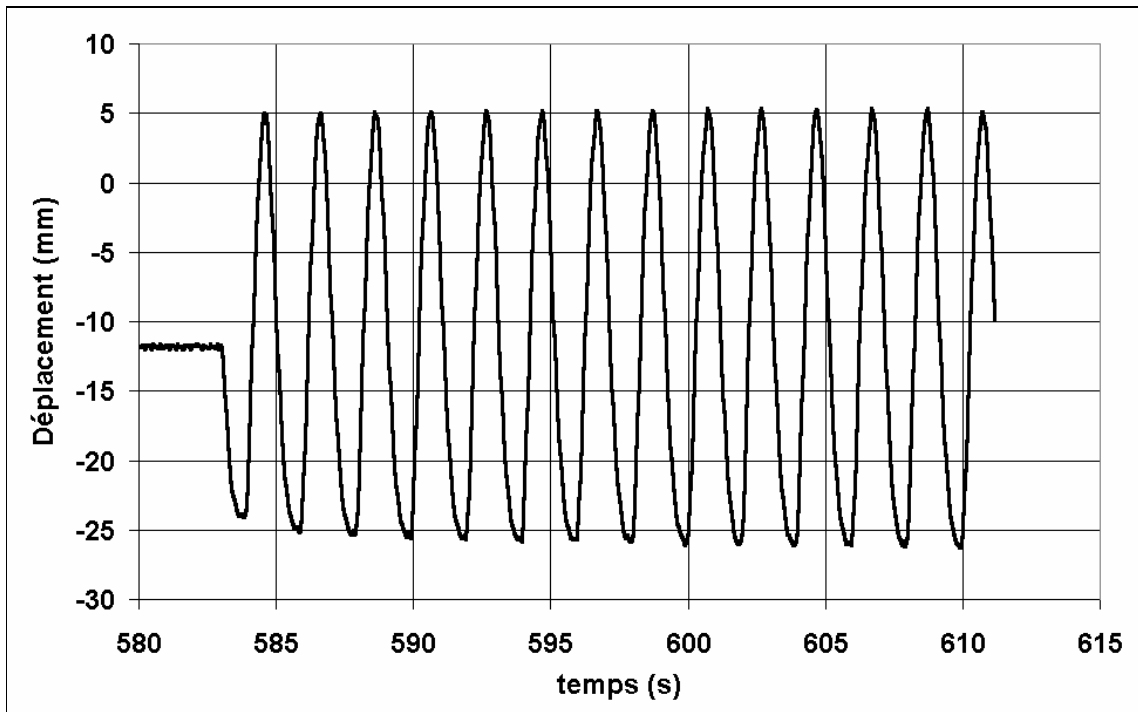


Figure 3.39. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai UB2  
- phase dynamique -

