

Influence des déformations plastiques de l'armature de flexion sur la résistance à l'effort tranchant des poutres sans étriers. Rapport d'essai

Shear strength without stirrups after yielding of RC slab strips. Test report



Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Institut de Structures
Laboratoire de Construction en Béton (IS-BETON)

Rui Vaz Rodrigues
Prof. Dr Aurelio Muttoni

1^{er} octobre 2004

Cette recherche a été soutenue par l'Office Fédéral des Routes (OFROU)



et par la Fondation Portugaise pour la Science et Technologie (FCT)

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR Portugal

Table des matières

B-1 Introduction.....	1
B-1.1 But.....	1
B-1.2 Remerciements.....	1
B-2 Bandes de dalle.....	3
B-2.1 Géométrie et armature.....	3
B-2.2 Paramètres d'essai.....	5
B-2.3 Fabrication.....	6
B-2.4 Matériaux.....	7
Béton.....	7
Acier.....	12
B-3 Banc d'essai et instrumentation.....	15
B-3.1 Banc d'essai.....	15
B-3.2 Instrumentation.....	16
Mesures manuelles.....	16
Mesures en continu.....	18
B-3.3 Préparation et déroulement de l'essai.....	20
B-4 Résultats.....	21
B-4.1 Dépouillement des mesures.....	21
Forces.....	21
Mesures manuelles au déformètre.....	23
B-4.2 Poutre SR2.....	28
B-4.3 Poutre SR3.....	32
B-4.4 Poutre SR4.....	36
B-4.5 Poutre SR5.....	40
B-4.6 Poutre SR6.....	44
B-4.7 Poutre SR7.....	48
B-4.8 Poutre SR8.....	52
B-4.9 Poutre SR9.....	56
B-4.10 Poutre SR10.....	60
B-4.11 Poutre SR11.....	64
B-4.12 Poutre SR12.....	68
B-5 Comparaison des essais.....	73
Références bibliographiques.....	77

B-1 Introduction

B-1.1 But

Les essais ont pour principal but d'étudier la résistance à l'effort tranchant des dalles sans étriers, en particulier l'effet des déformations plastiques de l'armature de flexion dans la zone tendue sur la résistance à l'effort tranchant. Les grandeurs principales mesurées sont donc les déformations à la fibre supérieure et à la fibre inférieure et les forces appliquées qui permettront de calculer les sollicitations dans la section de rupture. Onze bandes de dalle (poutres) ont été essayées et testées en laboratoire. Le système statique choisi est isostatique. Les déformations dans le plan de l'âme ont aussi été mesurées.

B-1.2 Remerciements

Cette recherche a été réalisée au Laboratoire de construction en béton (IS-BETON) de la faculté ENAC, section de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, sous la direction du Professeur A. Muttoni. Je tiens à lui exprimer mes plus sincères remerciements pour ses conseils, sa grande disponibilité et son enthousiasme pour la recherche mis à disposition.

Pour la réalisation des essais en laboratoire je remercie Messieurs S. Demierre, N. Frey, G. Guignet, R. Gysler, F. Perrin, G. Pidoux et H. Reist.

Au niveau financier, ce travail a été rendu possible grâce au soutien de l'Office Fédéral des Routes (OFROU) et de la Fondation Portugaise pour la Science et Technologie (FCT / BD 13259 / 2003).

B-2 Bandes de dalle

B-2.1 Géométrie et armature

Les bandes de dalle ont 8.4 mètres de longueur et une section rectangulaire de 450 mm de hauteur par 250 mm de largeur, constante sur toute la longueur. Les dimensions des poutres sont indiquées en coupe et élévation à la figure B-2.1.

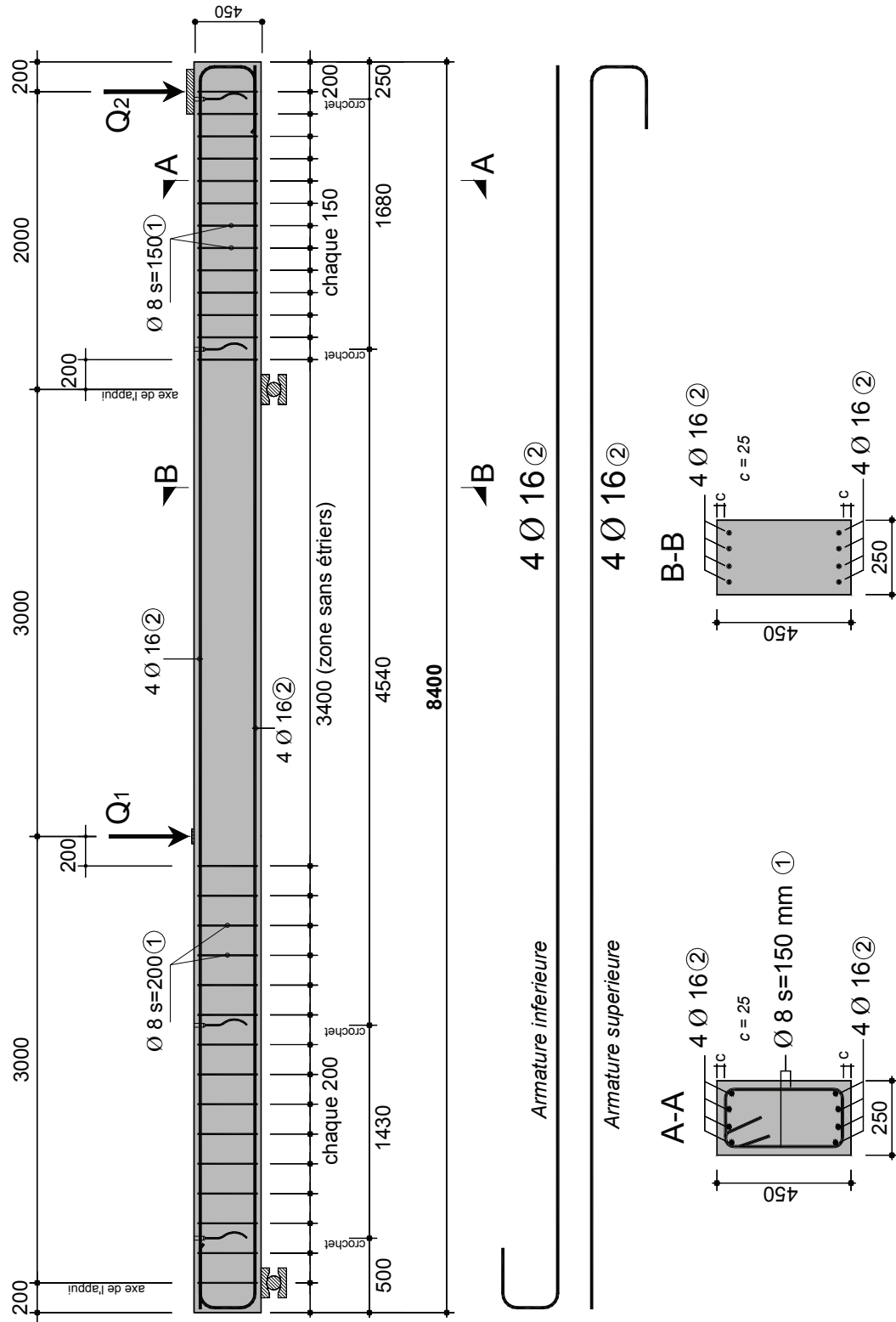


Figure B-2.1: Dimensions des bandes de dalle et armature [mm]

B-2.2 Paramètres d'essai

Le taux d'armature choisi pour la flexion ($\rho = 0.79\%$) est jugé représentatif pour des éléments en porte-à-faux des dalles de roulement de pont, au niveau de l'encastrement.

Les dimensions de la portée principale et du porte-à-faux ont été choisies de façon à investiguer l'effet des déformations plastiques de l'armature de flexion sur la résistance à l'effort tranchant sans étriers. Selon le modèle de résistance à l'effort tranchant sans étriers défini dans (Muttoni03), la résistance à l'effort tranchant vaut :

$$\tau_R = \frac{0.3 \cdot \sqrt{f_c}}{0.9 + 2.3 \cdot \varepsilon \cdot d \cdot k_{dg}} \quad (\text{B-2.1})$$

Où

- f_c [MPa] est la résistance à la compression du béton
- d [mm] est l'hauteur utile
- $k_{dg} = 48/(d_g+16)$
- d_g [mm] est le diamètre maximal des agrégats
- ε est la déformation axiale de la poutre, calculée avec la section fissurée à $0.6 \cdot d$ du bord comprimé et à une section située à $0.5 \cdot d$ du bord de la charge concentrée (dans ce cas, la charge Q_1).

Pour l'armature et les dimensions données à la figure B-2.1, on a $\rho = 0.79\%$, $d = 409$ mm et $b = 250$ mm. Les propriétés suivantes sont admises pour les matériaux: $E_c = 30$ kN/mm², $E_s = 210$ kN/mm², $f_c = 50$ MPa, $f_y = 550$ MPa (limite d'écoulement de l'acier), $d_g = 16$ mm. On considère aussi l'hypothèse que le comportement en stade homogène est négligeable et que le comportement est parfaitement plastique après que le moment résistant de la section soit atteint. La figure B-2.2 indique la position de la section critique située à $0.5 \cdot d$ de la force Q_1 et l'évolution de l'effort tranchant sollicitant V_s (au cours de l'essai) avec l'effort tranchant résistant $V_R = \tau_R \cdot b \cdot d$ (τ_R selon l'équation B-2.1.) pour différents rapports Q_2/Q_1 .

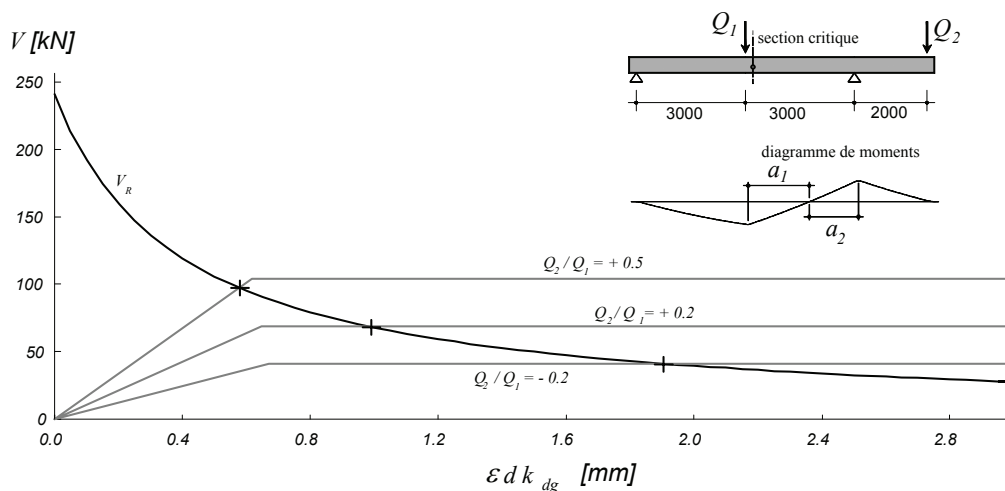


Figure B-2.2: Comportement des poutres et critère de rupture (Muttoni03)

Le comportement illustré à la figure B-2.2 montre que, pour $Q_2/Q_1 = +0.5$ la rupture à l'effort tranchant se produit alors que la poutre se trouve à la fin de la phase élastique fissuré, avant que le plateau plastique soit atteint. Les déformations plastiques à la rupture augmentent lorsque les valeurs du rapport Q_2/Q_1 diminuent. La ductilité de l'acier de l'armature joue un rôle important : si l'acier n'est pas suffisamment ductile une rupture précoce des barres d'armature se produit avant la rupture par effort tranchant.

En variant le rapport Q_2/Q_1 , on fait varier l'effort tranchant sollicitant à la rupture, mais aussi (selon le critère énoncé à la figure B-2.2) les déformations plastiques à la rupture. Ceci permet donc d'investiguer l'effet des déformations plastiques sur la résistance à l'effort tranchant sans étriers.

Le rapport Q_2/Q_1 a été choisi entre -0.20 et +0.5. La force de réaction à l'appui intermédiaire est nulle pour $Q_2/Q_1 = -0.375$. Le rapport $Q_2/Q_1 = +0.5$ correspond à la formation d'une rotule plastique sur l'appui intermédiaire avec mécanisme de porte-à-faux. Le tableau B-2.1 résume les paramètres des poutres. Les distances a_1 et a_2 sont indiquées à la figure B-2.2.

Tableau B-2.1: Paramètres des poutres d'essai

Essai	Q_2/Q_1	a_1 [m]	a_2 [m]	Type d'acier
SR-2	0.50	1.50	1.50	} Etiré à froid
SR-3	0.20	2.29	0.71	
SR-4	0.00	3.00	0	
SR-5	-0.20	3.92	-	
SR-6	0.60	1.28	1.72	
SR-7	0.10	2.63	0.37	
SR-8	-0.10	3.43	-	
SR-9	0.35	1.87	1.14	
SR-10	-0.10	3.43	-	
SR-11	0.35	1.87	1.14	
SR-12	0.20	2.29	0.71	

B-2.3 Fabrication

Les bandes de dalle ont été fabriquées dans l'usine de préfabrication d'éléments en béton armé GRAM, à Villeneuve FR, Suisse. La figure B-2.3 montre quelques étapes du processus de fabrication. Les bétonnages ont été effectués en 3 gâchées, le lundi 9 février 2004 (gâchée 1, G1) et le lundi 16 février 2004 (gâchée 2, G2) et le lundi 31 janvier 2005 (gâchée 3, G3).

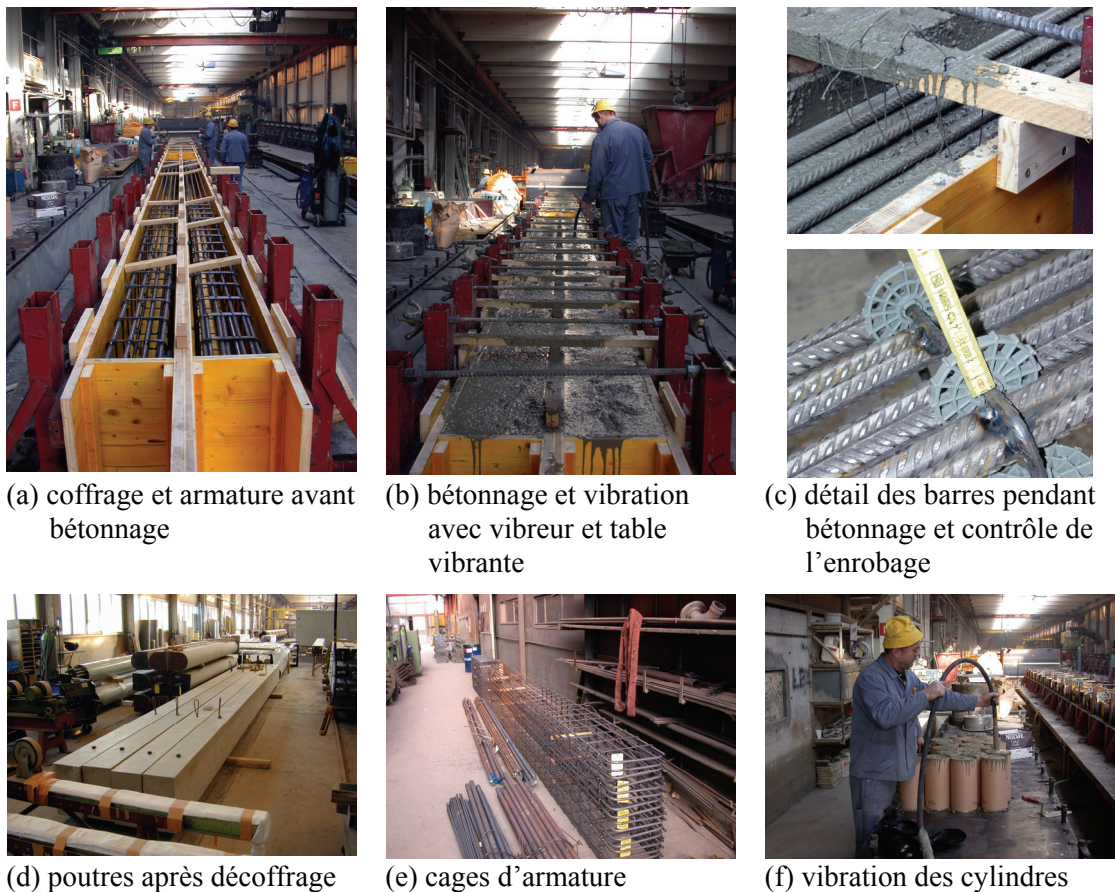


Figure B-2.3: Fabrication des poutres

B-2.4 Matériaux

Béton

Lors de la fabrication, des éprouvettes cylindriques de diamètre $\varnothing = 159$ mm et hauteur $h = 320$ mm ont été réalisées simultanément en vue de la détermination des propriétés du béton.

Les résultats des essais de compression et de traction sur cylindres sont présentés au tableau B-2.4 pour la gâchée G1, au tableau B-2.5 pour la gâchée G2, et au tableau B-2.6 pour la gâchée G3. Les propriétés mécaniques le jour des essais sont déterminées sur la base de courbes de la forme $a \cdot \text{jours}^b + c$ ajustées, dont les constantes a , b et c sont déterminées par les moindres carrés. Les valeurs des propriétés mécaniques le jour des essais sont indiquées au tableau B-2.3. L'évolution des propriétés mécaniques est représentée graphiquement à la figure B-2.4 pour la gâchée G1, à la figure B-2.5 pour la gâchée G2 et à la figure B-2.6 pour la gâchée G3.

La composition par mètre cubique de béton est indiquée au tableau B-2.2. La figure B-2.8 montre les agrégats utilisés.

Chapitre B-2

Tableau B-2.2: Composition de 1 m³ de béton

Sable 0/4	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau
929 kg	1337 kg	1858 kg	440 kg	190 kg
23%	32%	45%		E/C = 0.43

Tableau B-2.3: Propriétés du béton le jour des essais (moyenne et coefficient de variation)

Essai	Date	Jours	Résistance à la compression (f_c)	Résistance à la traction (f_{ct})	Module d'élasticité (E_c)
			[MPa]	[MPa]	[GPa]
SR2	16.03.2004	37	43.11	2.82	30.98
	17.03.2004		± 2.4%	± 2.0%	± 1.7%
SR3	27.04.2004	79	50.62	3.00	31.94
	28.04.2004		± 4.9%	± 2.3%	± 1.8%
SR4	27.05.2004	102	47.55	2.56	33.06
	28.05.2004		± 5.1%	± 2.9%	± 2.8%
SR5	01.06.2004	107	47.64	2.59	33.07
	02.06.2004		± 5.4%	± 2.9%	± 2.8%
SR6	22.11.2004	288	52.71	3.32	33.63
	23.11.2004		± 3.9%	± 3.4%	± 2.5%
SR7	02.12.2004	291	49.11	3.18	32.63
	03.12.2004		± 5.7%	± 3.1%	± 3.2%
SR8	10.12.2004	299	49.16	3.20	32.61
	11.12.2004		± 7.9%	± 3.1%	± 3.2%
SR9	15.12.2004	311	52.82	3.34	33.82
	16.12.2004		± 8.5%	± 3.5%	± 2.5%
SR10	05.05.2005	95	42.41	2.49	31.66
	06.05.2005		± 1.4%	± 6.03%	± 2.40%
SR11	17.05.2005	106	42.91	2.67	31.85
	17.05.2005		± 0.8%	± 4.0%	± 2.4%
SR12	31.05.2005	121	43.51	2.91	32.08
	01.06.2005		± 4.4%	± 3.4%	± 0.9%

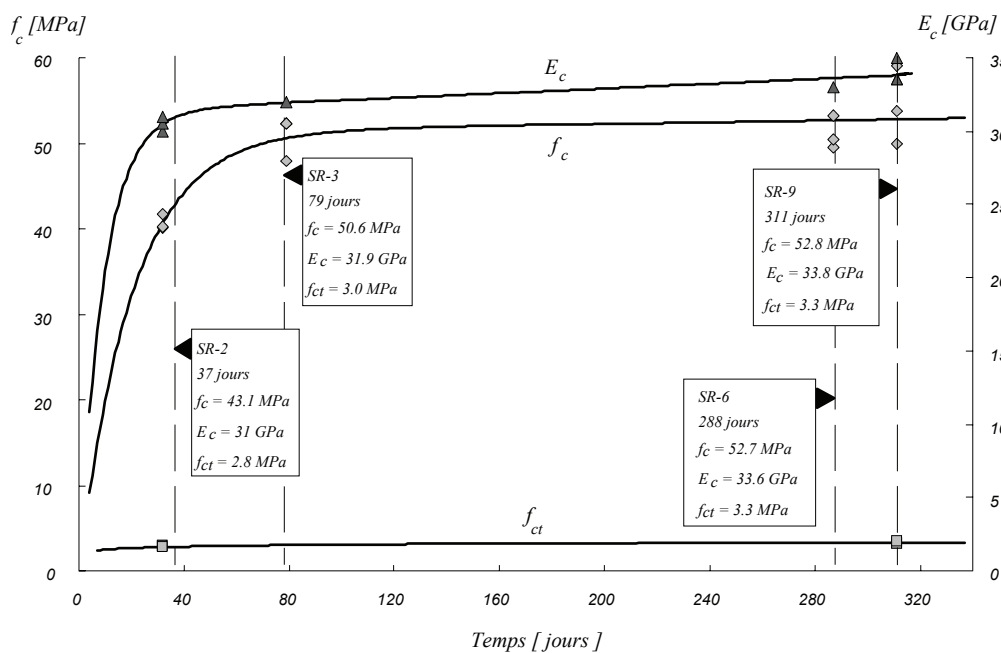


Figure B-2.4: Evolution des propriétés mécaniques (G1)

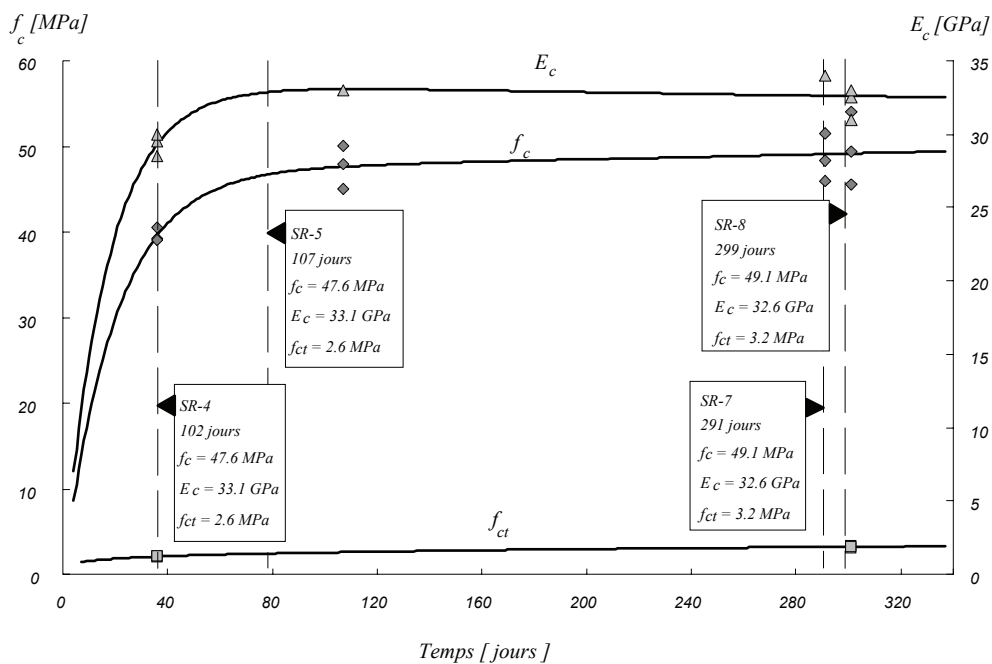


Figure B-2.5: Evolution des propriétés mécaniques (G2)

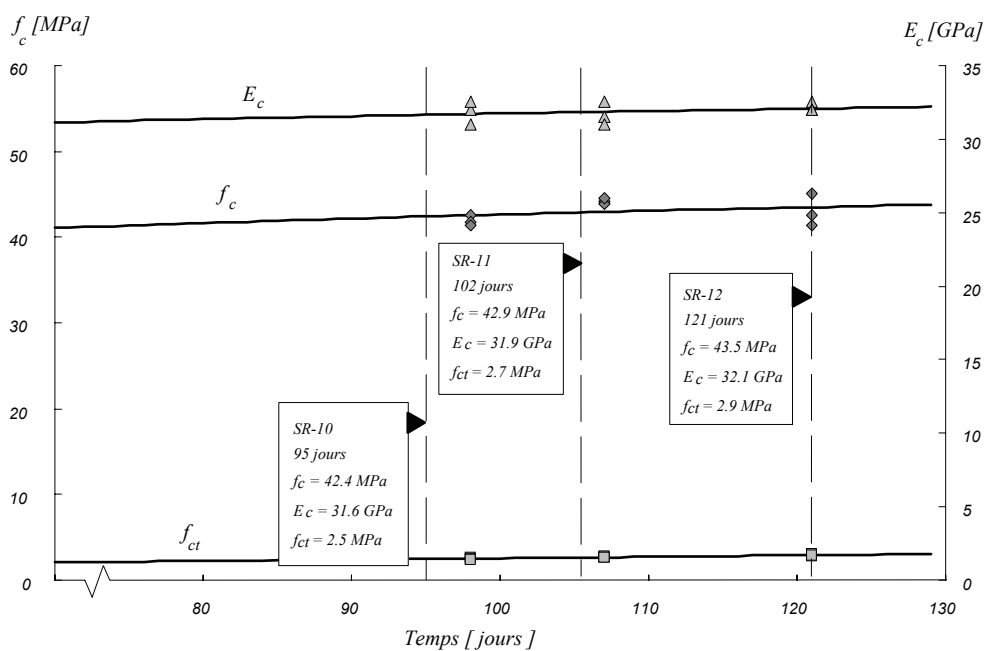


Figure B-2.6: Evolution des propriétés mécaniques (G3)

Chapitre B-2

Tableau B-2.4: Résultats des essais sur cylindres, (G1)

n°PV	Date	Jours	Résistance à la compression (f_c) [MPa]	Résistance à la traction (f_{ct}) [MPa]	Module d'élasticité (E_c) [GPa]	Masse volumique apparente [t/m ³]	
(Fabrication)	09.02.2004	0	-	-	-	-	
047/04/LMC	12.03.2004	32		2.9		2.38	
047/04/LMC	12.03.2004	32		2.9		2.37	
047/04/LMC	12.03.2004	32		2.8		2.37	
046/04/LMC	12.03.2004	32	40.1		30.0	2.36	a)
046/04/LMC	12.03.2004	32	41.7		30.5	2.38	a)
046/04/LMC	12.03.2004	32	40.3		31.0	2.38	a)
089/04/LMC	28.04.2004	79	48.0			2.37	
089/04/LMC	28.04.2004	79	52.3			2.37	
090/04/LMC	28.04.2004	79	52.3		32.0	2.38	
334/04/LMC	22.11.2004	287	49.50			2.37	
334/04/LMC	22.11.2004	287	50.50			2.37	
333/04/LMC	22.11.2004	287	53.20		33.00	2.36	
370/04/LMC	16.12.2004	311	53.80		33.50	2.34	
370/04/LMC	16.12.2004	311	49.90		35.00	2.36	
370/04/LMC	16.12.2004	311	59.10		33.50	2.37	
371/04/LMC	16.12.2004	311		3.20		2.37	
371/04/LMC	16.12.2004	311		3.20		2.36	
371/04/LMC	16.12.2004	311		3.40		2.36	

a) Avec diagramme contrainte-déformation

Tableau B-2.5: Résultats des essais sur cylindres, (G2)

n°PV	Date	Jours	Résistance à la compression (f_c) [MPa]	Résistance à la traction (f_{ct}) [MPa]	Module d'élasticité (E_c) [GPa]	Masse volumique apparente [t/m ³]	
(Fabrication)	16.02.2004	0	-	-	-	-	
071/04/LMC	23.03.2004	36		2.00		-	
071/04/LMC	23.03.2004	36		2.10		-	
071/04/LMC	23.03.2004	36		2.10		-	
070/04/LMC	23.03.2004	36	40.5		29.5	2.38	a)
070/04/LMC	23.03.2004	36	39.2		30.0	2.38	a)
070/04/LMC	23.03.2004	36	39.1		28.5	2.38	a)
124/04/LMC	02.06.2004	107	45.0			2.38	
124/04/LMC	02.06.2004	107	50.1			2.38	
125/04/LMC	02.06.2004	107	47.9		33.0	2.38	
349/04/LMC	03.12.2004	291	51.50			2.37	
349/04/LMC	03.12.2004	291	48.30			2.36	
348/04/LMC	03.12.2004	291	46.00		34.00	2.36	
361/04/LMC	13.12.2004	301	45.60		31.00	2.36	
361/04/LMC	13.12.2004	301	49.40		32.50	2.35	
361/04/LMC	13.12.2004	301	54.00		33.00	2.37	
362/04/LMC	13.12.2004	301		3.10		2.36	
362/04/LMC	13.12.2004	301		3.30		2.36	
362/04/LMC	13.12.2004	301		3.20		2.37	

a) Avec diagramme contrainte-déformation

Tableau B-2.6: Résultats des essais sur cylindres, (G3)

n°PV	Date	Jours	Résistance à la compression (f_c) [MPa]	Résistance à la traction (f_{ct}) [MPa]	Module d'élasticité (E_c) [GPa]	Masse volumique apparente [t/m ³]
(Fabrication)	31.01.2005	0	0.00	0.00	0.00	-
102/05/LMC	09.05.2005	98	42.50		32.00	2.39
102/05/LMC	09.05.2005	98	41.80		32.50	2.38
102/05/LMC	09.05.2005	98	41.30		31.00	2.37
103/05/LMC	09.05.2005	98		2.70		2.36
103/05/LMC	09.05.2005	98		2.50		2.37
103/05/LMC	09.05.2005	98		2.40		2.38
116/05/LMC	18.05.2005	107		2.80		2.38
116/05/LMC	18.05.2005	107		2.60		2.37
116/05/LMC	18.05.2005	107		2.70		2.37
113/05/LMC	18.05.2005	107	44.10		31.50	2.38
113/05/LMC	18.05.2005	107	43.90		32.50	2.37
113/05/LMC	18.05.2005	107	44.50		31.00	2.37
134/05/LMC	01.06.2005	121		3.00		2.37
134/05/LMC	01.06.2005	121		2.80		2.37
134/05/LMC	01.06.2005	121		2.90		2.38
133/05/LMC	01.06.2005	121	41.40		32.50	2.37
133/05/LMC	01.06.2005	121	42.60		32.00	2.37
133/05/LMC	01.06.2005	121	45.10		32.00	2.38

Les essais de compression et traction des cylindres ont eu lieu au Laboratoire de Matériaux de Construction (LMC) de l'EPFL. Les diagrammes contrainte-déformation lors de l'essai de compression pour 6 cylindres sont montrés à la figure B-2.7 (3 cylindres à 32 jours de la gâchée G1 et 3 cylindres à 36 jours de la gâchée G2). Les déformations ont été mesurées à la surface du cylindre jusqu'à la rupture. La base de mesure était de 100 mm, sur le tiers central de la hauteur du cylindre (figure B-2.8 à gauche). L'essai est contrôlé en déplacement à une vitesse de chargement d'environ 0.2 mm/min.

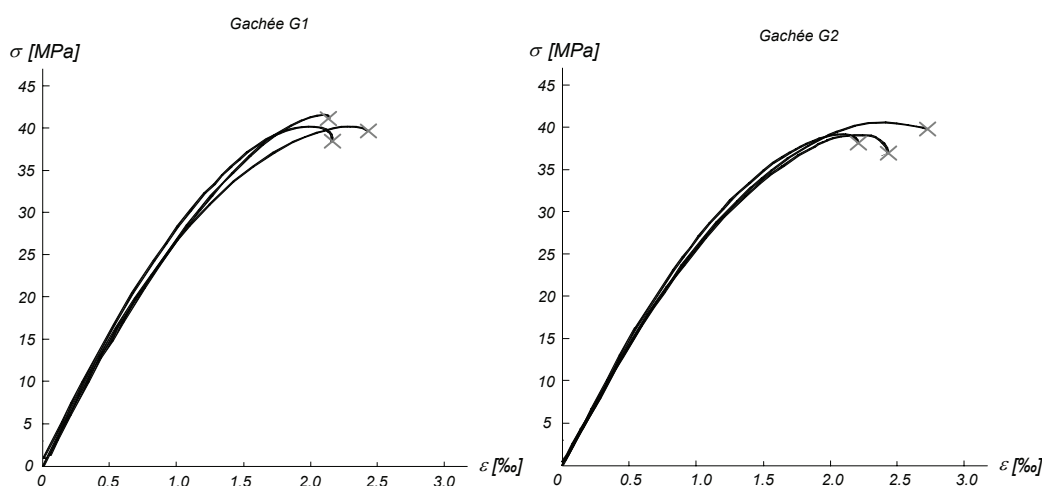


Figure B-2.7: Diagramme contrainte-déformation du béton lors de l'essai de compression, à 32 et 36 jours (G1 et G2, resp.)



Figure B-2.8: Instrumentation de cylindre à la compression (32 jours G1), et dimension maximale de l'agrégat, $d_g=16$ mm

Les essais de traction pure ont été réalisés à l'aide de 2 plaques collées à la surface du béton. La rupture ne s'est jamais produite aux ancrages collés (figure B-2.9)



Figure B-2.9: Essai de traction à 32 jours (G1) et éprouvettes après rupture

Acier

L'acier utilisé pour l'armature est de type B500B selon la norme SIA262. Les caractéristiques mécaniques de l'armature en traction ont été mesurées par des tests. Les essais ont eu lieu au Laboratoire de Métallurgie Mécanique (LMM) de l'EPFL. La vitesse de chargement était de l'ordre de 10 MPa/s. Les tableaux B-2.7 et B-2.8 montrent les résultats des propriétés géométriques et mécaniques en traction des barres.

Tableau B-2.7: Caractéristiques mécaniques des barres d'armature en traction (moyenne et coefficient de variation)

Essai	Diamètre nominal (\emptyset) [mm]	Limite d'écoulement (f_f) [MPa]	Résistance à la traction (f_t) [MPa]	Déformation sous charge maximale (ϵ_u) [%]	f_t / f_y	Type d'acier
SR2 à SR9	16	530* ±3.1%	600 ±0.8%	5.52 ±14.9%	1.13 ±2.4%	Etiré à froid
SR10 à SR12	16	523 ±0.4%	621 ±0.04	10.57 ±1.2%	1.19 ±0.4%	Laminé à chaud

* limite conventionnelle d'élasticité à 0.2%.

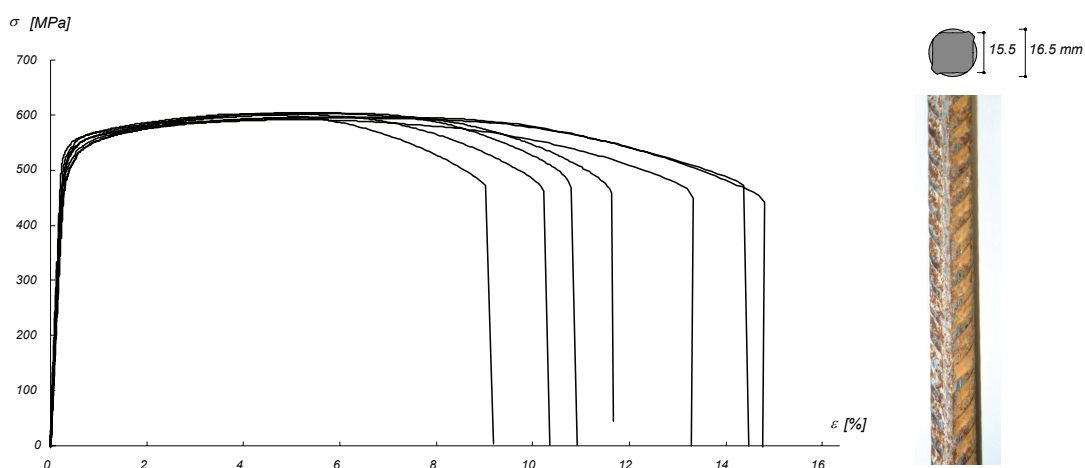


Figure B-2.10: Diagramme contrainte-déformation à la traction (poutres SR2 à SR9)

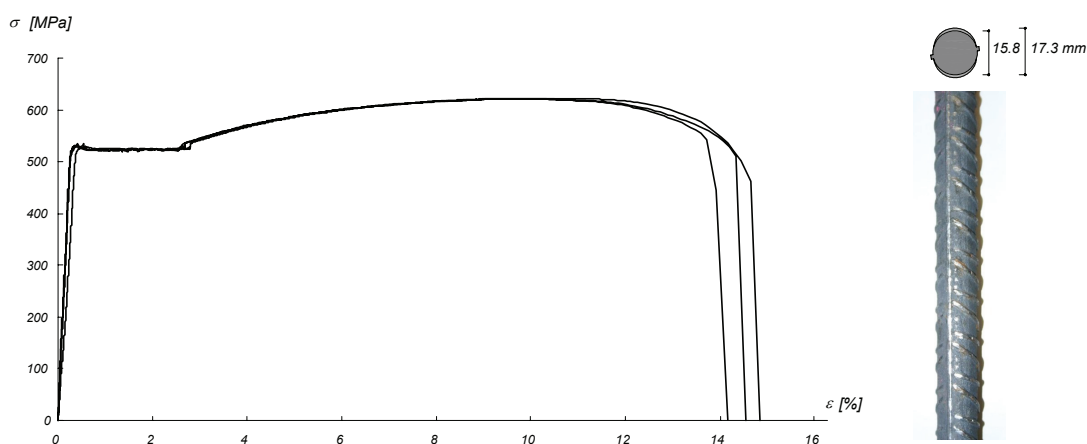


Figure B-2.11: Diagramme contrainte-déformation à la traction (poutres SR10 à SR12)

Les diagrammes contrainte-déformation lors de l'essai de traction sont montrés à la figure B-2.10 et B-2.11 pour les poutres SR2 à SR9 et SR10 à SR12. Les dimensions et la forme des nervures sont illustrées pour chaque type d'acier.

Tableau B-2.8: Résultats d'essais sur barres d'armature

Essai	Diamètre nominal (Ø)	Limite d'écoulement (f _y)	Résistance à la traction (f _t)	Déformation sous charge maximale (ε _u)	f _t / f _y	Distance entre ancrages (ℓ ₀)	Longueur de mesure avec extensomètre
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]		[mm]	[mm]
SR2-9_1	16	539*	603	6.02	1.12	310	150
SR2-9_2	16	548*	602	4.94	1.10	400	150
SR2-9_3	16	545*	601	4.27	1.10	470	150
SR2-9_6	16	540*	605	5.60	1.12	415	150
SR2-9_LM4	16	515*	597	6.82	1.16	~700	200
SR2-9_LM5	16	512*	592	5.18	1.16	~700	200
SR2-9_LM6	16	512*	596	5.81	1.16	~700	200
SR10-12_4	16	521	622	10.71	1.19	755	150
SR10-12_5	16	525	621	10.53	1.18	755	150
SR10-12_6	16	524	622	10.47	1.19	755	150

* limite conventionnelle d'élasticité à 0.2%.