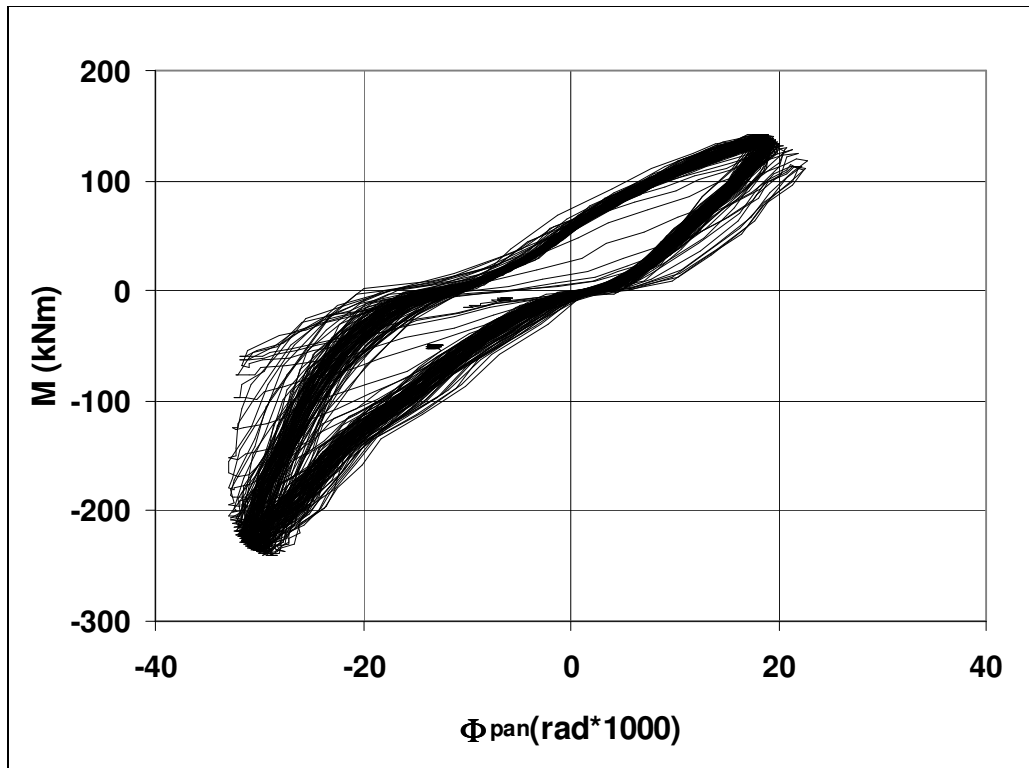


Figure 3.40. Diagramme moment-rotation du panneau d'âme, essai UB2

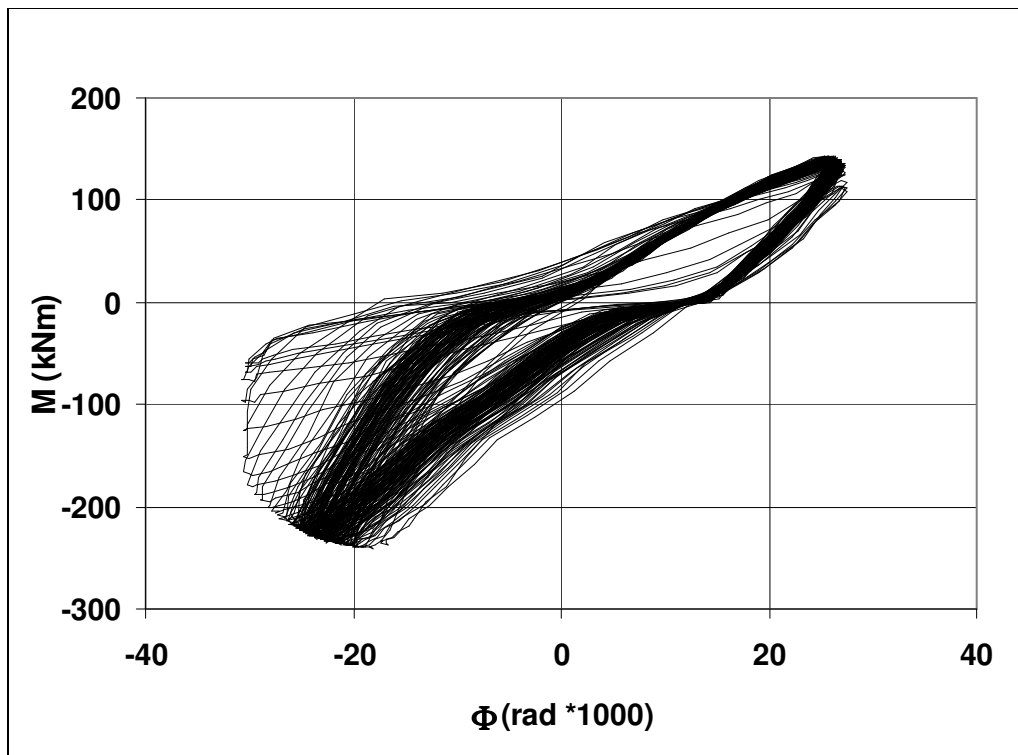


Figure 3.41. Diagramme moment-rotation totale, essai UB2

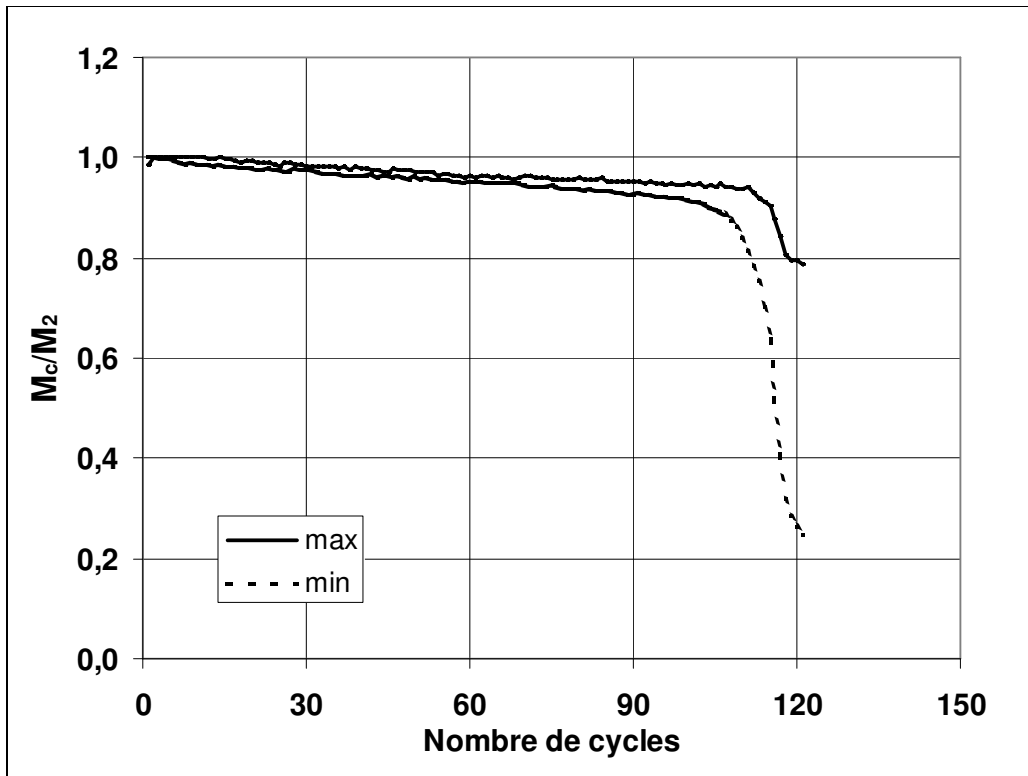


Figure 3.42. Amplitudes normalisées des moments, essai UB2

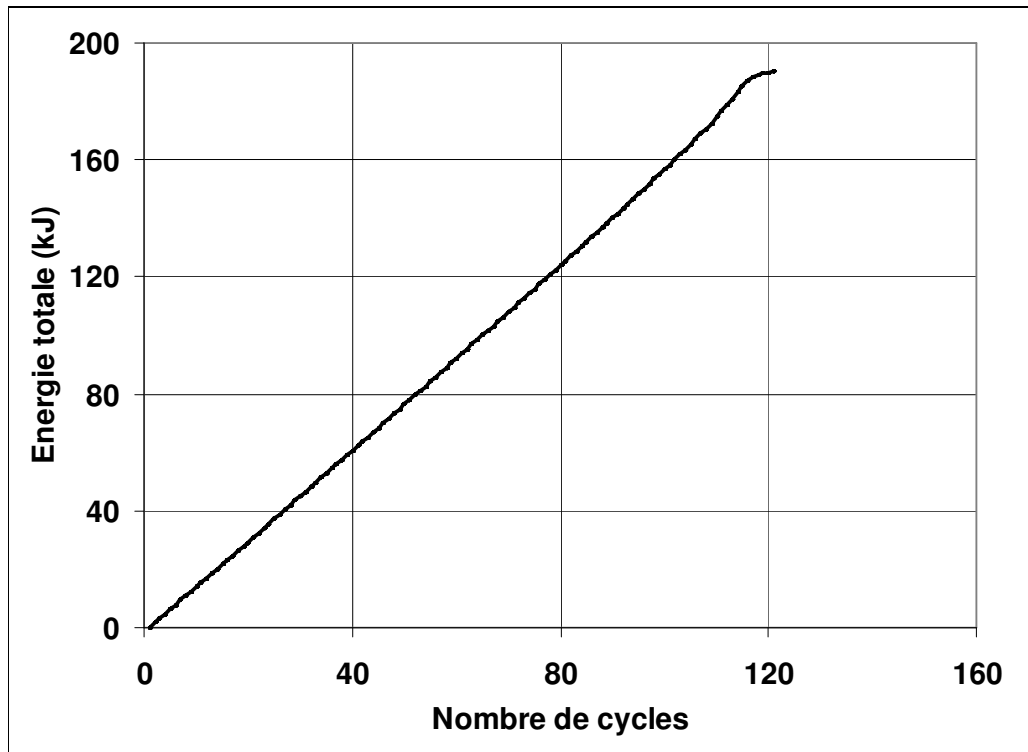


Figure 3.43. Energie totale dissipée cumulative à la fin de chaque cycle, essai UB2