B-3 Banc d'essai et instrumentation

Tous les essais des poutres sans étriers ont été exécutés à la halle 2 de l'Institut des Structures (IS) de l'EPFL.

B-3.1 Banc d'essai

Le banc d'essai est représenté en élévation à la figure B-3.3, en coupe à la figure B-3.2. La figure B-3.1 montre une vue d'ensemble et une image virtuelle du bâti de charge. Les forces concentrées sont appliquées par le biais de 2 vérins similaires d'une capacité de 500 kN chacun. Les vérins sont équipés d'un capteur de force intégré. La force ou la position verticale du piston des 2 vérins peuvent être réglées ou programmées de manière indépendante, permettant ainsi de charger les différentes éprouvettes de manière variable. A l'extrémité inférieure d'un des vérins (n° 2b à la figure B-3.2), un dispositif permettant de d'appliquer des forces de traction a été ajouté. Il s'agit de 2 plaques qui fixent la poutre en béton à l'aide de 6 tiges filetées précontraintes. La possibilité d'imposer une force de traction avec le vérin situé à l'extrémité de la poutre permet de soumettre les éprouvettes à des modes de chargement variés. Le vérin central (n° 2a à la figure B-3.2) travaille uniquement à la compression. Le type de rupture et le degré de plastification de la poutre dépendront ainsi quasi exclusivement du rapport entre les charges des 2 vérins. A l'extrémité inférieure du vérin central, un profilé métallique (n°8 à la figure B-3.2) et une plaque métallique ont été ajoutés de façon à pouvoir utiliser une grande partie de la course disponible (300 mm). La plaque d'introduction des efforts sous le vérin central a une surface de 100 mm dans le sens de l'axe de la poutre x 250 mm. La poutre s'appuie sur 2 appareils d'appui qui permettent la rotation dans le plan défini par les 2 vérins et le déplacement longitudinal. Ces appareils sont constitués de rotules en acier et leurs axes sont écartés de 6 mètres. Les capteurs de force aux appuis (3 capteurs HBM PRE de 300kN chacun) permettent d'avoir une mesure de la force de réaction pendant l'essai. Le déroulement de l'essai se fait en déplacements contrôlés. Ceci limite les variations des déformations mesurées à chaque palier de charge.



a) Vue d'ensemble



b) Image virtuelle

Figure B-3.1: Bâti de charge (image virtuelle créée par Sylvain Demierre)

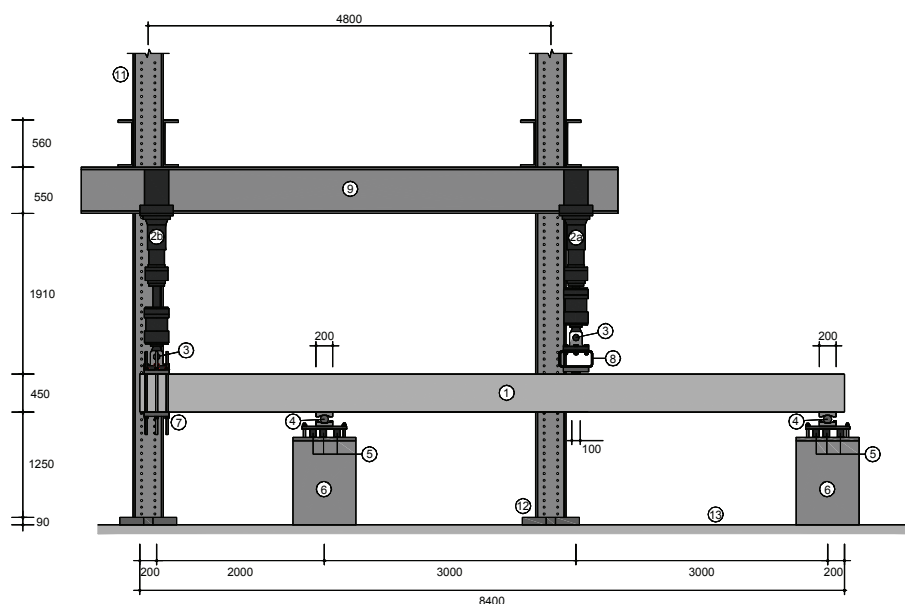


Figure B-3.2: Schéma du bâti de charge (coupe A-A) [mm]

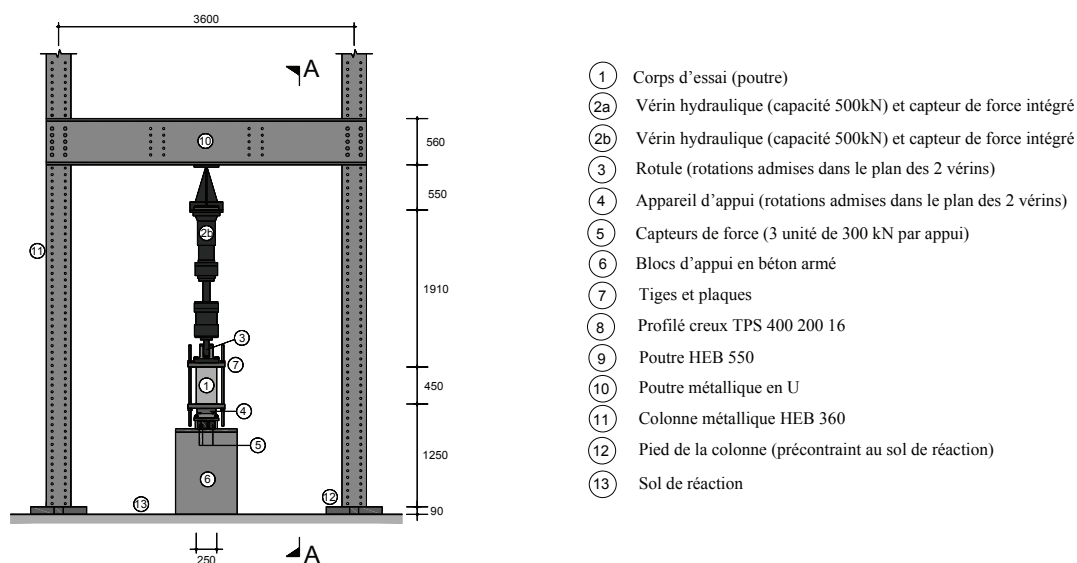


Figure B-3.3: Schéma du bâti de charge (élévation) [mm]

B-3.2 Instrumentation

Mesures manuelles

Les mesures de la déformation dans le plan vertical de l'âme de la poutre ont été prises avec le déformètre, sur une zone située entre la charge à mi-travée (Q_1) et l'appui intermédiaire. Le réseau de mesure était composé de 131 taquets circulaires en aluminium de 10 mm de diamètre, collés à la surface de la poutre et espacés de 120 mm, définissant ainsi 331 mesures avec un angle de 60 degrés entre eux. Le réseau de mesure est dessiné à la figure B-3.5. Un seul appareil avec une longueur de base de 120 mm et

une plage de mesure de $\pm 5\text{mm}$ a été utilisé. Afin de contrôler les éventuelles variations de température pouvant se produire durant l'essai, une barre d'invar de 120 mm de longueur était régulièrement mesurée, chaque 16 mesures, au maximum. Les températures étaient également enregistrées au cours de l'essai. Lorsque les déformations locales devenaient très grandes, comme l'a souvent été le cas pour des paliers proches de la rupture, l'appareil de mesure utilisé n'avait pas une course suffisante pour faire la mesure. Dans ce cas, un autre taquet a été collé à côté d'un des taquets originaux de façon à raccourcir la longueur de mesure. La distance entre le nouveau taquet et l'original a ensuite été mesurée.

Le processus de mesure requiert 2 opérateurs. Le premier réalise activement les mesures avec le déformètre alors que le second contrôle à l'ordinateur l'enregistrement de l'écart-type et de la moyenne des valeurs mesurées à chaque position. La mesure complète de tout le réseau dure environ 45 minutes. A noter que les mesures sont toujours prises par la même personne, de façon à éviter des variations probables introduites par différents opérateurs. La séquence suit la numérotation indiquée à la figure B-3.5. Ainsi, 5 régions de mesure existent (mes. 1 à 69, 70 à 134, 135 à 199, 200 à 264 et 265 à 331). A l'intérieur de chaque région la séquence de mesure a été choisie de façon à minimiser les changements de position (figure B-3.4). A la fin de chaque mesure complète du réseau, la déformée de la zone mesurée est calculée et affichée, ceci afin de remarquer les éventuelles mesures manquantes ou autres anomalies et de les corriger en conséquence.

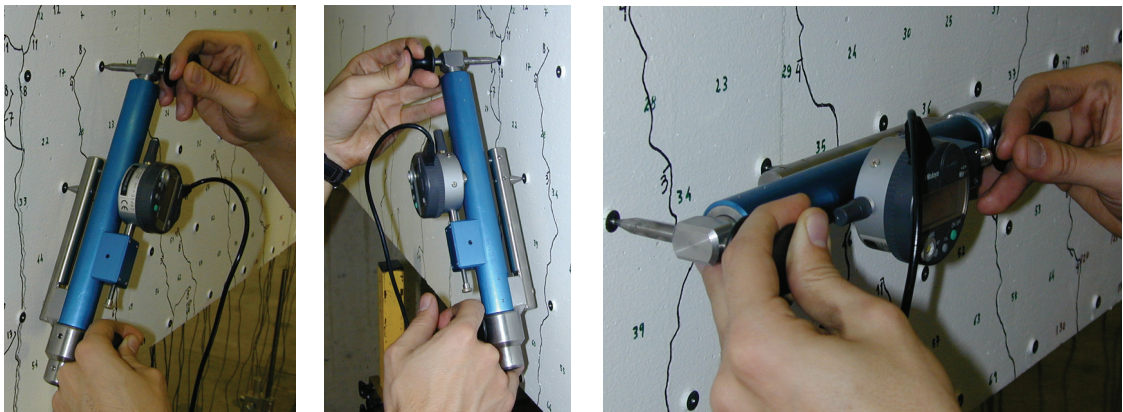


Figure B-3.4: Positions de mesure avec le déformètre

Au cours de l'essai, soit à chaque palier, des ouvertures des fissures ont été systématiquement mesurées en quelques endroits jugés intéressants. En plus, une estimation du glissement entre les 2 lèvres d'une fissure a aussi été réalisée dès que celle-ci était jugée critique.

Des photos à haute résolution ont été prises systématiquement à chaque palier de charge, à gauche de l'appui intermédiaire et à droite du vérin central (force Q_1), du côté du réseau de mesure du déformètre. Ces 2 sections ont été jugées critiques. Les photos permettent une bonne documentation de l'histoire de la fissuration à l'appui et en travée et une éventuelle estimation par photogrammétrie des déplacements à la surface. Les taquets du déformètre ont été peints en noir dans ces zones pour améliorer le contraste avec le fond blanc de la poutre et mieux définir les cibles. Des cibles fixées au sol et indépendantes des déplacements de la poutre ont été disposées et permettent de calibrer les photos pour obtenir les déplacements de la poutre.

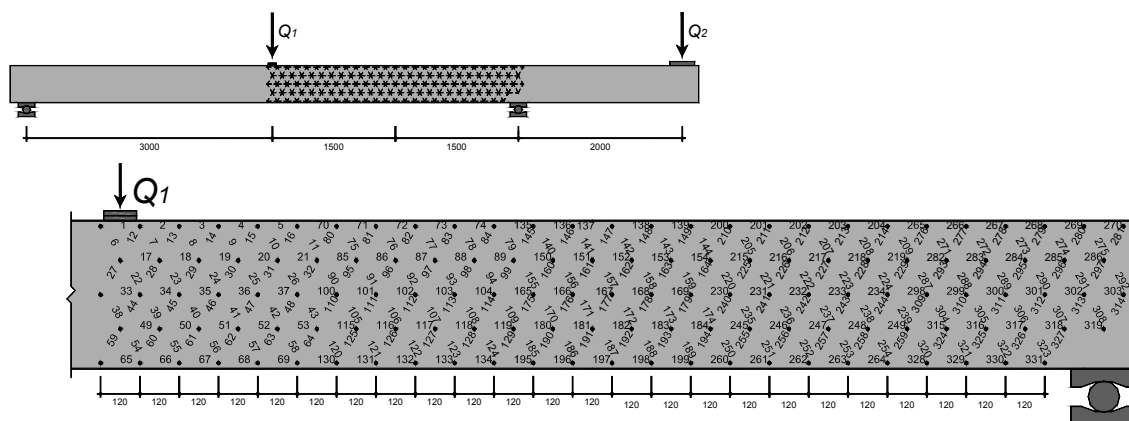


Figure B-3.5: Ordre et numérotation des mesures manuelles (déformètre) [mm]

Mesures en continu

Les mesures en continu sont de 5 types :

- Mesures des forces dans les vérins (Q_1 et Q_2) et des réactions aux appuis
- Mesures des allongements à la surface du béton avec des jauges d'extensiométrie (jauges "oméga"), de différentes longueurs de mesure (fig. B-3.6 et B-3.7)
- Mesures des déplacements verticaux à la surface inférieure de la poutre avec des capteurs inductifs (fig. B-3.8)
- Mesures des rotations de la poutre dans le plan des forces appliquées, avec des inclinomètres (fig. B-3.8)
- Mesures de la température à la surface du béton

Les mesures des forces, des allongements et des déplacements ont été constamment enregistrées automatiquement à l'ordinateur, avec un intervalle d'environ 10 secondes pendant la mise en charge. Durant les paliers, la vitesse de mesure a été diminuée. Pour ces mesures, une unité de mesure de 100 canaux a été utilisée.

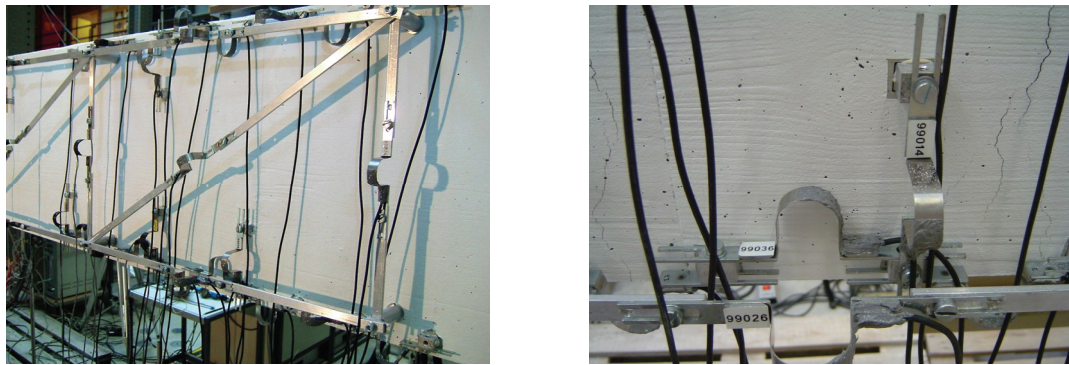
Les jauges "oméga" sont des capteurs constitués d'un support en forme d'oméga au sommet duquel est collé un pont complet de jauges d'extensiométrie qui va mesurer les déformations dudit support. La position des jauges "oméga" utilisées à la surface du béton (jauges isolées et en treillis) est indiquée à la figure B-3.7. L'utilisation d'un treillis en aluminium combiné avec les jauges oméga a permis de mesurer les déformations sur des distances plus grandes. Le tableau B-3.1 résume les numéros des jauges utilisées, leur région de mesure, leur longueur de base utilisée et leur direction de mesure.

Une élévation de la poutre avec la position des inclinomètres et des capteurs inductifs est montrée à la figure B-3.8. Les capteurs inductifs utilisés pour mesurer les déplacements w_0 et w_l étaient des W200 (± 200 mm). Les capteurs inductifs utilisés pour mesurer les autres déplacements étaient des W100 (± 100 mm). La présence des déformations plastiques lors de la formation du mécanisme de rupture a imposé de prévoir des grandes plages de mesure.

La visualisation graphique des mesures à l'écran de l'ordinateur pendant la réalisation de chaque essai a permis une meilleure gestion de l'essai. En particulier, il intéressait de

connaître les valeurs des forces des vérins et leur rapport, afin de pour pouvoir régler efficacement leur position. Le rapport entre les forces (Q_2 / Q_1) ciblé pour chaque essai a ainsi pu être constamment réglé pendant la mise en charge.

Les jauges d'extensiométrie, les capteurs inductifs et les capteurs de force aux appuis ont été étalonnées avant chaque série d'essais. Les capteurs de force aux vérins sont régulièrement étalonnés par l'EMPA.



a) Réseau de mesure

b) Détail

Figure B-3.6: Mesure des allongements à la surface du béton avec des jauges "omega"

Tableau B-3.1: Organisation des mesures avec des jauges "oméga"

Position	Grandeur	N° de voie / mesure	Nombre	Longueur de mesure [mm]
Travée, supérieur	Allongement horizontal	35, 38, 41, 45, 50, 53, 55, 57	8	100
Travée, inférieur	Allongement horizontal	37, 40, 43, 46, 51, 54, 56, 59	8	100
Appui, supérieur	Allongement horizontal	00, 01, 02, 03, 10, 15, 18, 19	8	100
Appui, inférieur	Allongement horizontal	05, 06, 07, 08, 09, 14, 17, 21	8	100
Inférieur	Allongement vertical	16, 22, 25, 31, 42	5	100
Inférieur	Allongement vertical	20, 27, 30, 36, 44, 52	6	100
Treillis, vertical	Allongement vertical	04, 23, 29, 39, 58	5	370
Treillis, supérieur	Allongement horizontal	11, 24, (32, 47)	4	900, (600)
Treillis, inférieur	Allongement horizontal	13, 28, (34, 49)	4	900, (600)
Treillis, diagonal	Allongement diagonal	12, 26, (33, 48)	4	973, (705)

Total : 60

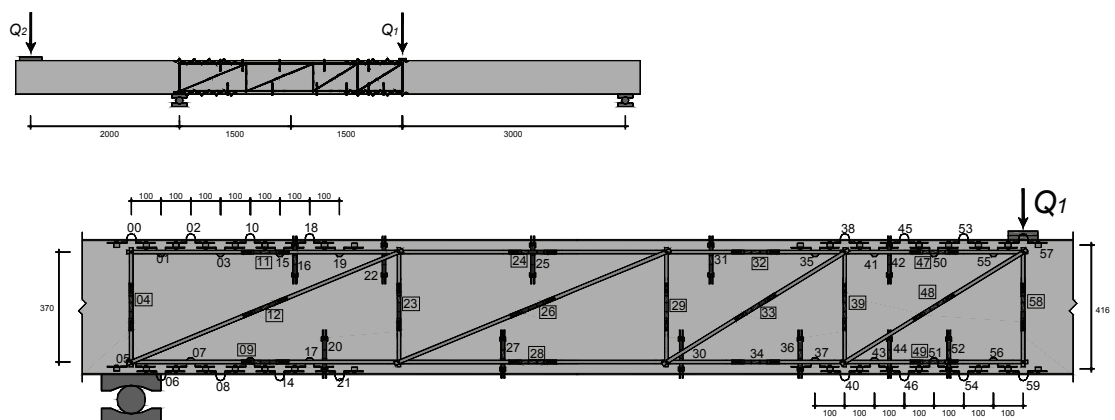


Figure B-3.7: Ordre et numérotation des jauges "oméga" [mm]

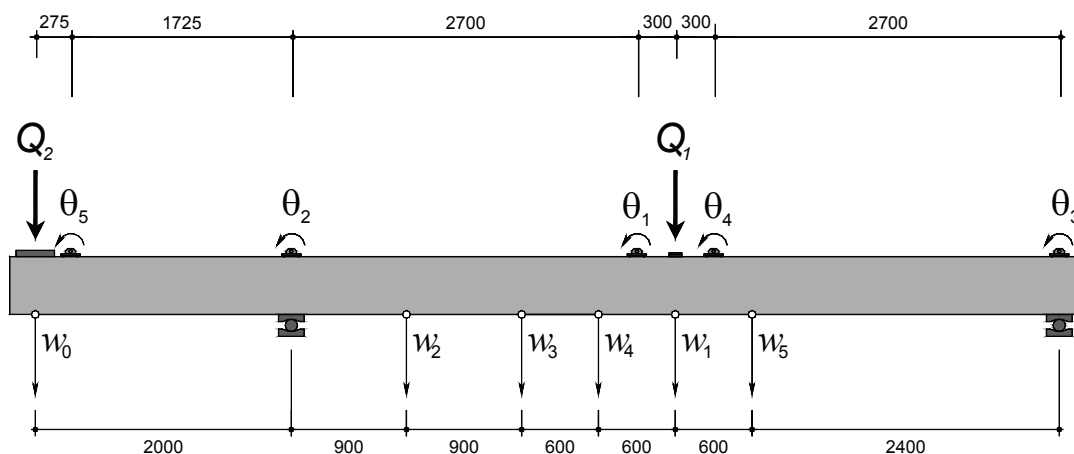


Figure B-3.8: Ordre et numérotation des capteurs inductifs et inclinomètres [mm]

B-3.3 Préparation et déroulement de l'essai

La préparation intégrale d'une poutre pour l'essai a duré environ 7 jours, y compris les travaux suivants (l'ordre n'est pas respecté) : traçage de la poutre, collage des taquets pour les jauges "oméga" et déformètre, perçage des trous pour le support de la structure en aluminium, peinture de l'élément avec de la dispersion blanche, numérotation du réseau de mesure au déformètre, mise de la poutre sur les appuis, montage des jauges d'extensiométrie, des inclinomètres et capteurs inductifs, assemblage des plaques au vérin Q_2 , mise en place des appareils photo, peinture des cibles en noir.

Une fois que toute l'instrumentation est mise en place, un test est mené pour contrôler le bon fonctionnement des jauges "oméga", des capteurs inductifs et de l'enregistrement des données. Une mise à zéro complète des forces, des jauges "oméga" et des capteurs inductifs est ensuite effectuée. Le réseau du déformètre est intégralement mesuré à deux reprises avant que le début de l'essai.

Pendant l'essai, l'ordre des procédures est contrôlé à l'aide d'une liste. Tout événement non prévu est consigné dans le cahier de l'essai. Pour chaque palier, l'ordre des procédures est la suivante: augmenter la fréquence de mesure de l'enregistrement; activer la caméra de vidéo; relever les forces des vérins, l'heure et le déplacement vertical sous vérin Q_1 avant et après la mise en charge ; désactiver la caméra de vidéo; diminuer la fréquence de mesure; mesurer le réseau du déformètre; enregistrer les valeurs des forces et du déplacement vertical à la fin des mesures du réseau; visualiser les mesures faites du réseau pour le palier effectué; dessiner, numéroté et mesurer les ouvertures des fissures; prendre des photos à haute résolution à l'appui et en travée et vérification de l'enregistrement/stockage; photographier autres aspects intéressants. Chaque palier a duré environ une heure à une heure et demi. Tous les essais ont été réalisés sur une durée de 1 à 2 jours. La poutre a été laissée en charge pendant la nuit (en déplacements contrôlés). La rupture a toujours été filmée en vidéo.

B-4 Résultats

B-4.1 Dépouillement des mesures

Forces

Les forces des vérins (Q_1 et Q_2) et des réactions (R_1 et R_2) ont été mesurées pendant l'essai (figure B-4.1). Ceci conduit à une redondance dans les valeurs mesurées qui peut être utile pour corriger les erreurs de mesure éventuelles. En négligeant le moment de torsion, les équations suivantes permettent de corriger des mesures à faire pour les forces et réactions (équations B-4.1 et B-4.2) :

$$Q_i = \tilde{Q}_i + q_i \quad (\text{B-4.1})$$

$$R_i = \tilde{R}_i + r_i, \quad \text{avec } i = 1,2 \quad (\text{B-4.2})$$

Q_i et R_i sont les valeurs des forces et réactions corrigées. Les conditions F_1 et F_2 à introduire sont (équilibre des forces et moments, γ_c est le poids volumique du béton, en kN/m^3) :

$$F_1 = R_1 + R_2 - Q_1 - Q_2 - 0.945 \cdot \gamma_c = 0 \quad (\text{B-4.3})$$

$$F_2 = 4 \cdot R_1 - Q_1 - 2 \cdot R_2 + 4 \cdot Q_2 = 0 \quad (\text{B-4.4})$$

Et la fonction à minimiser, avec la méthode des multiplicateurs de Lagrange est :

$$q_1^2 + q_2^2 + \omega \cdot (r_1^2 + r_2^2) + \lambda_1 \cdot F_1 + \lambda_2 \cdot F_2 = \min, \quad \text{avec } \omega = 0.2. \quad (\text{B-4.5})$$

La solution s'obtient en dérivant B-4.5 par rapport à $q_1, q_2, r_1, r_2, \lambda_1$ et λ_2 . Ceci donne un système de 6 équations à 6 inconnues à résoudre pour chaque mesure des forces et des réactions. Les forces maximales mesurées par chaque capteur aux appuis sont petites par rapport à leur valeur maximale d'étalonnage, ce qui implique une perte de précision. La valeur de ω est la pondération sur les erreurs aux réactions à l'équation B-4.5. La valeur de ω a été choisie 5 fois plus petite que celle choisie pour les erreurs sur les forces (q_i).

Le poids propre n'est pas pris en compte dans les mesures des forces puisque les capteurs de force ont été mis à zéro avant l'essai alors que la poutre était déjà sur les appuis. Le poids volumique du béton γ est donc pris égal à zéro pour la résolution de l'équation B-4.5. Le tableau B-4.1 résume les résultats obtenus pour les corrections des forces (q_1, q_2) et des réactions (r_1, r_2). Les valeurs sont des moyennes des corrections effectuées pour les mesures R_i et Q_i au cours de chaque essai. Les variations moyennes des valeurs non corrigées sont aussi indiquées.

Tableau B-4.1: Correction des forces et réactions (valeur moyenne et variation moyenne)

Essai	r_1 kN	r_2 kN	q_1 kN	q_2 kN
SR2	0.85 4.0%	1.77 2.7%	-0.07 -0.1%	-0.10 -0.4%
SR3	2.11 6.1%	2.08 3.7%	-0.10 -0.1%	-0.10 -0.7%
SR4	0.92 1.6%	1.61 3.7%	-0.06 -0.1%	-0.09 -
SR5	1.67 2.9%	0.71 4.4%	-0.06 -0.1%	-0.02 0.2%
SR6	1.48 5.6%	3.49 3.2%	-0.50 -0.5%	-0.83 -1.6%
SR7	3.47 6.7%	3.12 3.7%	-0.66 -0.5%	-0.60 -3.7%
SR8	1.22 1.8%	0.12 0.0%	-0.13 -0.1%	0.05 -0.7%
SR9	1.27 2.8%	2.06 2.3%	-0.33 -0.3%	-0.46 -1.6%
SR10	1.35 3.3%	-0.80 -2.6%	-0.06 -0.1%	0.30 -4.4%
SR11	0.24 0.8%	1.88 4.2%	-0.21 -0.3%	-0.48 -1.9%
SR12	1.80 4.2%	1.80 2.2%	-0.36 -0.3%	-0.36 -1.6%

La moyenne des corrections en pourcentage à appliquer aux forces Q_i pour tous les essais est inférieure à 1%. Le calcul des efforts et des réactions R_i est fait à partir des valeurs non corrigées des forces des vérins Q_1 et Q_2 . La figure B-4.1 montre le diagramme des efforts tranchants et le diagramme des moments de flexion de la poutre sollicitée par les forces Q_1 et Q_2 . Les équations des courbes correspondantes sont indiquées au tableau B-4.2.

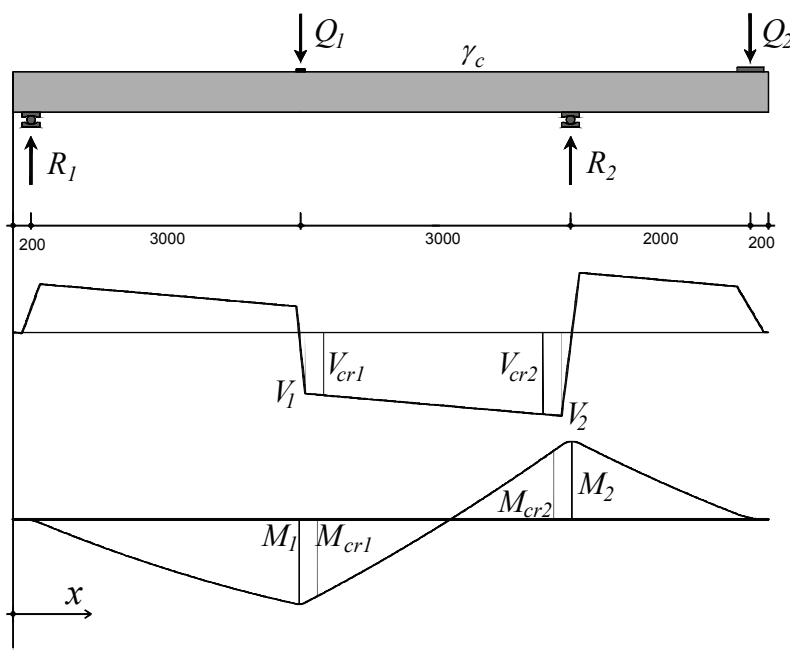


Figure B-4.1: Système statique et diagrammes d'efforts tranchants et des moments de flexion [mm]

Toutes les forces et réactions sont considérées dans le calcul comme étant uniformément réparties sur la longueur d'introduction correspondante. La position de 2 sections critiques selon [Muttoni03] pour la rupture à l'effort tranchant est aussi connue. La section critique se situe à une distance de $0.5 \cdot d$ de l'axe de la force appliquée Q_1 ou de la force de réaction R_2 . La position de la section critique par rapport à l'extrémité gauche de la poutre (fig. B-4.1) vaut respectivement $x = 3.405$ m et $x = 5.996$ m, en travée et en appui.

Tableau B-4.2: Equations des diagrammes des efforts tranchants et moments de flexion dus à Q_1 et Q_2 , $m = Q_2/Q_1$, Q_1 en [kN], x en [m]

Position x [m]	Effort tranchant (V) [kN]	Moment de flexion (M) [kN·m]
0.1 .. 0.3	$(-5/3 \cdot m \cdot x + 1/6 \cdot m + 5/2 \cdot x - 1/4) \cdot Q_1$	$(-5/6 \cdot m \cdot x^2 + 1/6 \cdot m \cdot x - 1/120 \cdot m + 5/4 \cdot x^2 - 1/4 \cdot x + 1/80) \cdot Q_1$
0.3 .. 3.15	$(-1/3 \cdot m + 1/2) \cdot Q_1$	$(1/15 \cdot m - 1/10 - 1/3 \cdot m \cdot x + 1/2 \cdot x) \cdot Q_1$
3.15 .. 3.25	$(-10 \cdot x + 32 - 1/3 \cdot m) \cdot Q_1$	$(-5 \cdot x^2 + 32 \cdot x - 1/3 \cdot m \cdot x + 1/15 \cdot m - 3977/80) \cdot Q_1$
3.25 .. 6.1	$(-1/3 \cdot m - 1/2) \cdot Q_1$	$(1/15 \cdot m + 31/10 - 1/3 \cdot m \cdot x - 1/2 \cdot x) \cdot Q_1$
6.1 .. 6.3	$(20/3 \cdot m \cdot x - 41 \cdot m + 5/2 \cdot x - 63/4) \cdot Q_1$	$(10/3 \cdot m \cdot x^2 - 41 \cdot m \cdot x + 5/4 \cdot x^2 - 63/4 \cdot x + 1241/10 \cdot m + 49.6125) \cdot Q_1$
6.3 .. 8.05	$m \cdot Q_1$	$(\alpha x - 41/5 \cdot m) \cdot Q_1$
8.05 .. 8.35	$(-10/3 \cdot m \cdot x + 167/6 \cdot m) \cdot Q_1$	$(-5/3 \cdot m \cdot x^2 + 167/6 \cdot m \cdot x - 27889/240 \cdot m) \cdot Q_1$

Tableau B-4.3: Equations des diagrammes des efforts tranchants et moments de flexion dus au poids propre, γ en [kN/m³], x en [m]

Position x [m]	Effort tranchant (V) [kN]	Moment de flexion (M) [kN·m]
0 .. 0.1	$(-2.8125 \cdot x)/25 \cdot \gamma$	$(-1.40625 \cdot x^2)/25 \cdot \gamma$
0.1 .. 0.3	$(36.5625 \cdot x - 3.93750)/25 \cdot \gamma$	$(18.28125 \cdot x^2 - 3.9375 \cdot x + 0.196875)/25 \cdot \gamma$
0.3 .. 6.1	$(-2.8125 \cdot x + 7.875)/25 \cdot \gamma$	$(-1.40625 \cdot x^2 + 7.875 \cdot x - 1.575)/25 \cdot \gamma$
6.1 .. 6.3	$(75.9375 \cdot x - 472.5)/25 \cdot \gamma$	$(37.96875 \cdot x^2 - 472.5 \cdot x + 1463.56875)/25 \cdot \gamma$
6.3 .. 8.4	$(-2.8125 \cdot x + 23.625)/25 \cdot \gamma$	$(-1.40625 \cdot x^2 + 23.625 \cdot x - 99.225)/25 \cdot \gamma$

Mesures manuelles au déformètre

Chaque mesure faite à la position i du réseau de mesures au déformètre vaut $\Delta \ell_i$. La correction appliquée $\Delta \ell_{inv,i}$ (équation B-4.6) à chaque mesure permet de supprimer l'effet de la température au cours de l'essai. L'indice i désigne la position de la mesure ($\Delta \ell_i$, $\Delta \ell_{inv,i}$ en mm) :

$$\Delta \ell'_i = \Delta \ell_i - \Delta \ell_{inv,i} \quad \text{avec } i=1, \dots, 331. \quad (B-4.6)$$

Chaque correction appliquée $\Delta \ell_{inv,i}$ est calculée en interpolant linéairement à partir des mesures de la barre d'invar les plus proches dans le temps.

Due à la redondance du réseau de mesure, une minimisation et une correction des erreurs de mesure peuvent être menées. Ceci est fait par le biais de l'analogie du treillis à l'aide d'un calcul automatique. Les valeurs mesurées et déjà corrigées de l'influence de la température ($\Delta \ell'_i$), sont introduites comme des déformations imposées $\varepsilon_{imp,i}$ (équation B-4.7) dans un treillis imaginaire coïncidant avec le réseau de mesure et extérieurement isostatique et dont les longueurs initiales des barres valent 120 mm. Un calcul hyperstatique fournit les valeurs des déformations de chaque barre $\Delta \varepsilon_i$ (équation B-4.8) qui sont utilisées pour corriger les mesures (équation B-4.9). L'écart-

type des corrections appliquées à chaque palier est indiqué au tableau B-4.4. Pour le calcul hyperstatique, la rigidité axiale EA/ℓ est par défaut prise égale à 1 et est identique pour toutes les barres. L'écart-type de chaque mesure a aussi été enregistré et est toujours inférieur à $2 \mu\text{m}$. La déformation axiale finale de chaque barre pour chaque palier p le long de l'essai est donnée à l'équation B-4.10 ($\Delta\ell_i$, $\Delta\ell_{inv,i}$, $\Delta\ell_i'$ et $\Delta\ell_i''$ en mm). L'indice p désigne le numéro du palier :

$$\varepsilon_{imp,i} = \frac{\Delta\ell_i' + 120}{120} \tag{B-4.7}$$

$$\Delta\varepsilon_i = H(\varepsilon_{imp,1}, \dots, \varepsilon_{imp,i}, \dots, \varepsilon_{imp,331}) \tag{B-4.8}$$

$$\Delta\ell_i'' = \Delta\ell_i - \Delta\ell_{inv,i} + \Delta\varepsilon_i \cdot 120 \quad \text{avec } i=1, \dots, 331. \tag{B-4.9}$$

$$\varepsilon_{i,p} = \frac{\Delta\ell_{i,p}'' - \Delta\ell_{i,p=1}''}{120 + \Delta\ell_{i,p=1}''} \tag{B-4.10}$$

Tableau B-4.4: Ecart-type des corrections $\Delta\varepsilon_i \cdot 120$ pour chaque palier de charge

Essai	# 0	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	Ecart-type moyen
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
SR2	6.0	2.5	2.1	2.7	2.2	2.4	2.2					2.9
SR3		2.5	2.3	2.6	2.3	2.1	2.4	2.6	2.6	2.3	3.8	2.6
SR4		4.2	3.6	5.5	3.5	4.3	6.0	3.8	0.0	0.0		3.4
SR5		3.4	2.7	3.1	2.4	3.2	2.6	11.9	3.4	3.9		4.1
SR6	4.3	2.7	2.5	2.4	2.4	2.8	2.8	3.6	2.2	2.5		2.8
SR7	4.4	3.2	3.3	3.0	3.2	3.7	2.7	2.9	3.0			3.3
SR8	4.0	2.6	3.1	3.9	3.4							3.4
SR9	4.0	2.6	3.1	3.9	3.4							3.4
SR10	6.8	3.5	3.5	4.0	3.6							4.3
SR11	6.3	4.7	4.0	3.3	5.2							4.7
SR12	4.1	5.5	3.5	5.3	5.3							4.7

Moyenne de tous les essais 3.6 μm

A chaque $\varepsilon_{i,p}$ calculé correspond un angle θ dans le référentiel indiqué à figure B-4.2 égal à $0, 60$ ou 120° . Les déformations $\varepsilon_{i,p}$ sont ainsi attribuées aux triangles selon leur angle θ et les valeurs de $\varepsilon_0, \varepsilon_{60}$ et ε_{120} sont ainsi définies (fig. B-4.2). Ensuite, le calcul des déformations $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ et des déformations et directions principales $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \theta_I$ et θ_2 se fait une fois par triangle, en admettant un état plan de déformation dans le plan (x,y) et selon les équations B-4.11 à B-4.15.