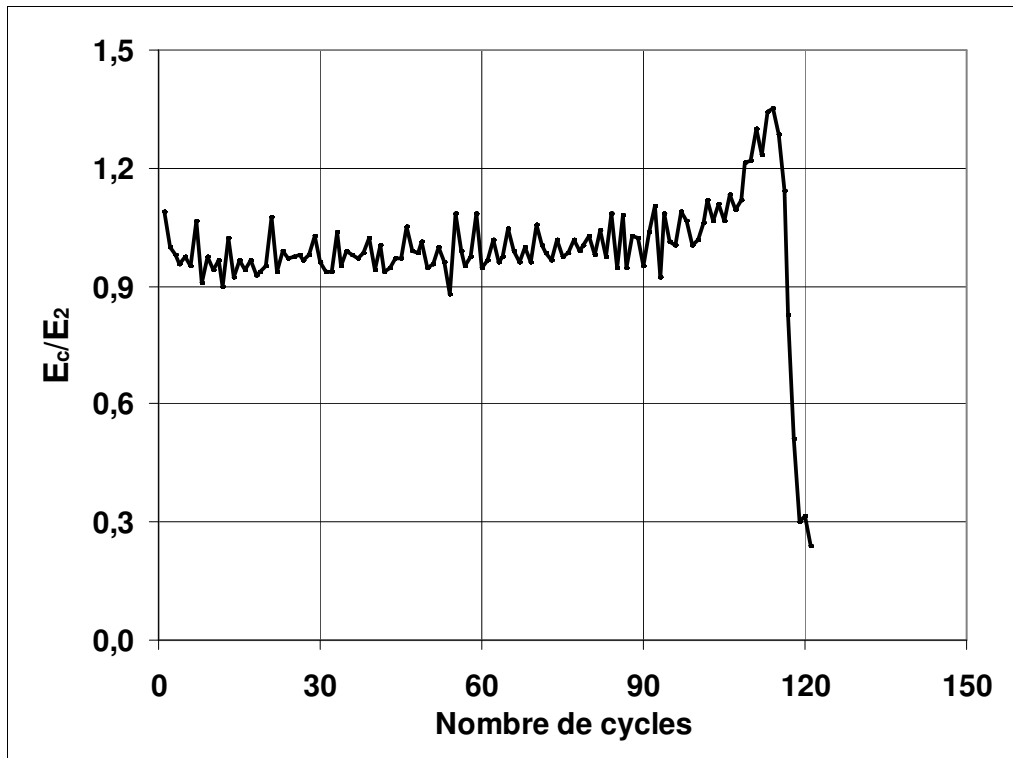


Figure 3.44. Energie normalisée dissipée dans chaque cycle, essai UB2

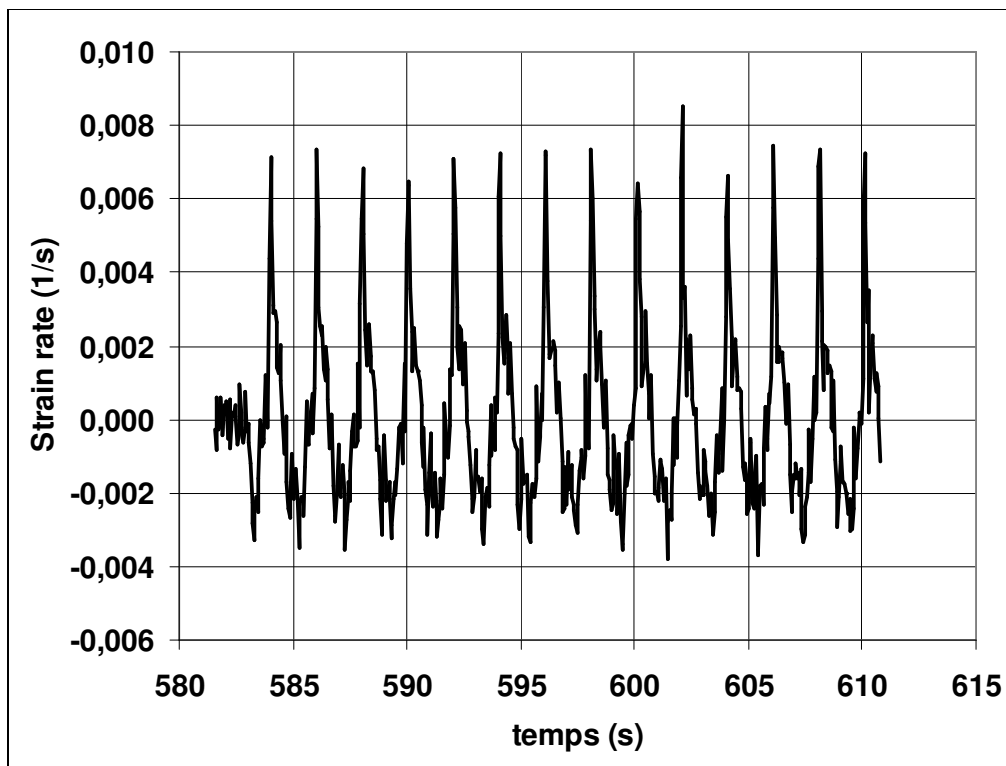


Figure 3.45. Vitesse de déformation dans la poutre, essai UB2: jauge N° 1

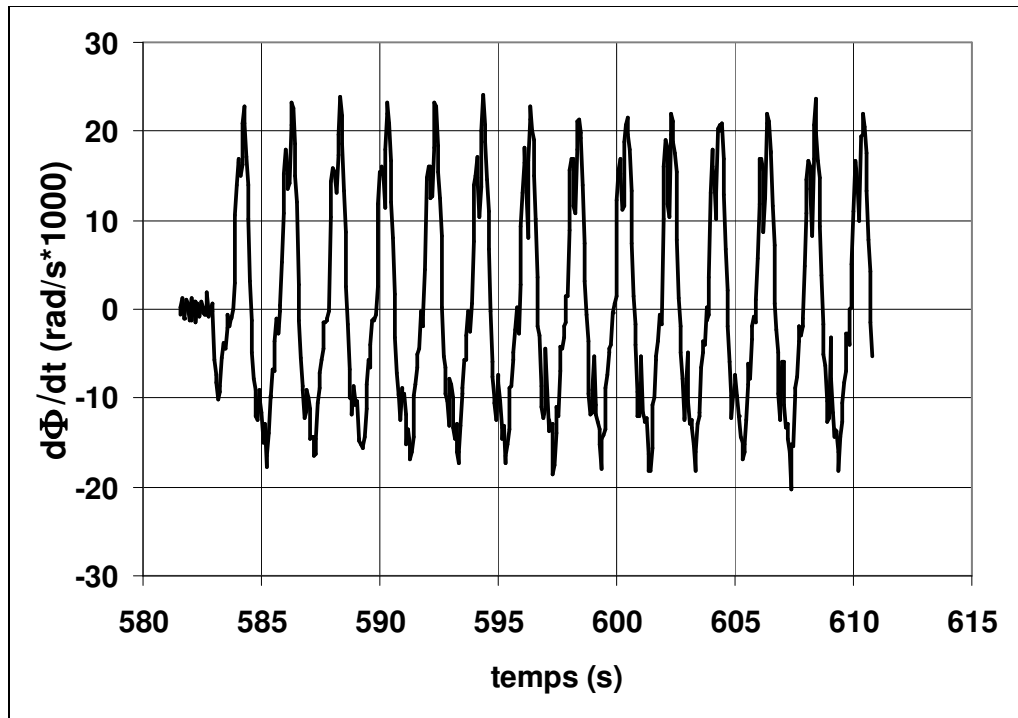


Figure 3.46. Vitesse de rotation dans le panneau d'âme, essai UB2

### 3.5.5. STRUCTURE D'ESSAI SB1

En général le comportement de l'essai SB1 est similaire à celui des spécimens simplement soudés SW1 et SW2 décrit aux paragraphes 3.2.3.3.1 et 3.2.3.3.2. Ce comportement n'est pas surprenant, car le plat d'about et les boulons sont suffisamment forts pour induire la rupture uniquement dans les semelles de la poutre par le phénomène de fatigue oligocyclique. Une propagation stable de la fissuration dans le métal de base de la poutre au-dessus du cordon de soudure précédée par une rupture généralisée de la semelle de la poutre, accompagnée par un voilement local dans la zone où a eu lieu la rupture. Le critère de rupture correspondant à 50% de réduction de la capacité de résistance est atteint au 40<sup>ème</sup> cycle de chargement dynamique (voir figure 3.50). Ces résultats sont comparables à ceux des spécimens SW1 et SW2 qui sont simplement soudés (voir paragraphe 3.2.3.1.1 et 3.2.3.1.2).