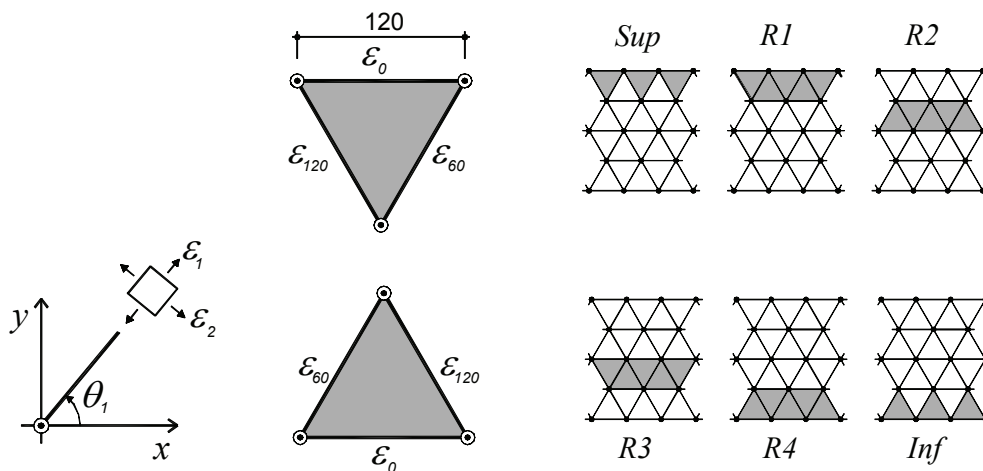


Figure B-4.2: Référentiel avec directions et déformations principales, triangles utilisés pour le calcul des déformations et rangés pour la visualisation des résultats

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 \tag{B-4.11}$$

$$\varepsilon_y = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_{60} + \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_{120} - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_0 \tag{B-4.12}$$

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{yx} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}) \tag{B-4.13}$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \tag{B-4.14}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{(\gamma_{xy}/2)} \qquad \tan \theta_2 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_x}{(\gamma_{xy}/2)} \tag{B-4.15}$$

Les déformations calculées sont représentées graphiquement au centre de gravité des triangles correspondants au calcul.

Les courbures peuvent être calculées à partir des ε_x des rangés *Sup* et *Inf* (fig. B-4.2):

$$\chi = \frac{\varepsilon_x(\text{Sup}) - \varepsilon_x(\text{Inf})}{h_{rel}} \qquad , \text{ avec } h_{rel} = 415.7 \text{ mm} \tag{B-4.16}$$

Le calcul du déplacement relatif entre les 2 lèvres d'une fissure critique [Muttoni91] se fait à chaque fissure jugée critique pour un ensemble de points sur celle-ci. La fissure critique est celle qui provoque la rupture. Pour calculer le déplacement relatif entre 2 points très proches mais situés de part et d'autre de la fissure critique, on procède de la manière suivante: deux champs de déplacements $w(x,y)$ et $w'(x,y)$ sont tout d'abord calculés des deux cotés de la fissure (fig. B-4.3). Le champ de déplacements $w(x,y)$ est calculé à partir des déplacements absolus des points P_1 et P_2 , obtenus auparavant à l'aide d'un calcul informatique (équation B-4.8) en faisant l'hypothèse que la région entre la fissure et une droite définie par P_1 et P_2 est un corps rigide et que l'état de déformation est plan. $w'(x,y)$ est déterminé de façon similaire de l'autre côté de la fissure. Les déplacements absolus des points f et f' sont ensuite calculés à gauche et à droite de la fissure. Le déplacement relatif entre les 2 lèvres de la fissure est la différence entre les déplacements absolus des points f et f' . Une condition importante pour que les hypothèses admises soient admissibles est l'absence d'autres fissures importantes à l'intérieur de la région définie par la droite reliant les points P_1 et P_2 et la fissure critique. Si de telles fissures sont présentes, l'hypothèse d'un corps rigide n'est plus valable.

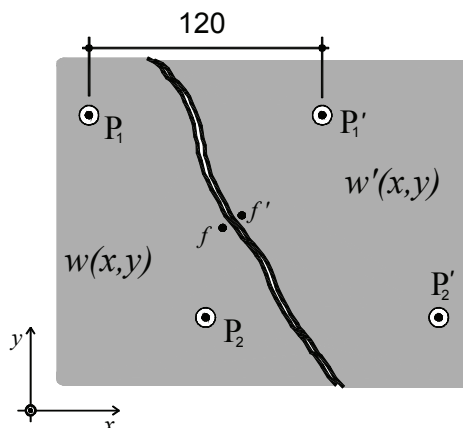


Figure B-4.3: Calcul du déplacement relatif entre les 2 lèvres de la fissure critique [mm]

La forme du champ de déplacements $w(x,y)$ est donné à l'équation B-4.17.

$$w(x, y) = \begin{cases} w_x = a - e \cdot y \\ w_y = b + e \cdot x \end{cases} \quad (\text{B-4.17})$$

Avec a , b et e les inconnues, calculées avec l'équation B-4.18.

$$s = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot c) \quad (\text{B-4.18})$$

$$s = \begin{bmatrix} a \\ b \\ e \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{P_1} \\ 0 & 1 & x_{P_1} \\ 1 & 0 & -y_{P_2} \\ 0 & 1 & x_{P_2} \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} w_{x,P_1} \\ w_{y,P_1} \\ w_{x,P_2} \\ w_{y,P_2} \end{bmatrix}$$

Les coordonnées (x_P, y_P) et les déplacements absolus $(w_{x,P}, w_{y,P})$ des points P_1 et P_2 sont connus dans un référentiel (x,y) (fig. B-4.3). Le déplacement relatif Δu_{rel} du point f relativement au point f' vaut :

$$\Delta u_{rel} = w(x_f, y_f) - w'(x_{f'}, y_{f'}) \quad (\text{B-4.19})$$

Pour les calculs, $x_f = x_{f'}$ et $y_f = y_{f'}$, ont été admis. Les coordonnées du point f sont lues sur la fissure directement à partir des photos (corrigées de la distorsion). Tous les calculs des déformations ont été effectués à l'ordinateur avec un logiciel du type tableur.

Pour chaque poutre, les résultats suivants sont présentés :

- Diagrammes forces-flèche et forces-temps
- Tableau avec l'évolution des forces, moments, efforts tranchants et quelques allongements mesurés pendant les paliers. La contribution du poids propre de la poutre a été mesurée et est prise en compte ($\gamma = 24.8 \text{ kN/m}^3$)
- Diagrammes des moments, des efforts tranchants et la déformée des poutres à chaque palier
- Photos de la région de rupture, avant et après la rupture

- Diagrammes du déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures critiques (selon l'équation B-4.19), mesure des déformations longitudinales à la zone tendue et zone comprimée (avec des jauges "oméga") et tableau avec les mesures de l'ouverture des fissures à l'œil nu (ouvertures et glissement)
- Dessin avec les déformations principales de compression et traction pour des paliers choisis et avec le dessin des fissures en arrière plan

B-4.2 Poutre SR2

La poutre SR2 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 ciblé de +0.5. La rupture observée a été une rupture à l'effort tranchant très fragile (fig. B-4.6), dans la région proche de l'appui intermédiaire avec des ouvertures des fissures très petites. L'ouverture des fissures estimées au palier précédent la rupture est de l'ordre de 0.3 mm (voir figure B-4.7).

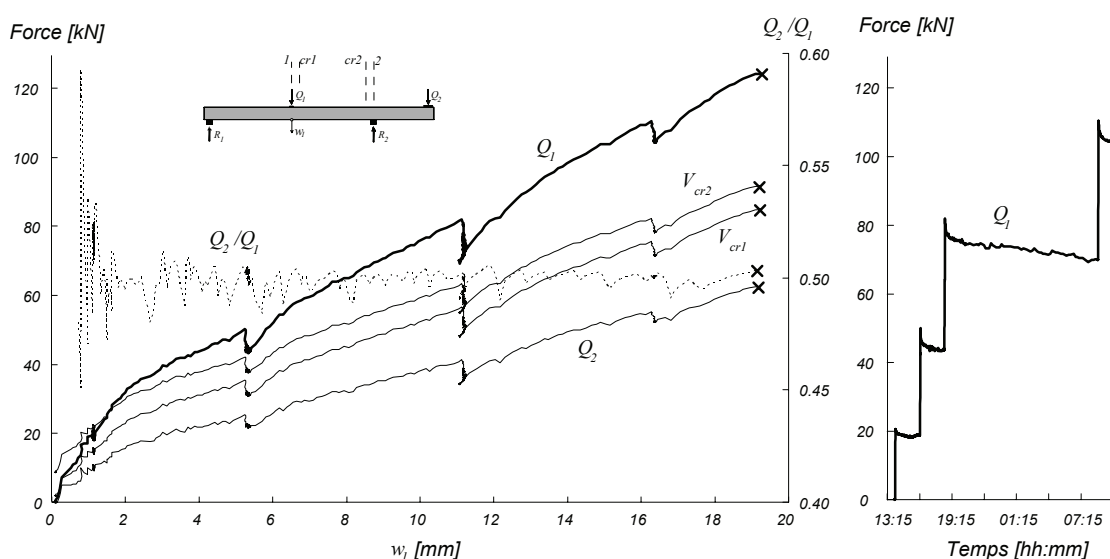


Figure B-4.4: Poutre SR2 : Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.5: Poutre SR2: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{11}	Ω_{00}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.	
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*	
#2	20.3	10.6	0.52	28.8	26.0	-26.9	-23.2	-14.9	-15.4	-22.9	-22.6	0.02	0.01	1.12	0.66	16%	DP	
	18.8	9.72	0.52	27.5	24.8	-25.2	-21.7	-13.9	-14.3	-21.9	-21.6						15%	FD
	19.3	10.1	0.52	27.8	25.1	-26.1	-22.5	-14.3	-14.7	-22.3	-22.0	0.01	0.01	1.17	0.64	16%	FP	
#3	50.2	25.4	0.51	58.4	51.9	-55.7	-48.8	-34.8	-35.2	-42.8	-42.5	0.09	0.20	5.23	2.33	40%	DP	
	43.9	22.18	0.51	52.2	46.5	-49.4	-43.2	-30.6	-31.0	-38.5	-38.2						35%	FD
	44.0	21.9	0.50	52.7	47.0	-49.0	-42.8	-30.6	-31.0	-38.5	-38.2	0.11	0.20	5.39	2.40	35%	FP	
#4	82.0	41.2	0.50	89.9	79.5	-86.3	-76.0	-56.0	-56.4	-63.9	-63.6	0.43	0.35	11.14	5.10	66%	DP	
	76.3	38.33	0.50	84.3	74.6	-80.8	-71.1	-52.2	-52.6	-60.1	-59.8						61%	FD
	74.7	37.1	0.50	83.3	73.7	-78.3	-68.8	-51.0	-51.4	-58.9	-58.6	0.43	0.34	11.18	5.06	60%	FP	
#5	70.6	34.9	0.49	79.2	70.2	-74.1	-65.1	-48.2	-48.6	-56.1	-55.8	0.44	0.34	11.11	5.10	57%	DP	
	70.5	34.83	0.49	79.2	70.2	-74.0	-64.9	-48.1	-48.5	-56.1	-55.8						57%	FD
	69.8	34.3	0.49	78.8	69.9	-72.9	-63.9	-47.6	-48.0	-55.6	-55.3	0.42	0.34	11.07	5.05	56%	FP	
#6	110.6	55.3	0.50	118.3	104.3	-113.8	-100.4	-75.0	-75.4	-82.9	-82.6	0.74	0.51	16.27	7.95	89%	DP	
	105.6	53.07	0.50	113.1	99.8	-109.4	-96.6	-71.7	-72.2	-79.7	-79.4						85%	FD
	104.5	52.3	0.50	112.3	99.0	-108.0	-95.3	-70.9	-71.4	-78.9	-78.6	0.72	0.51	16.40	8.07	84%	FP	
	124.2	62.5	0.50	131.4	115.7	-127.7	-112.9	-84.2	-84.6	-92.1	-91.8	0.86	0.61	19.10	9.42	100%	CM	
	124.1	62.4	0.50	131.4	115.7	-127.5	-112.7	-84.1	-84.5	-92.1	-91.8	0.86	0.61	19.21	9.52	100%	CR	

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

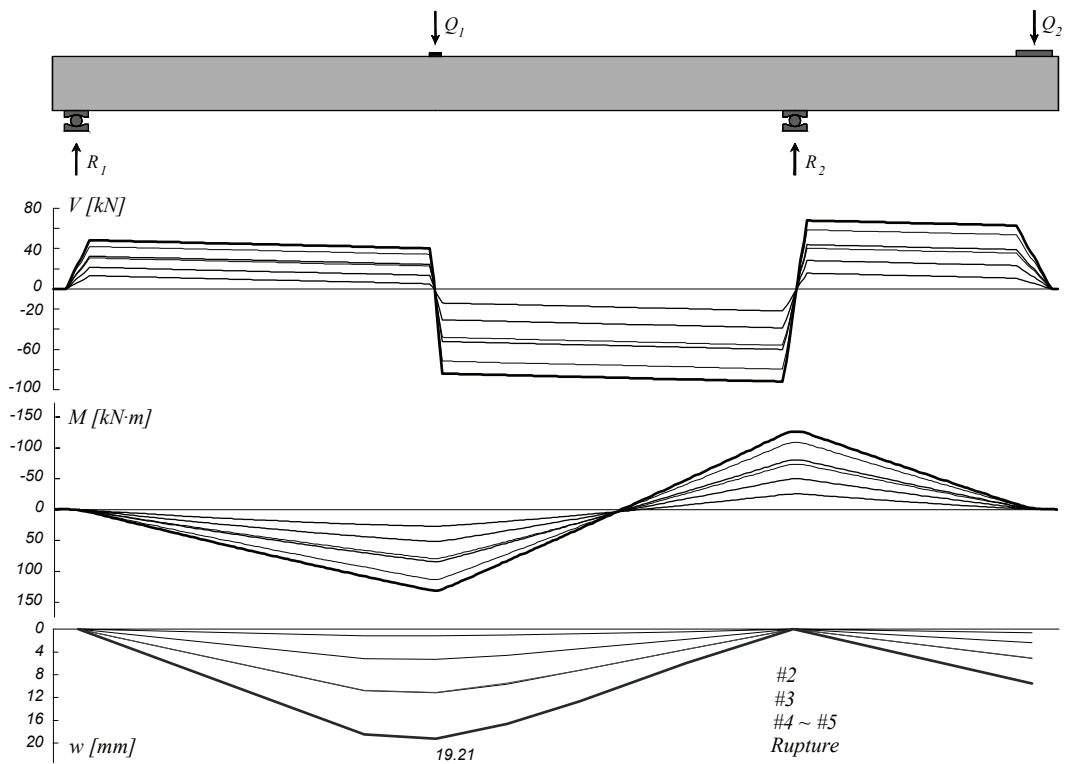


Figure B-4.5: Poutre SR2: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

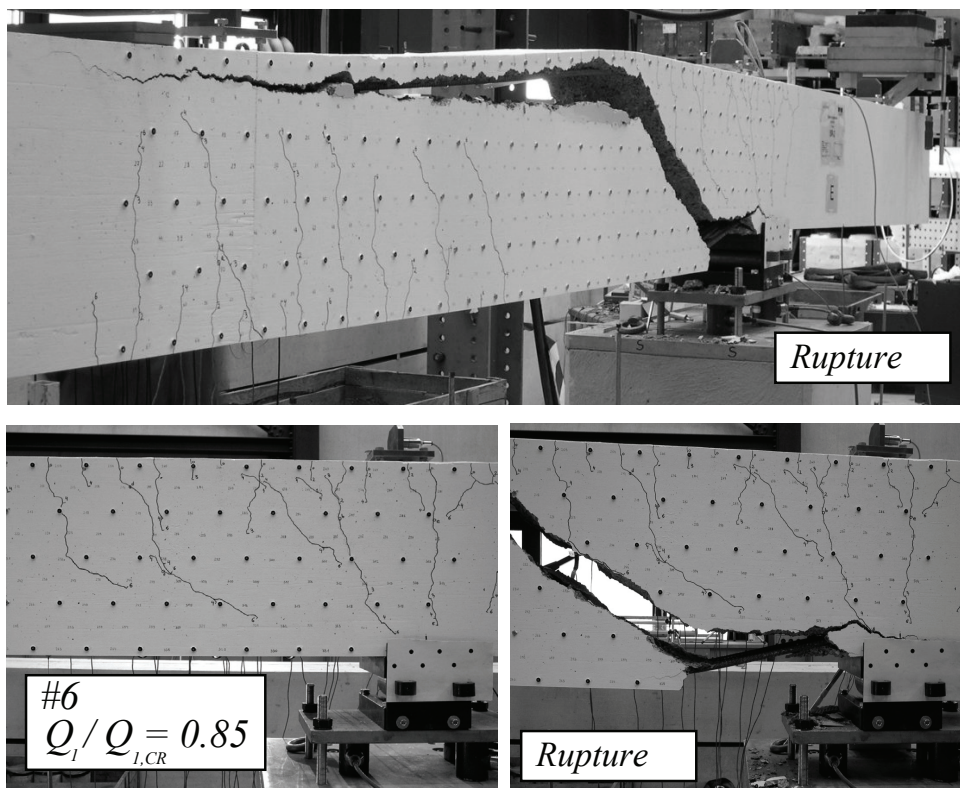


Figure B-4.6: Poutre SR2: Rupture à l'effort tranchant

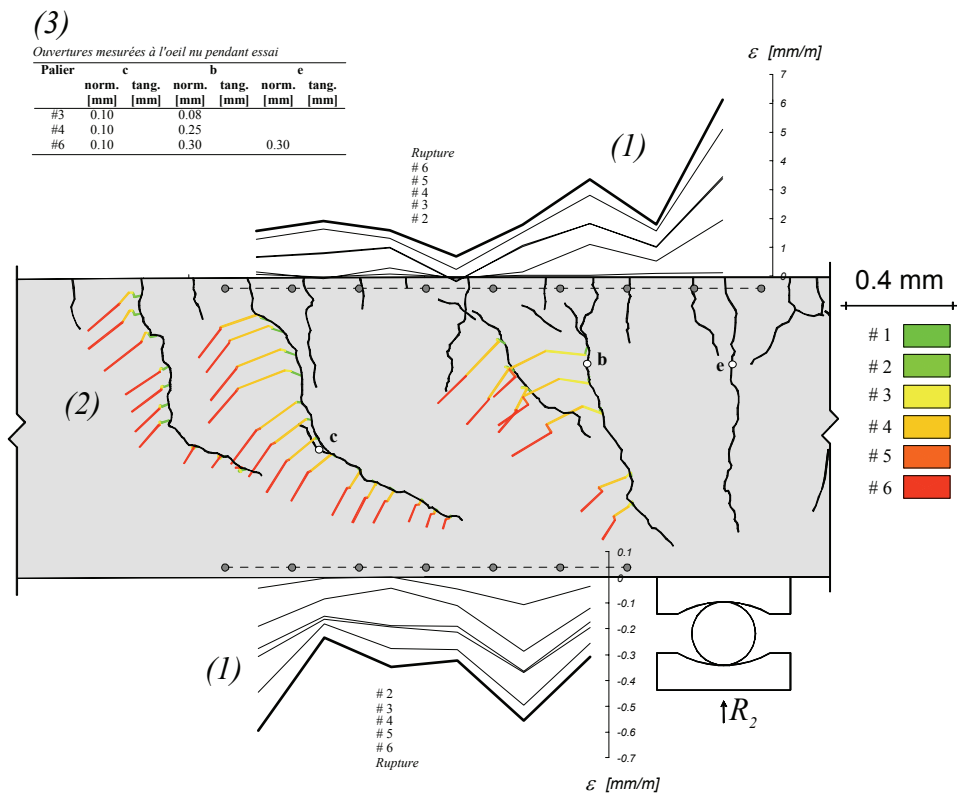
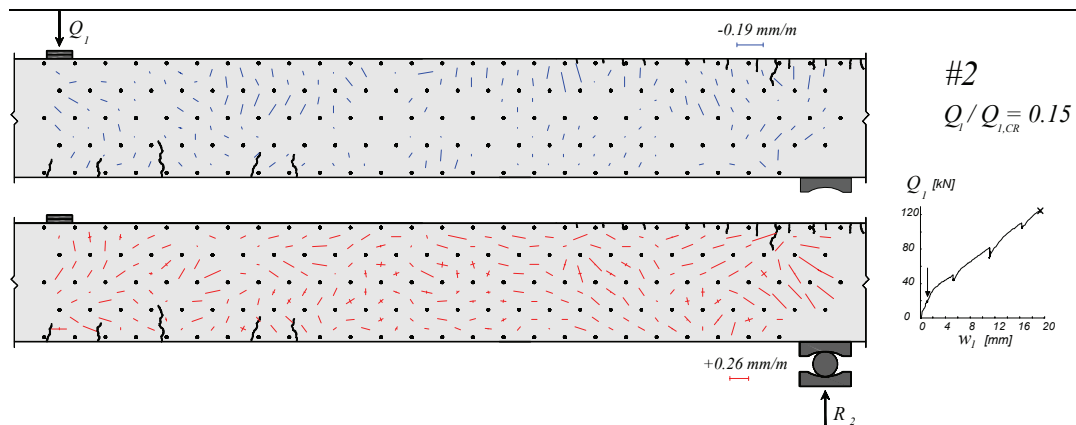


Figure B-4.7: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

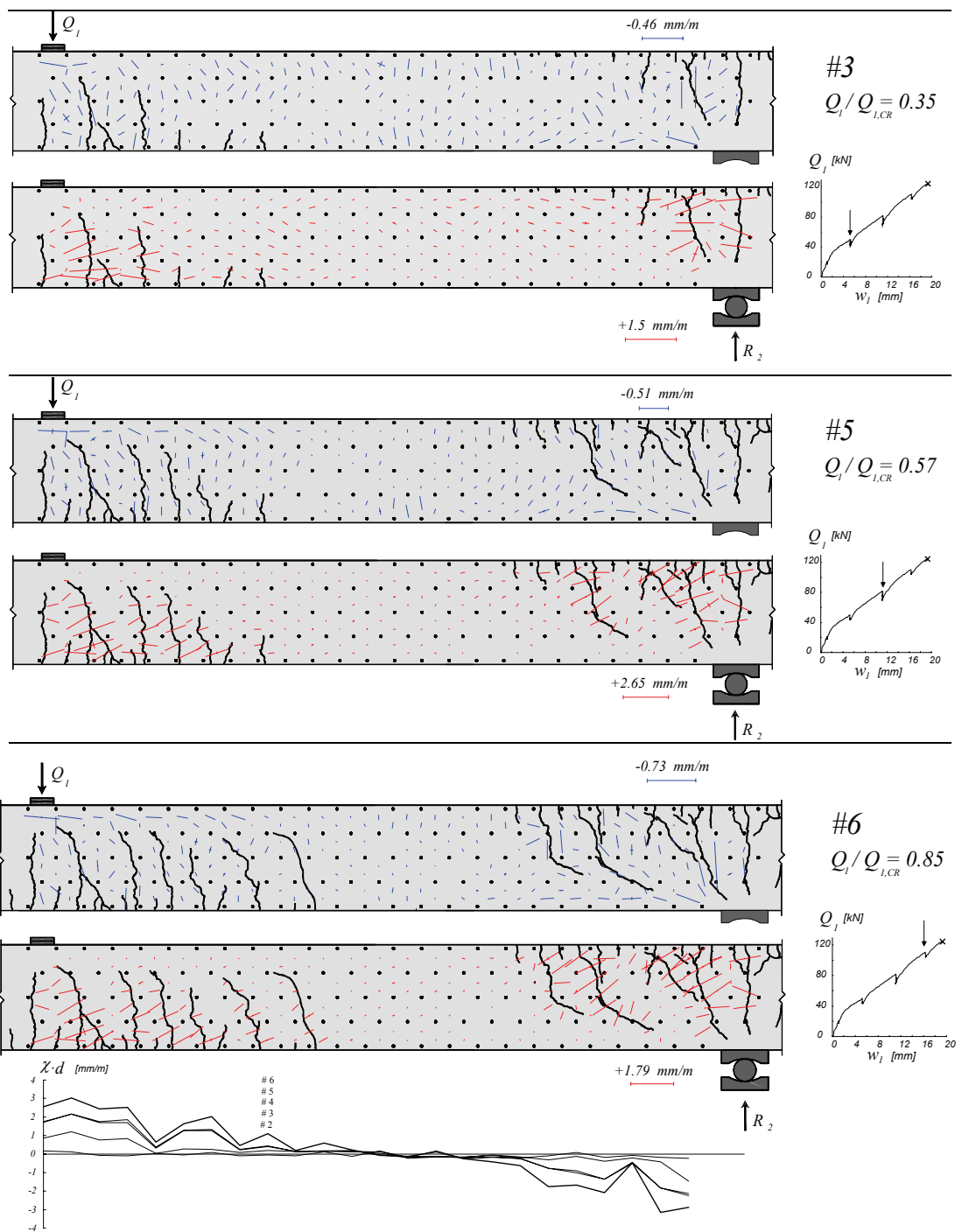


Figure B-4.8: Poutre SR2: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.3 Poutre SR3

La poutre SR3 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de + 0.2. La rupture est caractérisée par une rupture à l'effort tranchant localisée en travée en présence de déformations plastiques importantes de l'armature de flexion (voir figure B-4.12). Une ouverture et un glissement très importants au droit de la fissure critique ont été observées lors du dernier palier (#10), figure B-4.11.

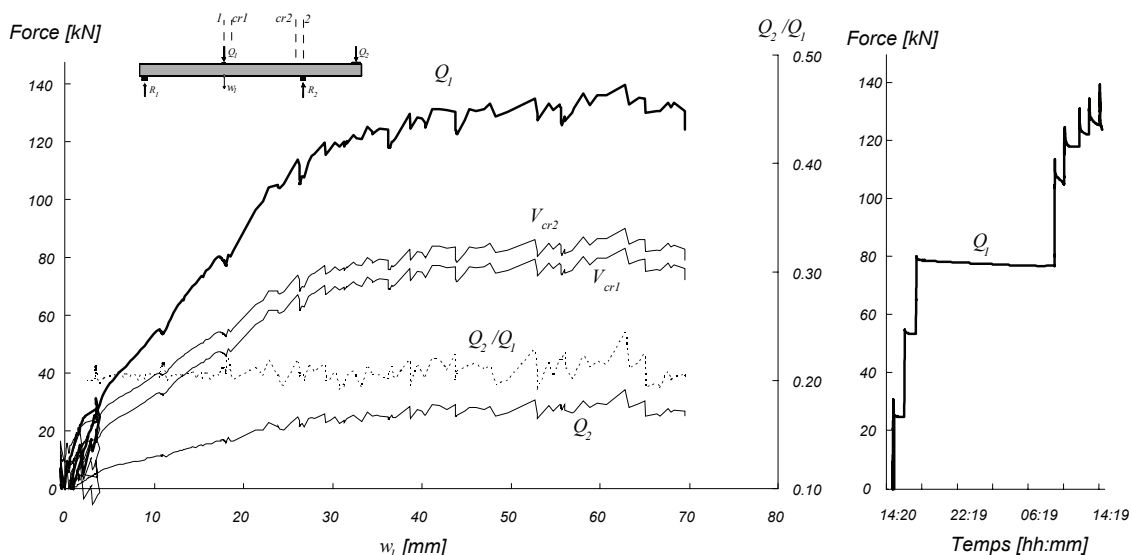


Figure B-4.9: Poutre SR3: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.6: Poutre SR3: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,C}$	Rem.
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*
#2	25.2	5.0	0.20	41.6	38.7	-16.0	-12.0	-15.5	-16.0	-23.5	-23.2	0.22	0.07	3.32	-2.01	19%	DP
	24.9	5.16	0.21	41.0	38.1	-16.2	-12.3	-15.4	-15.9	-23.4	-23.1					19%	FD
	24.9	5.3	0.21	40.8	38.0	-16.5	-12.6	-15.5	-15.9	-23.4	-23.1	0.23	0.07	3.42	-2.10	19%	FP
#3	55.1	11.2	0.20	79.9	73.9	-27.6	-20.8	-32.5	-32.9	-40.5	-40.2	0.92	0.20	10.59	-6.97	42%	DP
	53.6	11.54	0.22	77.4	71.5	-28.4	-21.7	-31.9	-32.3	-39.9	-39.6					41%	FD
	53.5	11.6	0.22	77.2	71.3	-28.4	-21.7	-31.9	-32.3	-39.8	-39.5	0.95	0.20	11.01	-7.10	41%	FP
#4	80.3	16.5	0.21	112.1	103.4	-37.8	-28.6	-46.9	-47.3	-54.9	-54.6	1.37	0.29	17.32	-11.38	61%	DP
	78.9	16.66	0.21	109.9	101.4	-38.1	-29.0	-46.3	-46.7	-54.2	-53.9					60%	FD
	78.8	16.7	0.21	109.7	101.2	-38.1	-29.0	-46.2	-46.6	-54.2	-53.9	1.40	0.29	17.82	-11.41	60%	FP
#5	77.1	15.9	0.21	107.9	99.6	-36.7	-27.8	-45.1	-45.6	-53.1	-52.8	1.42	0.29	18.03	-11.53	59%	DP
	77.2	15.95	0.21	108.0	99.7	-36.8	-27.8	-45.2	-45.6	-53.1	-52.8					59%	FD
	77.3	16.0	0.21	108.1	99.8	-36.9	-27.9	-45.2	-45.7	-53.2	-52.9	1.42	0.30	18.04	-11.48	59%	FP
#6	111.8	23.4	0.21	152.1	140.2	-51.0	-38.6	-65.0	-65.4	-72.9	-72.6	1.94	0.46	26.28	-16.00	85%	DP
	106.7	21.99	0.21	145.9	134.5	-48.3	-36.4	-61.9	-62.4	-69.9	-69.6					81%	FD
	105.4	21.5	0.20	144.4	133.2	-47.3	-35.6	-61.1	-61.5	-69.1	-68.8	1.95	0.46	26.32	-15.96	80%	FP
#7	121.4	24.5	0.20	165.2	152.3	-53.1	-39.9	-70.1	-70.6	-78.1	-77.8	3.01	0.90	36.25	-22.16	92%	DP
	118.2	24.0	0.20	161.0	148.5	-52.0	-39.1	-68.3	-68.8	-76.3	-76.0					90%	FD
	118.2	24.5	0.21	160.4	147.8	-53.2	-40.2	-68.5	-69.0	-76.5	-76.2	3.02	0.91	36.40	-22.10	90%	FP
#8	126.1	25.3	0.20	171.4	158.1	-54.6	-40.9	-72.7	-73.2	-80.7	-80.4	3.86	1.23	43.77	-26.82	96%	DP
	122.66	25.36	0.21	166.2	153.2	-54.7	-41.3	-71.0	-71.5	-79.0	-78.7					93%	FD
	122.6	25.6	0.21	166.0	152.9	-55.1	-41.7	-71.1	-71.5	-79.0	-78.7	3.91	1.25	44.01	-26.77	93%	FP
#9	131.2	28.7	0.22	175.6	161.6	-61.3	-47.0	-76.5	-76.9	-84.4	-84.1	4.86	1.74	55.57	-33.52	100%	DP=C
	126.38	27.69	0.22	169.5	155.9	-59.2	-45.4	-73.7	-74.1	-81.6	-81.3					96%	FD
	125.7	27.6	0.22	168.6	155.2	-59.0	-45.3	-73.3	-73.7	-81.3	-81.0	4.89	1.76	55.68	-33.47	96%	FP
#10	128.7	26.4	0.21	174.1	160.5	-56.7	-42.7	-74.4	-74.8	-82.3	-82.0	4.46	1.97	69.52	-41.42	98%	DP
#10	124.06	25.26	0.20	168.4	155.3	-54.5	-41.0	-71.7	-72.1	-79.7	-79.4					95%	FD

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale

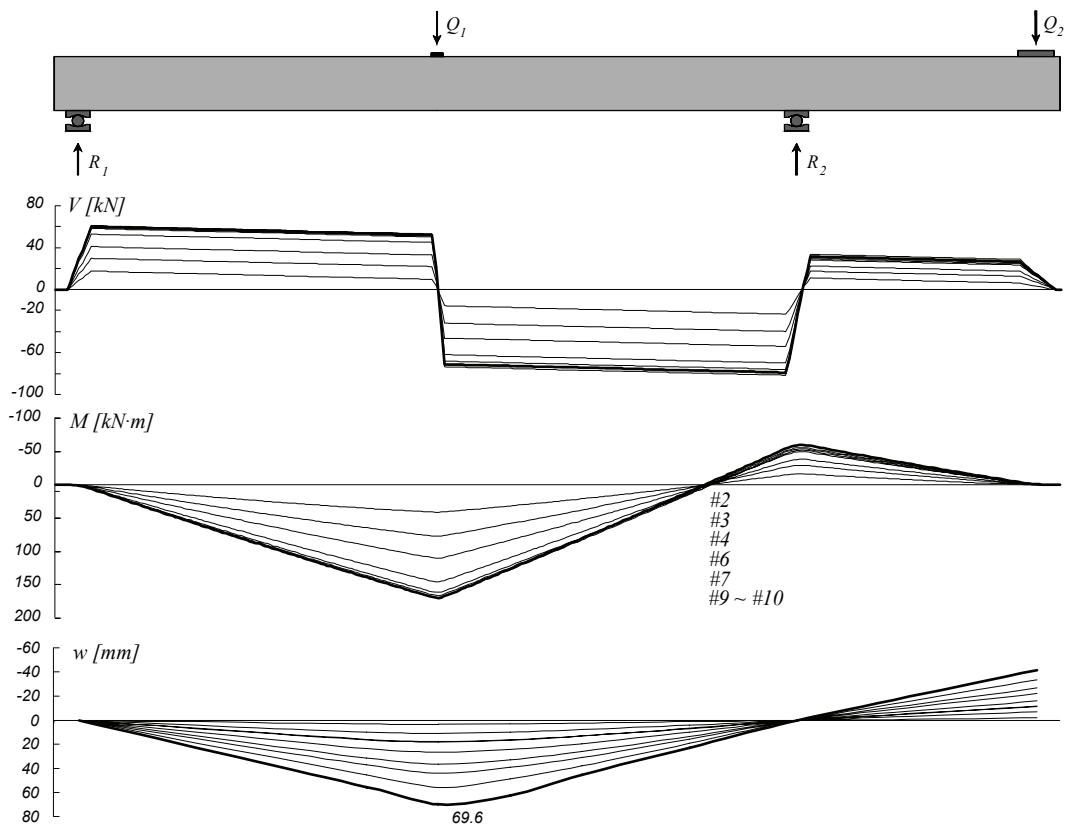


Figure B-4.10: Poutre SR3: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

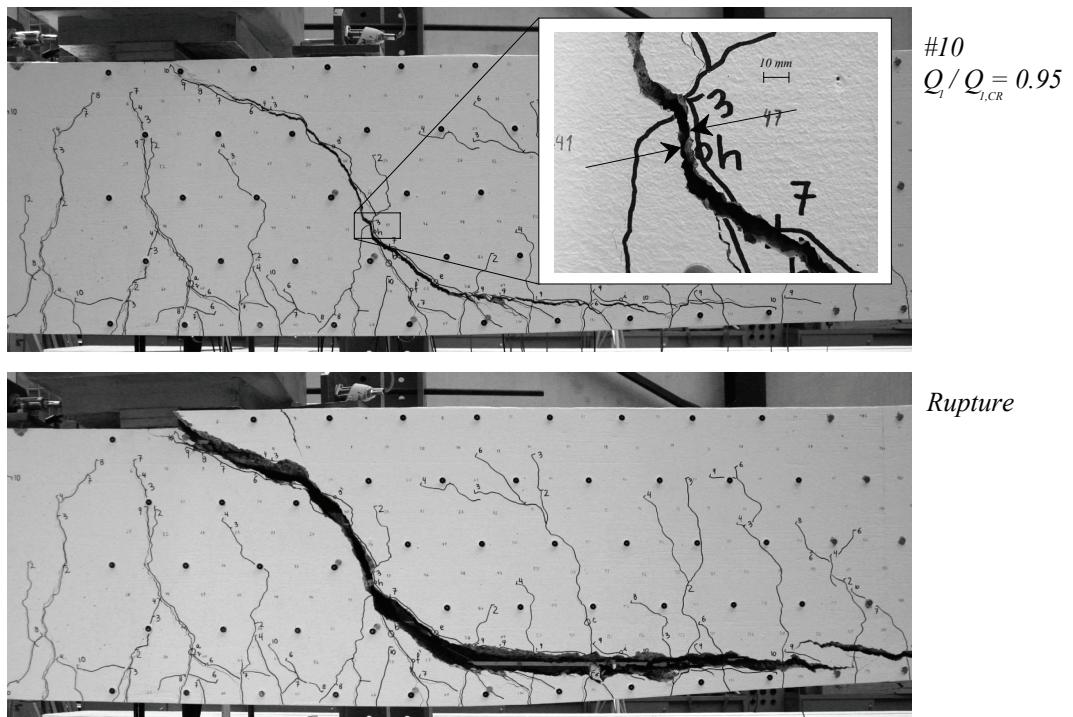


Figure B-4.11: Poutre SR3: Fissuration avant rupture en travée (palier 10) et après rupture

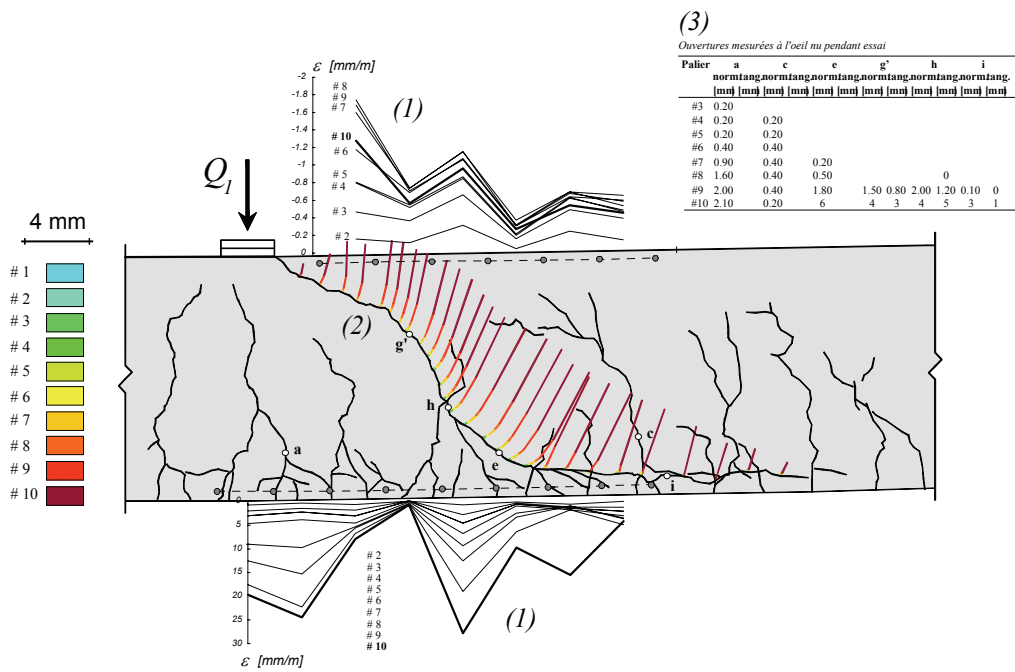
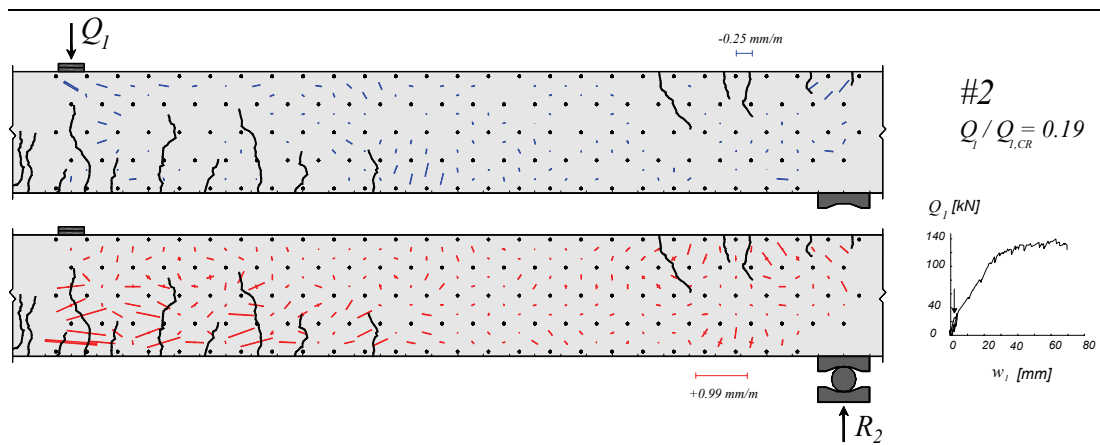