Les résultats des essais UB1, UB2 et SB1 sont rassemblés au Tableau 3.9. En ce qui concerne les spécimens UB1 et UB2 à assemblages dissymétriques, l'énergie dissipée par cycle de chargement dynamique et la vitesse de déformation dans les semelles de la poutre restent très modérées à cause de la plastification des boulons dès les premiers cycles de chargement dynamique, par contre le nombre de cycles à la rupture est assez grand. L'amplitude des vitesses de déformation (strain-rate) mesurée dans les semelles de la poutre à 7.5 cm au-dessus du plat d'about se situe entre  $0.01 \text{ s}^{-1}$  et  $0.015 \text{ s}^{-1}$  pour les spécimens à assemblages dissymétriques et  $0.02 \text{ s}^{-1}$  pour le spécimen à assemblage symétrique.

Au voisinage du plat d'about et du cordon de soudure où le moment atteint sa valeur maximum, les valeurs de l'amplitude des vitesses de déformations sont estimées être entre  $0.05 \text{ s}^{-1}$  à  $0.1 \text{ s}^{-1}$  elles sont proches des valeurs attendues dans les conditions sismiques. Durant les essais sur les spécimens UB1, UB2, SB1 les températures sont également mesurées dans les cordons de soudures qui font la jonction entre le plat d'about et la semelle de la poutre. Pour les spécimens à assemblages dissymétriques l'augmentation de la température  $\Delta T$  est

seulement de  $8.7^{\circ}\text{C}$  pour l'essai UB1 et  $15.5^{\circ}\text{C}$  pour l'essai SW2, car les déformations plastiques les plus importantes se sont développées dans la poutre en dehors des cordons de soudure. En ce qui concerne l'essai SB1 à assemblage symétrique l'augmentation de la température est mesurée à l'endroit où a eu lieu la rupture.