Figure B-4.12: Poutre SR3: (1) Déformations mesurées avec les jauges "oméga" ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

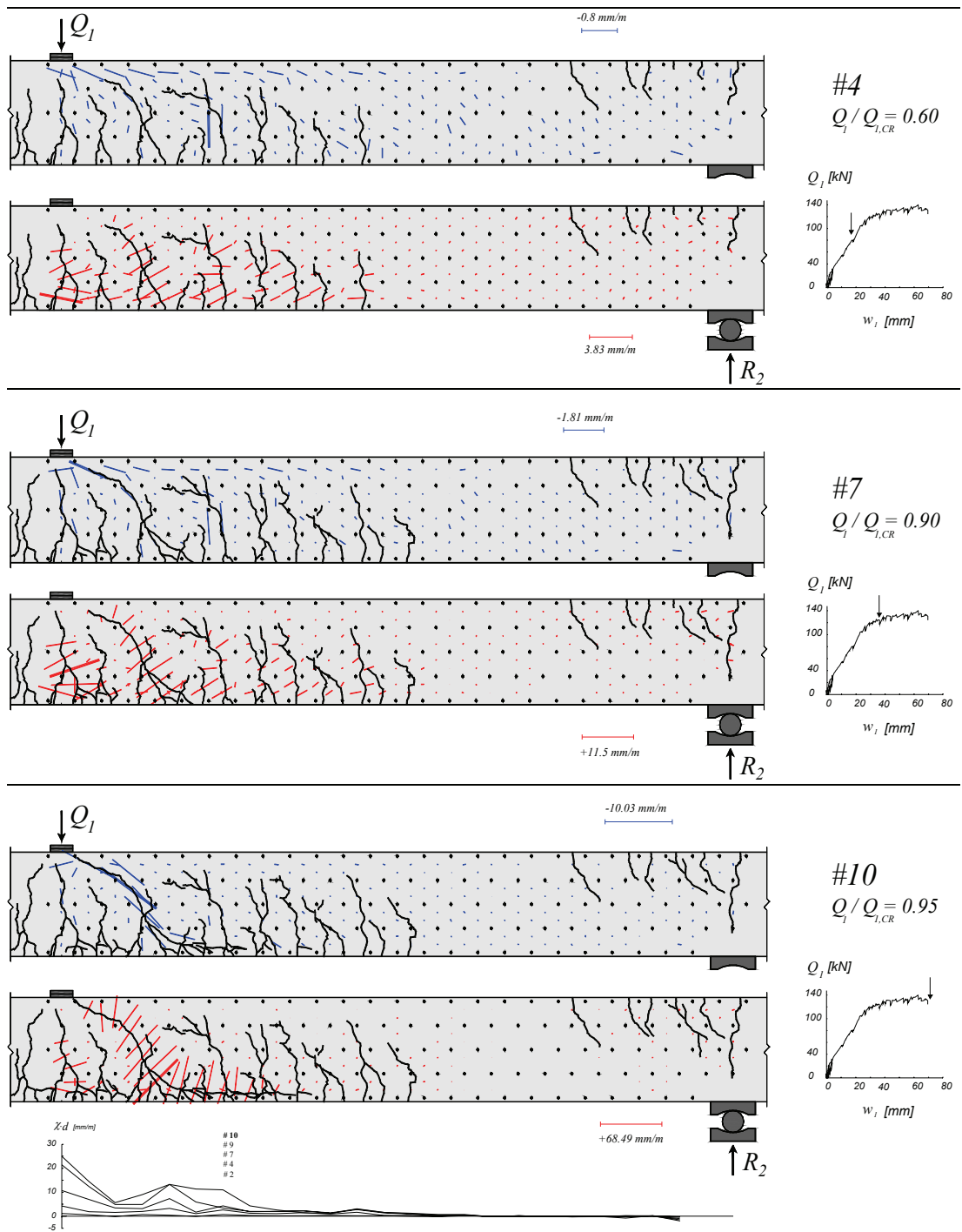


Figure B-4.13: Poutre SR3: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.4 Poutre SR4

La poutre SR4 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de zéro. La rupture par effort tranchant a été observée en travée en présence des déformations plastiques importantes de l'armature de flexion (voir figure B-4.17).

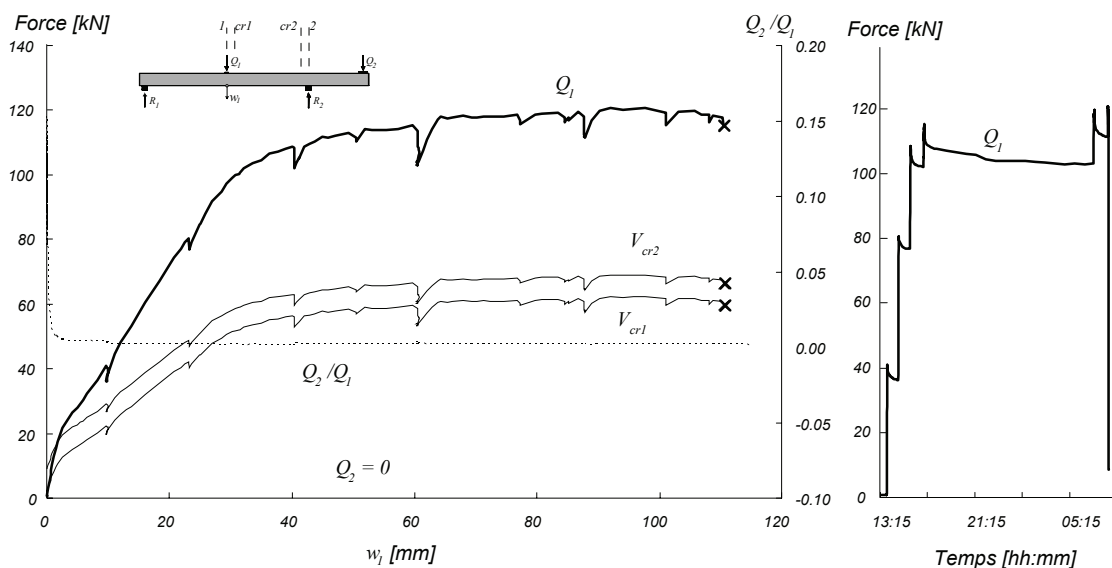


Figure B-4.14: Poutre SR4 : Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.7: Poutre SR4: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,c}$	Rem.
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*
#2	40.0	0.0	0.00	68.6	64.8	-5.9	-0.8	-21.2	-21.7	-29.2	-28.9	0.44	0.11	9.90	-7.49	35%	DP
	36.4	0.0	0.00	63.4	59.8	-5.9	-1.1	-19.5	-19.9	-27.4	-27.1					32%	FD
	36.3	0.0	0.00	63.1	59.5	-5.9	-1.2	-19.4	-19.8	-27.3	-27.0	0.42	0.10	9.72	-7.41	31%	FP
#3	79.9	0.0	0.00	128.0	120.5	-5.4	3.3	-41.2	-41.6	-49.1	-48.9	0.96	0.16	23.15	-18.64	69%	DP
	76.9	0.0	0.00	123.6	116.4	-5.4	3.0	-39.7	-40.2	-47.7	-47.4					67%	FD
	76.8	0.0	0.00	123.4	116.2	-5.4	3.0	-39.6	-40.1	-47.6	-47.3	0.96	0.16	23.25	-18.80	67%	FP
#4	107.0	0.0	0.00	168.2	158.4	-5.0	6.1	-54.7	-55.2	-62.7	-62.4	2.31	0.64	40.32	-31.37	93%	DP
	102.4	0.0	0.00	161.5	152.0	-5.1	5.6	-52.5	-52.9	-60.4	-60.1					89%	FD
	102.1	0.0	0.00	161.0	151.5	-5.1	5.6	-52.3	-52.7	-60.2	-59.9	2.34	0.66	40.39	-31.36	89%	FP
#5	111.6	0.0	0.00	175.2	164.9	-5.0	6.5	-57.1	-57.5	-65.0	-64.7	3.92	1.65	60.51	-43.95	97%	DP
	107.7	0.0	0.00	169.4	159.4	-5.0	6.1	-55.1	-55.6	-63.1	-62.8					94%	FD
	107.7	0.0	0.00	169.4	159.4	-5.0	6.1	-55.1	-55.6	-63.1	-62.8	3.92	1.67	60.68	-43.93	94%	FP
#6	103.0	0.0	0.00	162.4	152.9	-5.1	5.7	-52.8	-53.2	-60.7	-60.4	3.89	1.67	60.41	-43.62	89%	DP
	103.1	0.0	0.00	162.5	153.0	-5.1	5.7	-52.8	-53.2	-60.8	-60.5					90%	FD
	103.1	0.0	0.00	162.5	153.0	-5.1	5.7	-52.8	-53.2	-60.8	-60.5	3.89	1.67	60.44	-43.64	90%	FP
#7	116.2	0.0	0.00	182.0	171.3	-4.9	7.0	-59.4	-59.8	-67.3	-67.0	6.49	1.95	87.72	-60.73	101%	DP
	111.9	0.0	0.00	175.6	165.2	-5.0	6.6	-57.2	-57.6	-65.1	-64.9					97%	FD
	111.4	0.0	0.00	174.8	164.5	-5.0	6.5	-56.9	-57.4	-64.9	-64.6	6.47	1.96	87.82	-60.59	97%	FP
CM	120.8	0.0	0.00	188.8	177.7	-4.9	7.5	-61.6	-62.1	-69.6	-69.3	4.81	2.54	97.70	-66.78	105%	CM
CR	115.20	0.0	0.00	180.5	169.9	-4.9	6.9	-58.9	-59.3	-66.8	-66.5	2.82	3.09	110.43	-73.44	100%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

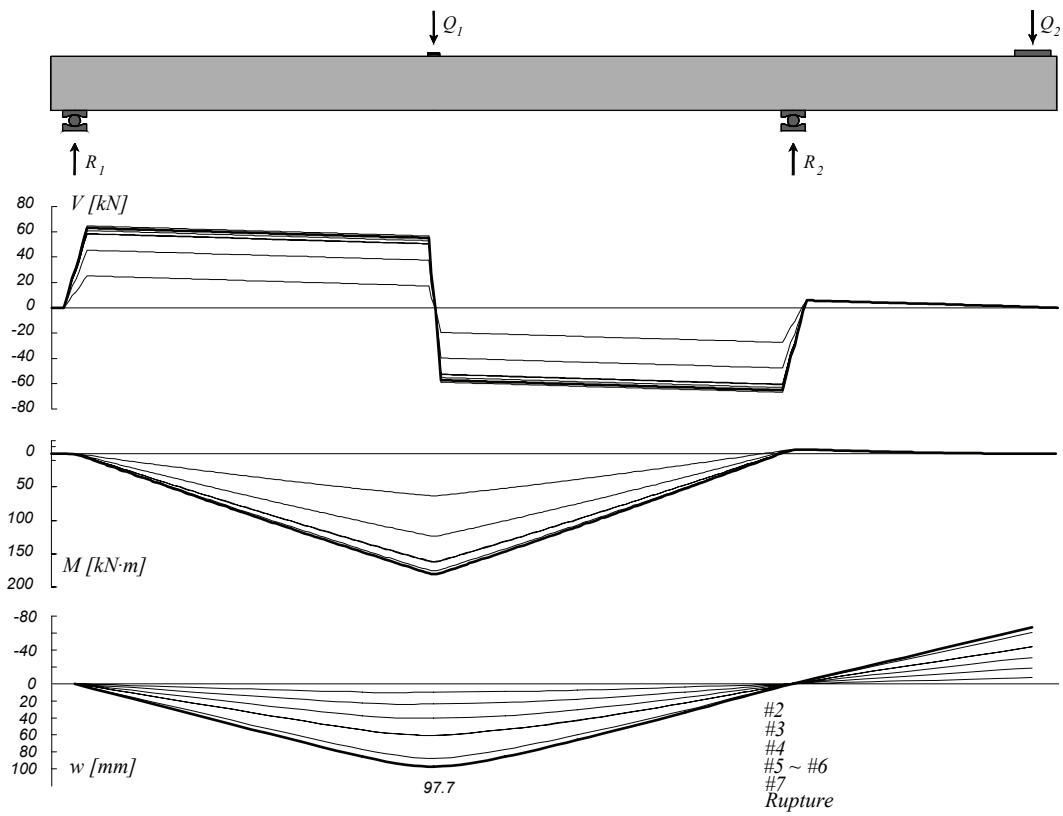


Figure B-4.15: Poutre SR4: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

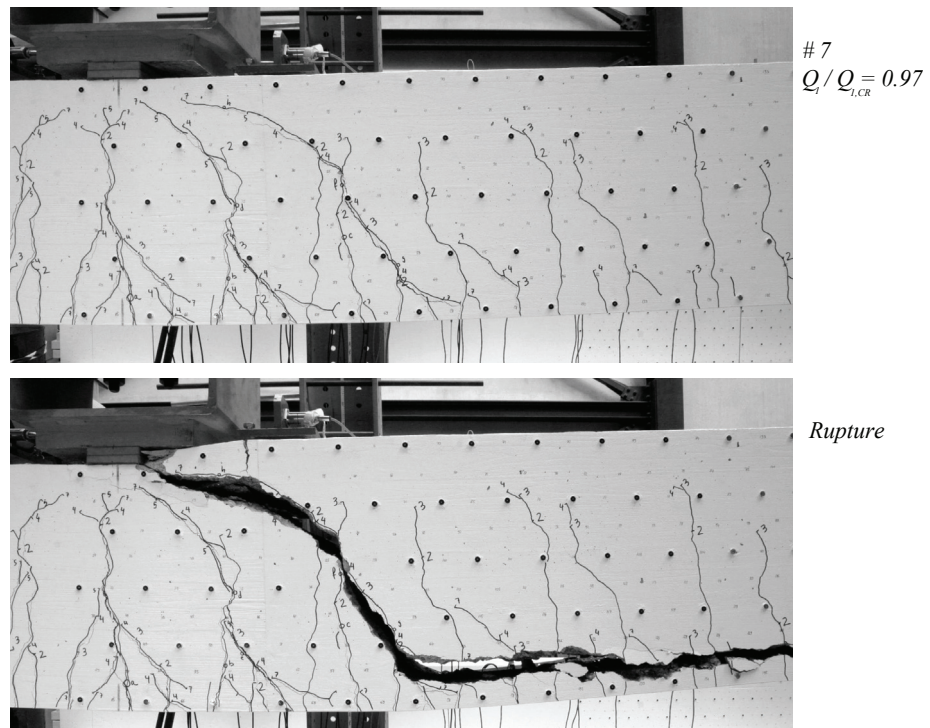


Figure B-4.16: Poutre SR4: Fissuration avant rupture en travée (palier 7) et après rupture

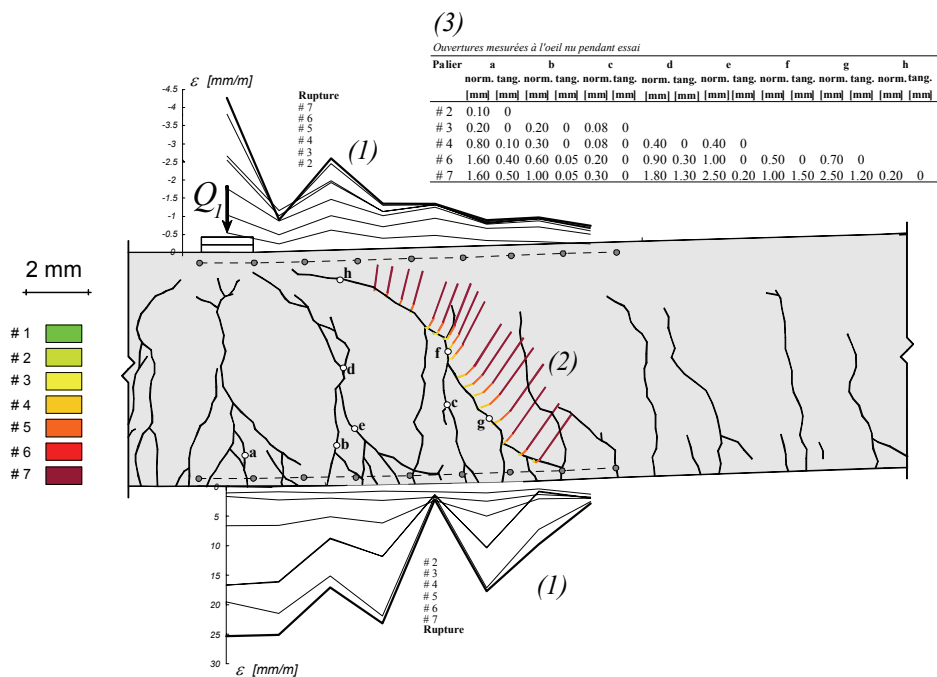
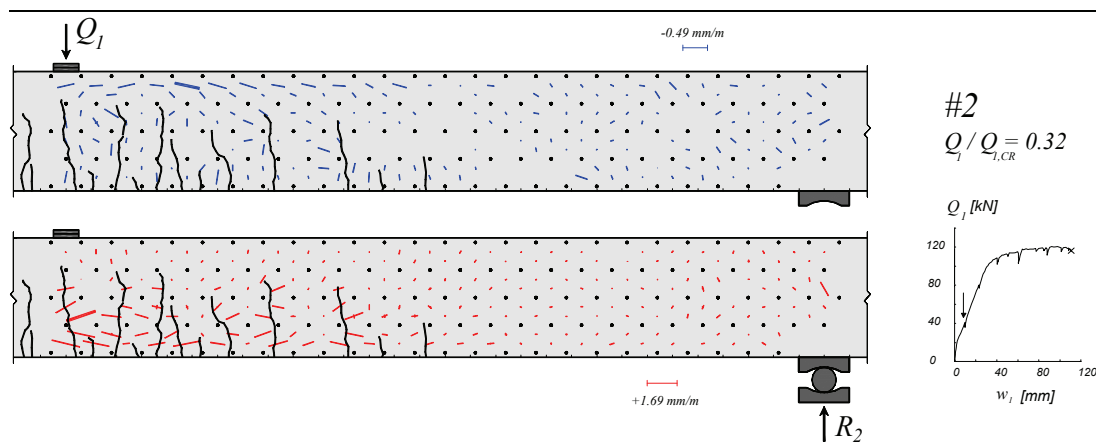