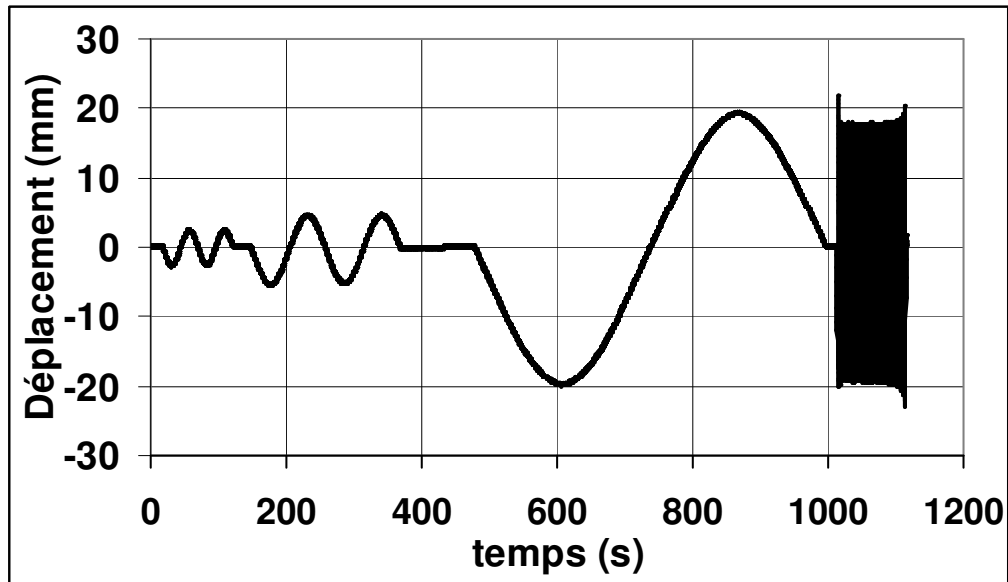


Figure 3.47. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SB1  
- phases statique et dynamique -

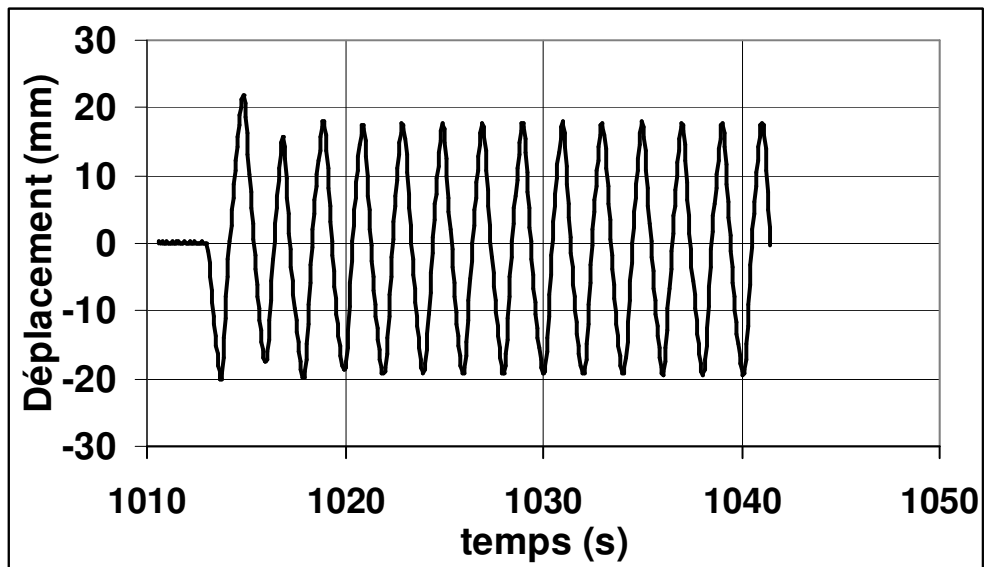


Figure 3.48. Histoire des déplacements de l'extrémité de la poutre, essai SB1  
- phase dynamique -

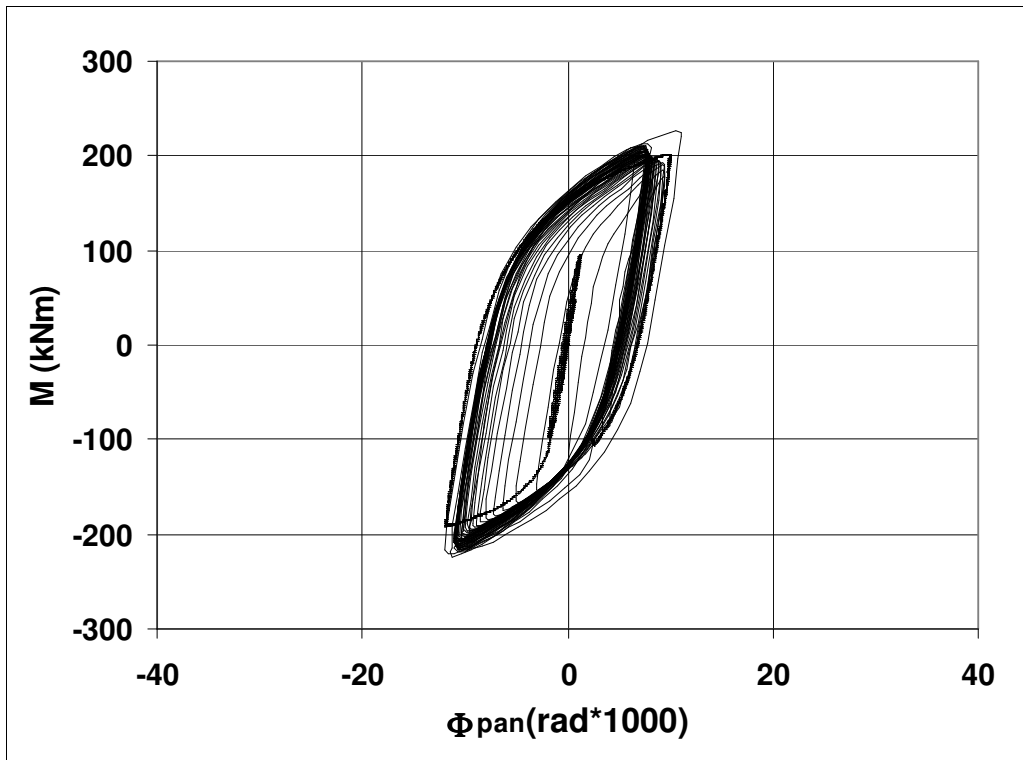


Figure 3.49. Diagramme moment-rotation du panneau d'âme, essai SB1

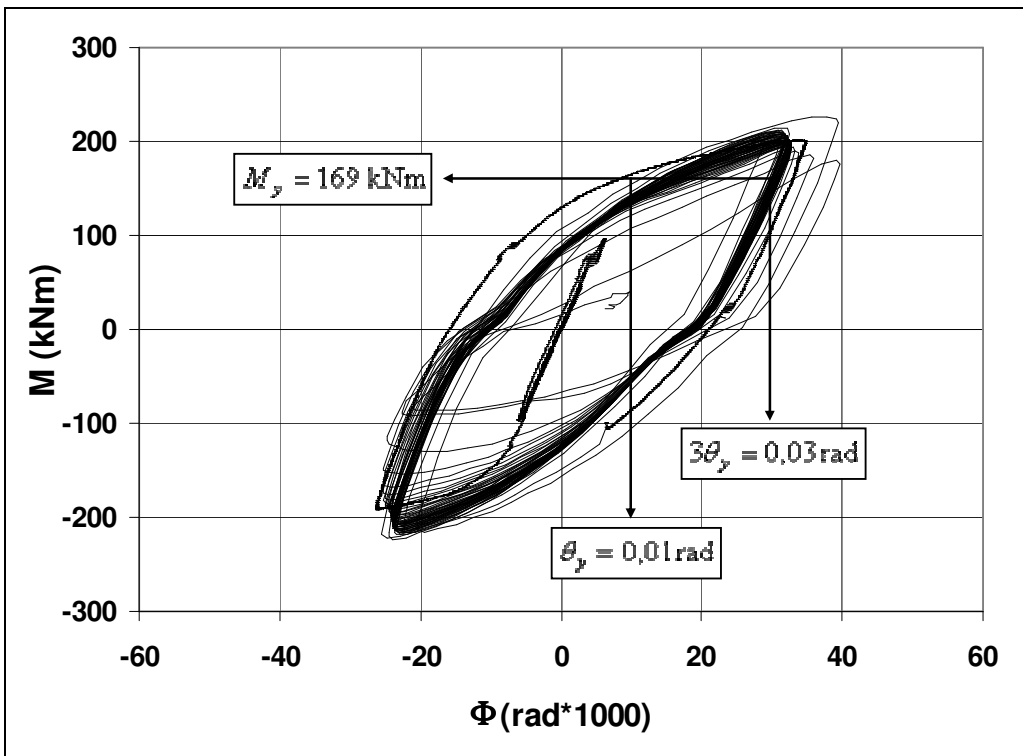


Figure 3.50. Diagramme moment-rotation totale, essai SB1

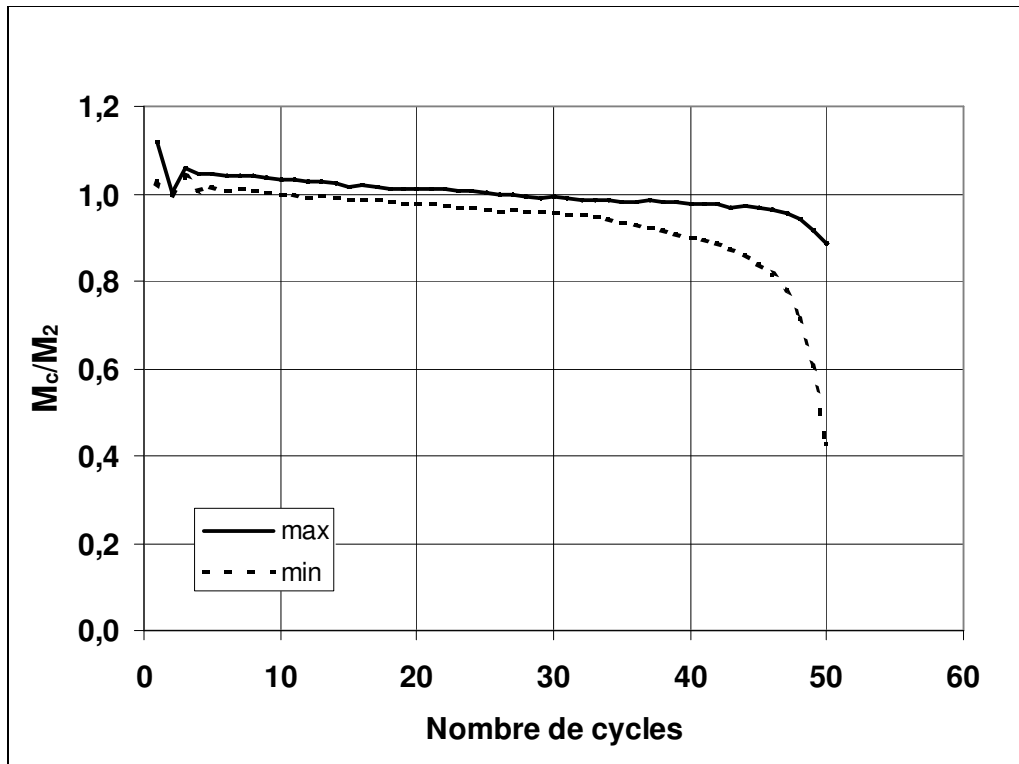


Figure 3.51. Amplitudes normalisées des moments, essai SB1

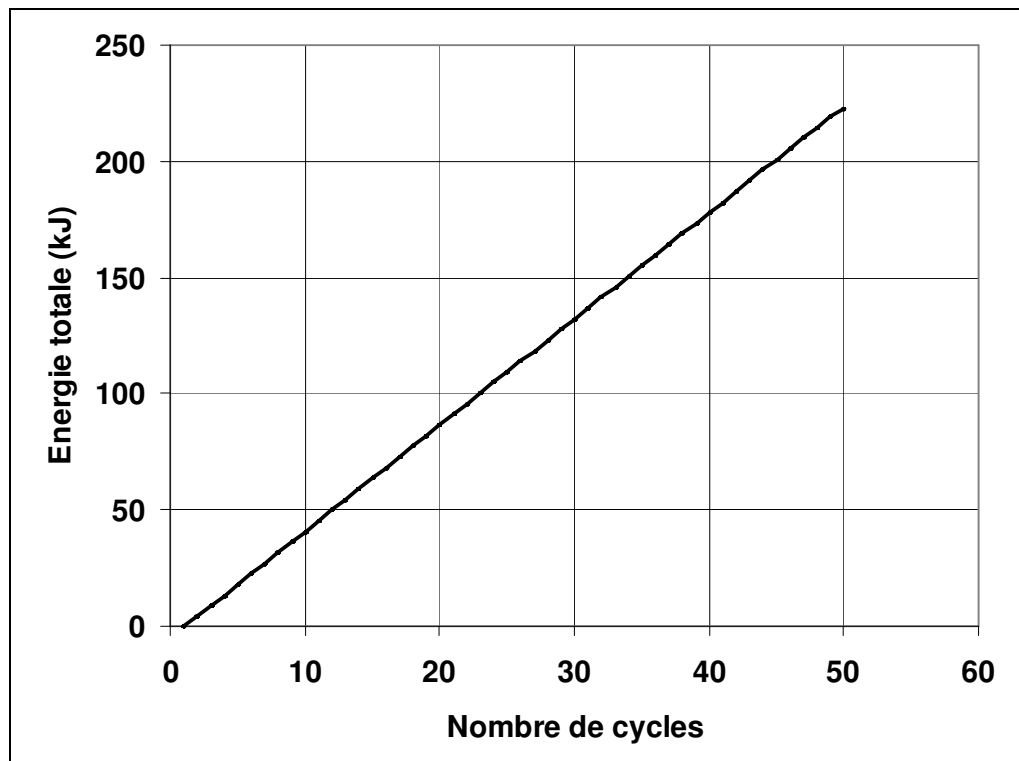


Figure 3.52. Energie totale dissipée cumulative à la fin de chaque cycle, essai SB1

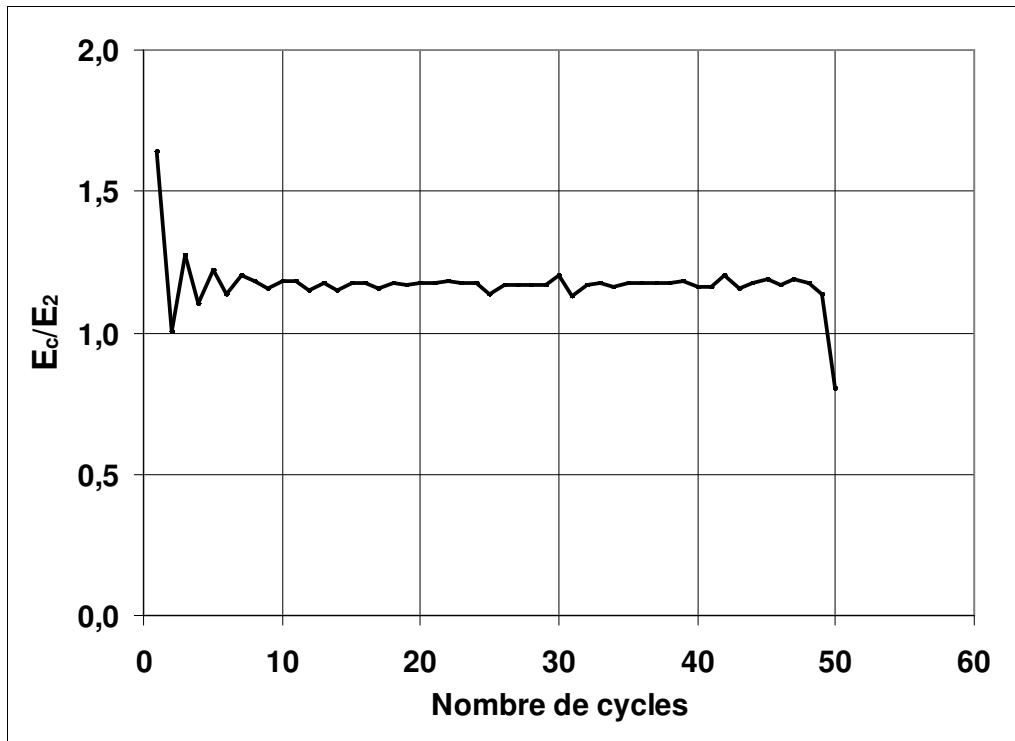


Figure 3.53. Energie normalisée dissipée dans chaque cycle, essai SB1

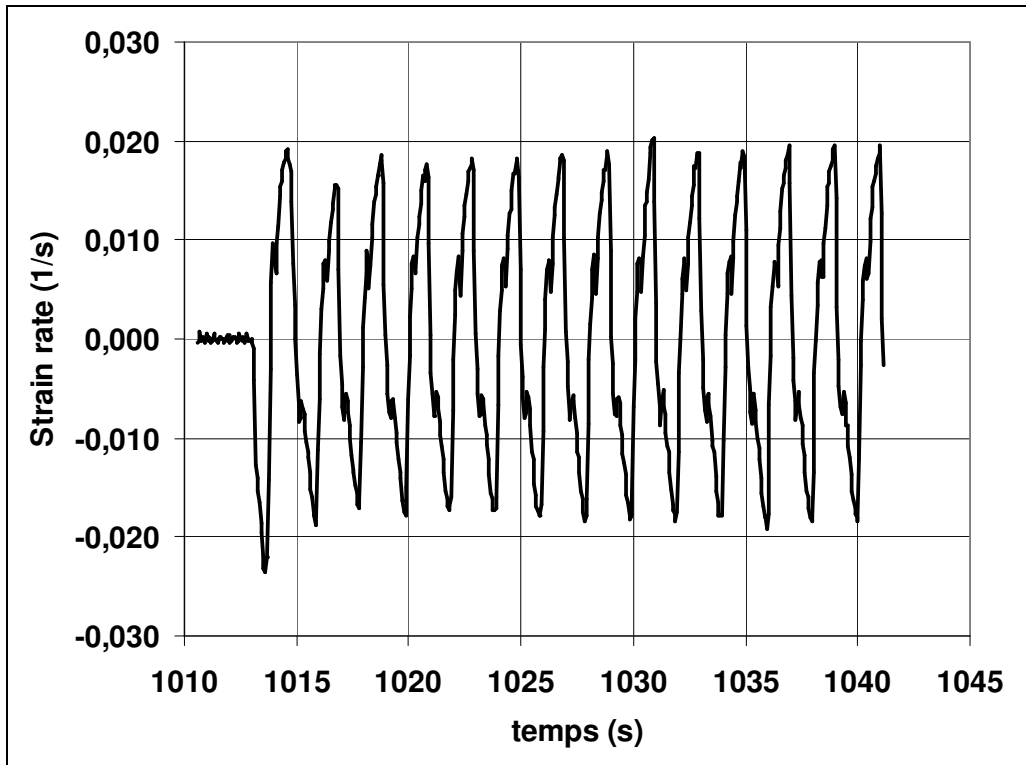


Figure 3.54. Vitesse de déformation dans la poutre, essai SB1: jauge N° 1

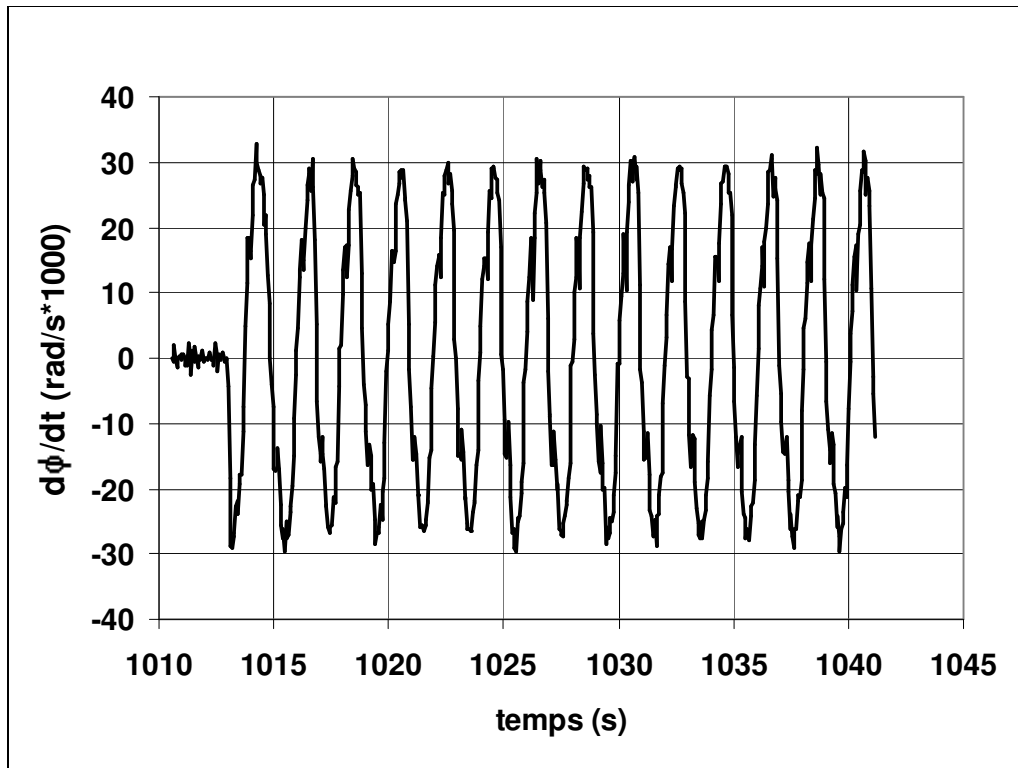


Figure 3.55. Vitesse de rotation dans le panneau d'âme, essai SB1

### 3.6. CONCLUSIONS DES EXPERIENCES EFFECTUEES

Dans les limites des conditions d'essais, on observe un comportement sain et dissipatif des éléments testés, dès lors que les conditions de l'Eurocode 8 relatives aux assemblages sont respectées (assemblages SB1, UB1, UB2). Par contre, le comportement des assemblages partiellement résistants du type réalisé est inadéquat pour les sollicitations sismiques.

Toutefois, les taux de déformation  $\dot{\epsilon}$  qu'on peut rencontrer en réalité lors d'un séisme sont bien plus élevée que ceux réalisés lors des essais : jusqu'à  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  en réalité contre  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  lors des essais.

Comme l'exécution d'essai sur éléments structurels de taille réelle n'est techniquement pas possible à l'Université de Liège, il s'impose d'effectuer une approche des conditions réelles par voie numérique.

C'est ce type de développement qu'on effectue au chapitre 4.