Figure B-4.17: Poutre SR4: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre;
 (3) Ouvertures mesurées à l’œil nu pendant l’essai



Suite page suivante

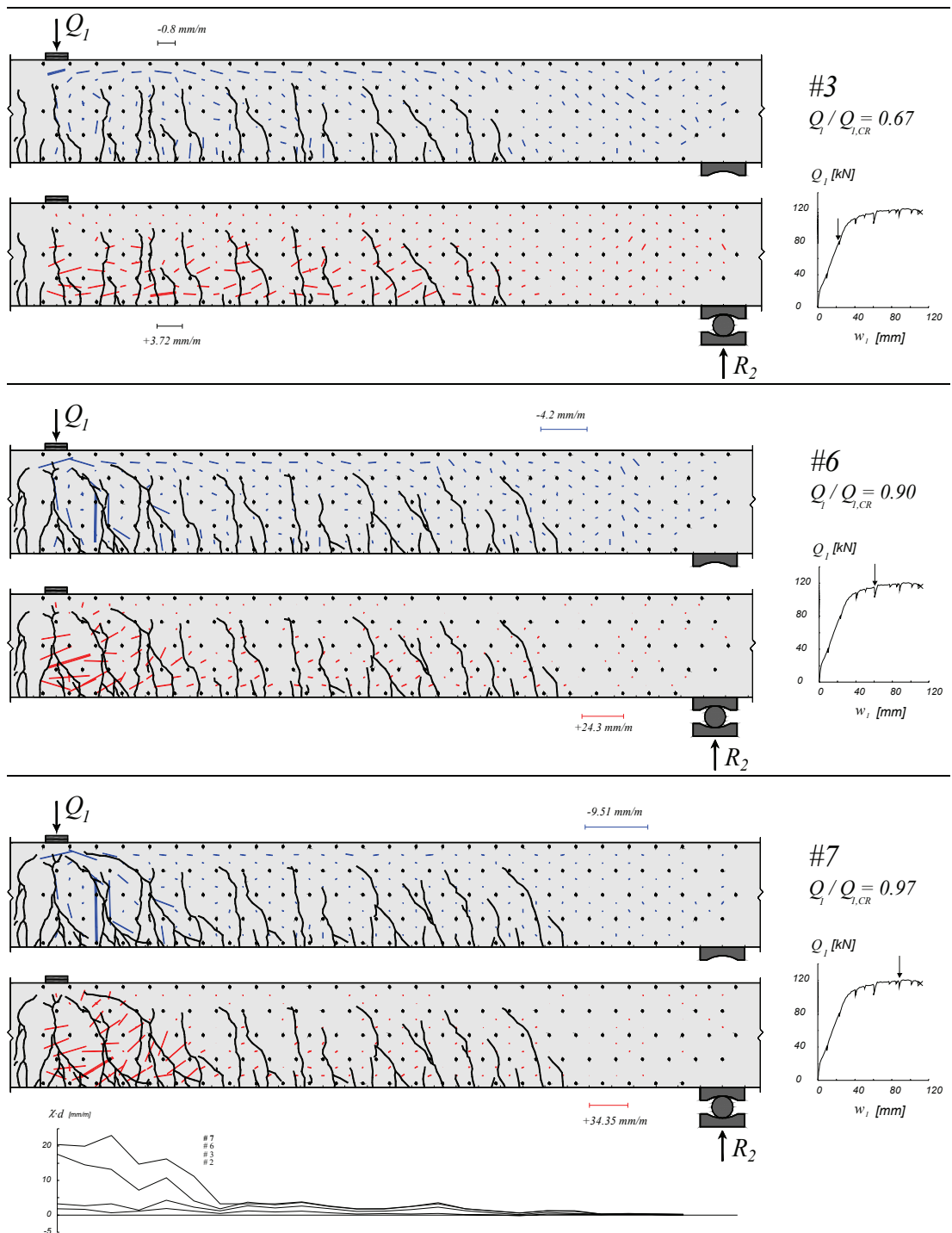


Figure B-4.18: Poutre SR4: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.5 Poutre SR5

La poutre SR5 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de -0.2. La rupture a été en flexion avec arrachement des barres d'armature (fig. B-4.21).

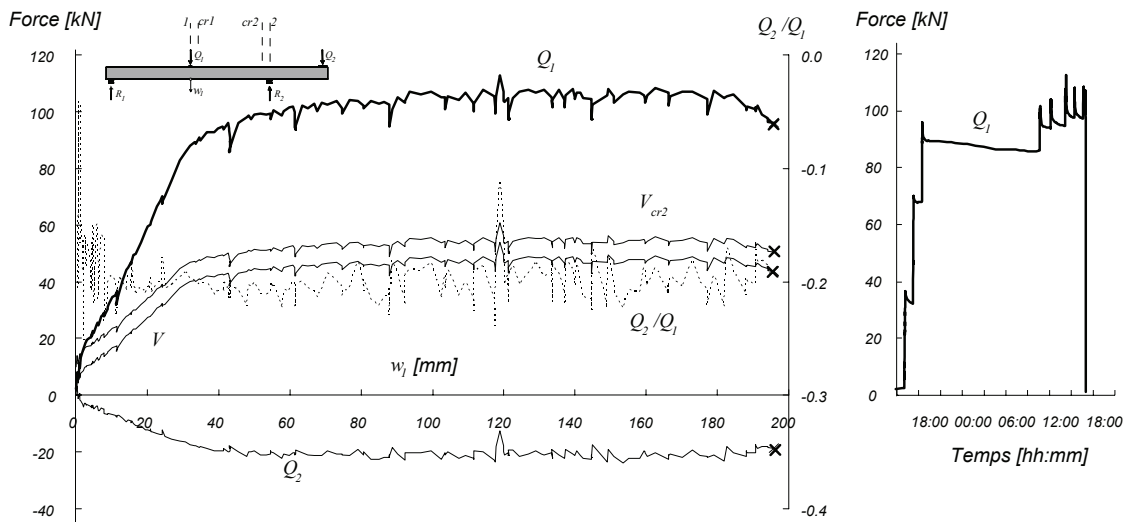


Figure B-4.19: Poutre SR5: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.8: Poutre SR5: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.	
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*	
2	35.8	-7.4	-0.21	69.9	66.9	8.7	13.2	-16.7	-17.1	-24.6	-24.4	0.49	0.16	11.44	-11.42	37%	DP	
	32.7	-7.29	-0.22	65.1	62.4	8.4	12.6	-15.2	-15.6	-23.1	-22.8						34%	FD
	32.2	-7.3	-0.23	64.4	61.7	8.5	12.6	-14.9	-15.3	-22.9	-22.6	0.48	0.16	11.29	-11.38	33%	FP	
3	69.7	-13.6	-0.19	126.4	120.8	21.2	28.5	-31.6	-32.0	-39.5	-39.2	0.75	0.33	24.24	-25.83	72%	DP	
	67.7	-12.44	-0.18	122.3	116.8	19.0	26.1	-30.9	-31.4	-38.9	-38.6						70%	FD
	68.1	-12.2	-0.18	122.6	117.1	18.5	25.6	-31.2	-31.7	-39.2	-38.9	0.74	0.32	24.29	-25.84	71%	FP	
4	93.4	-20.0	-0.21	168.0	160.7	34.1	43.3	-41.3	-41.7	-49.2	-49.0	1.21	1.13	43.01	-43.99	97%	DP	
	89.1	-19.08	-0.21	160.8	153.8	32.3	41.1	-39.5	-39.9	-47.4	-47.1						93%	FD
	89.3	-18.7	-0.21	160.7	153.7	31.5	40.4	-39.7	-40.1	-47.6	-47.3	1.24	1.15	43.13	-44.01	93%	FP	
5	85.8	-18.5	-0.22	155.3	148.6	31.1	39.6	-38.0	-38.4	-46.0	-45.7	1.25	1.15	43.03	-43.99	89%	DP	
	86.0	-18.18	-0.21	155.3	148.5	30.5	39.0	-38.2	-38.6	-46.2	-45.9						89%	FD
	86.1	-18.1	-0.21	155.3	148.6	30.4	39.0	-38.3	-38.7	-46.2	-45.9	1.24	1.14	43.02	-43.97	90%	FP	
6	99.3	-20.5	-0.21	177.4	169.6	35.2	44.9	-44.1	-44.5	-52.0	-51.7	2.87	2.09	61.42	-58.53	103%	DP	
	94.0	-20.64	-0.22	169.6	162.3	35.4	44.6	-41.4	-41.8	-49.3	-49.0						98%	FD
	94.0	-20.6	-0.22	169.5	162.2	35.3	44.5	-41.4	-41.8	-49.3	-49.0	2.88	2.12	61.54	-58.48	98%	FP	
7	101.0	-21.1	-0.21	180.4	172.5	36.3	46.2	-44.7	-45.2	-52.7	-52.4	3.19	3.48	87.91	-77.77	105%	DP	
	95.8	-21.7	-0.23	173.3	165.8	37.4	46.8	-41.9	-42.3	-49.9	-49.6						100%	FD
	94.7	-21.7	-0.23	171.7	164.4	37.4	46.7	-41.4	-41.8	-49.4	-49.1	3.19	3.50	87.99	-77.75	99%	FP	
8	103.0	-20.6	-0.20	183.0	174.9	35.5	45.5	-45.9	-46.3	-53.8	-53.6	4.89	5.34	121.2	-	107%	DP	
	97.97	-21.19	-0.22	176.1	168.4	36.5	46.1	-43.2	-43.6	-51.1	-50.8						102%	FD
	97.5	-21.2	-0.22	175.4	167.8	36.5	46.0	-43.0	-43.4	-50.9	-50.6	4.88	5.36	121.3	-	101%	FP	
9	101.5	-21.4	-0.21	181.6	173.6	37.0	46.8	-44.9	-45.3	-52.8	-52.6	6.29	7.06	144.6	-	106%	DP	
	97.62	-21.88	-0.22	176.2	168.7	37.9	47.4	-42.8	-43.2	-50.7	-50.4						102%	FD
	97.3	-21.9	-0.22	175.7	168.2	37.9	47.3	-42.6	-43.0	-50.6	-50.3	6.24	7.08	144.7	-	101%	FP	
CM	108.4	-20.3	-0.19	190.8	182.2	35.0	45.5	-48.7	-49.1	-56.7	-56.4	6.53	9.39	162.63	-	113%	CM	
CR	96.1	-18.7	-0.19	170.9	163.2	31.6	41.1	-43.1	-43.5	-51.0	-50.8	6.91	10.00	195.95	-	100%	CR	

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

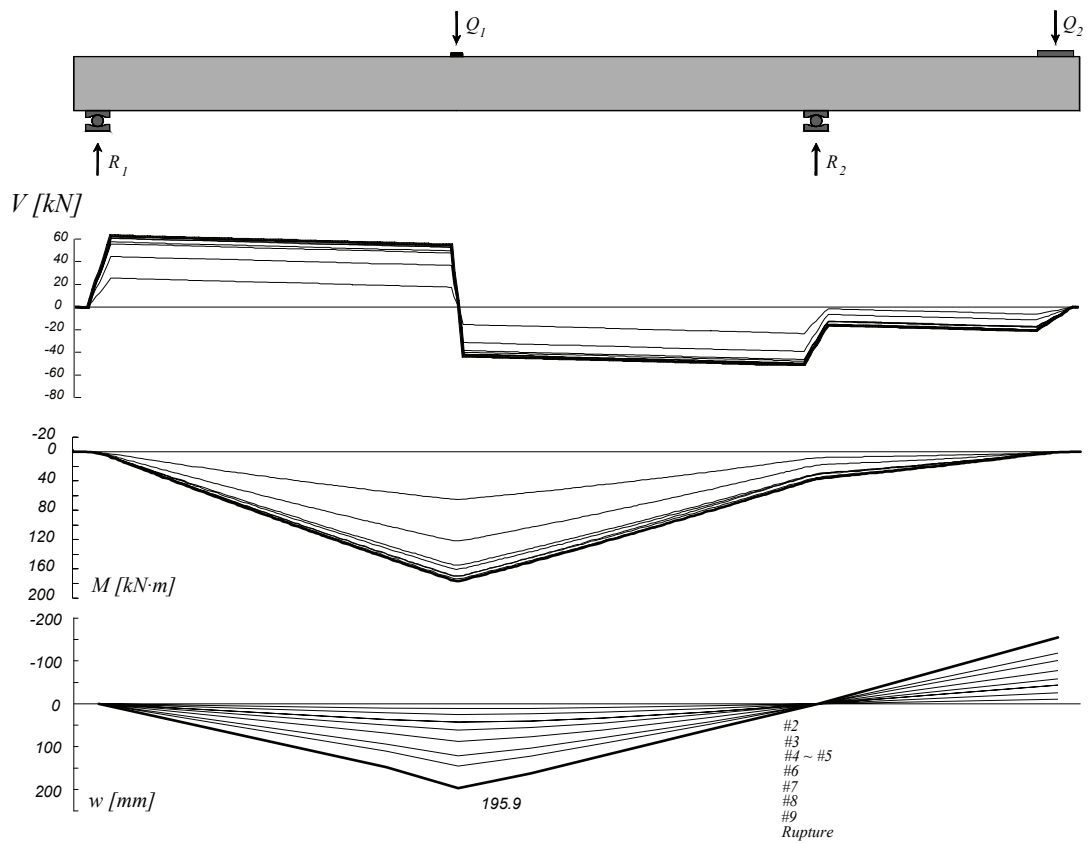


Figure B-4.20: Poutre SR5: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

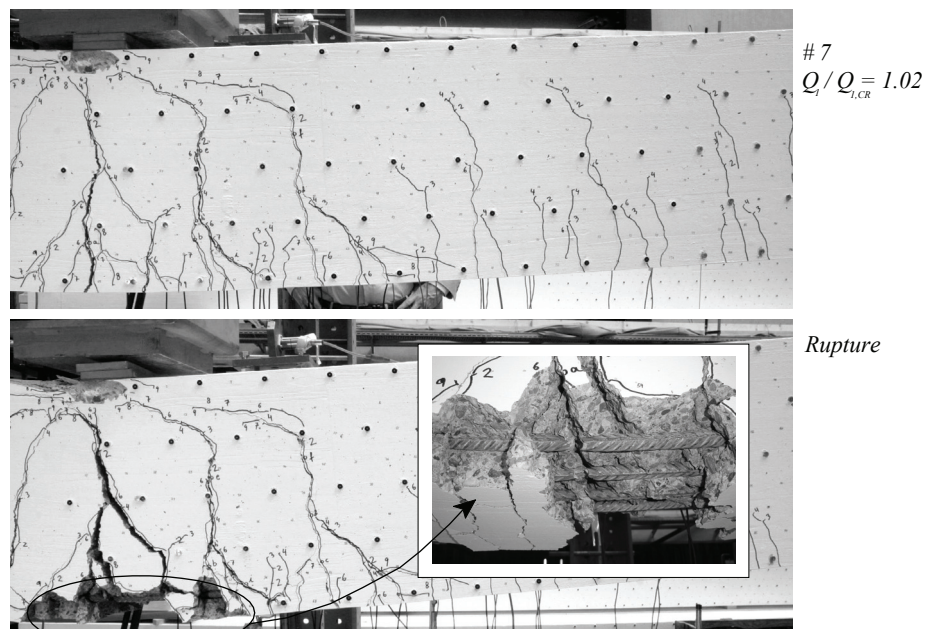


Figure B-4.21: Poutre SR5: Fissuration avant rupture en travée (palier 9) et après rupture

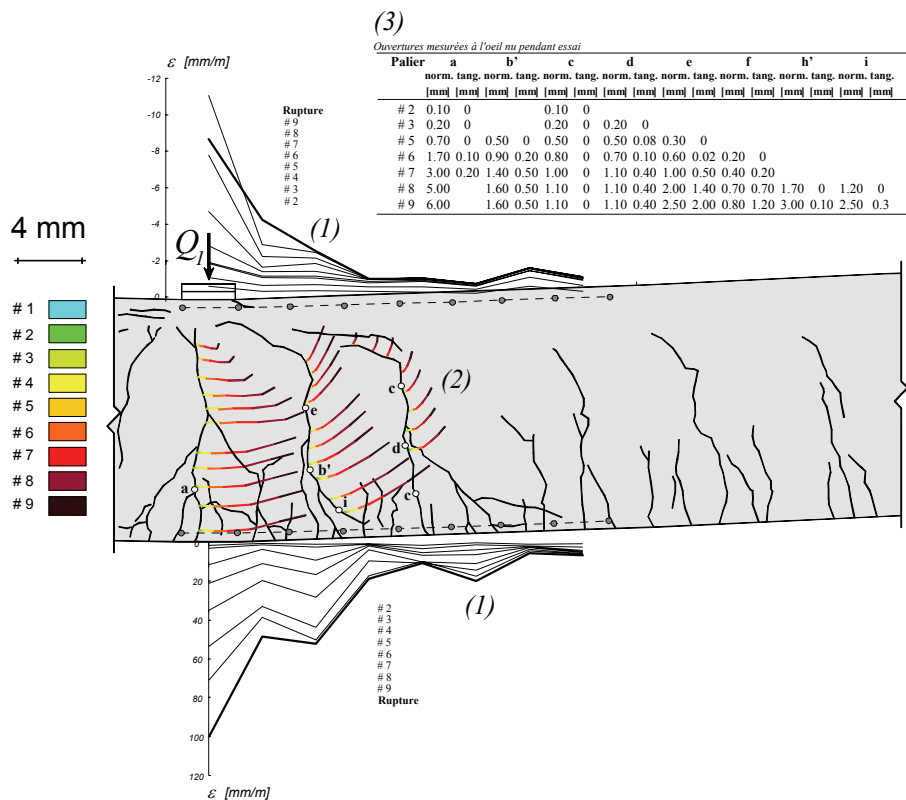
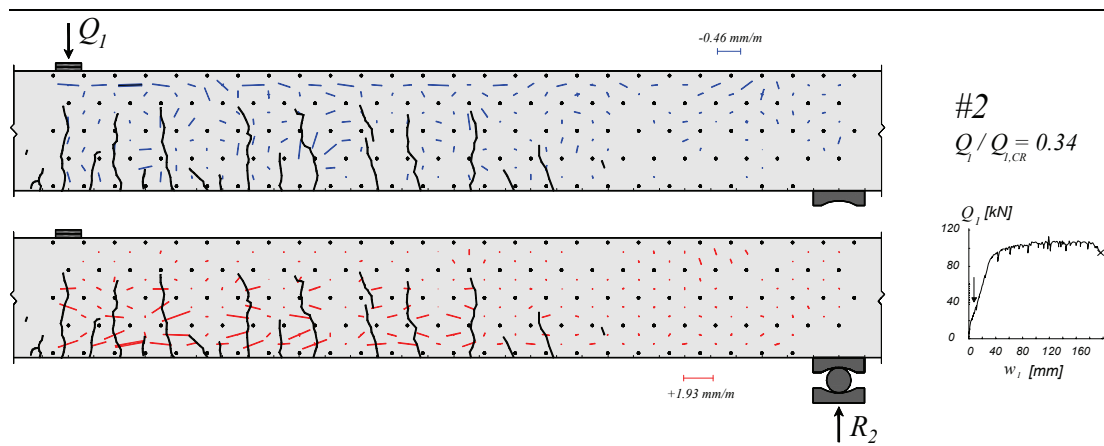


Figure B-4.22: Poutre SR5: (1) Déformations mesurées avec les jauges "oméga" ; (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

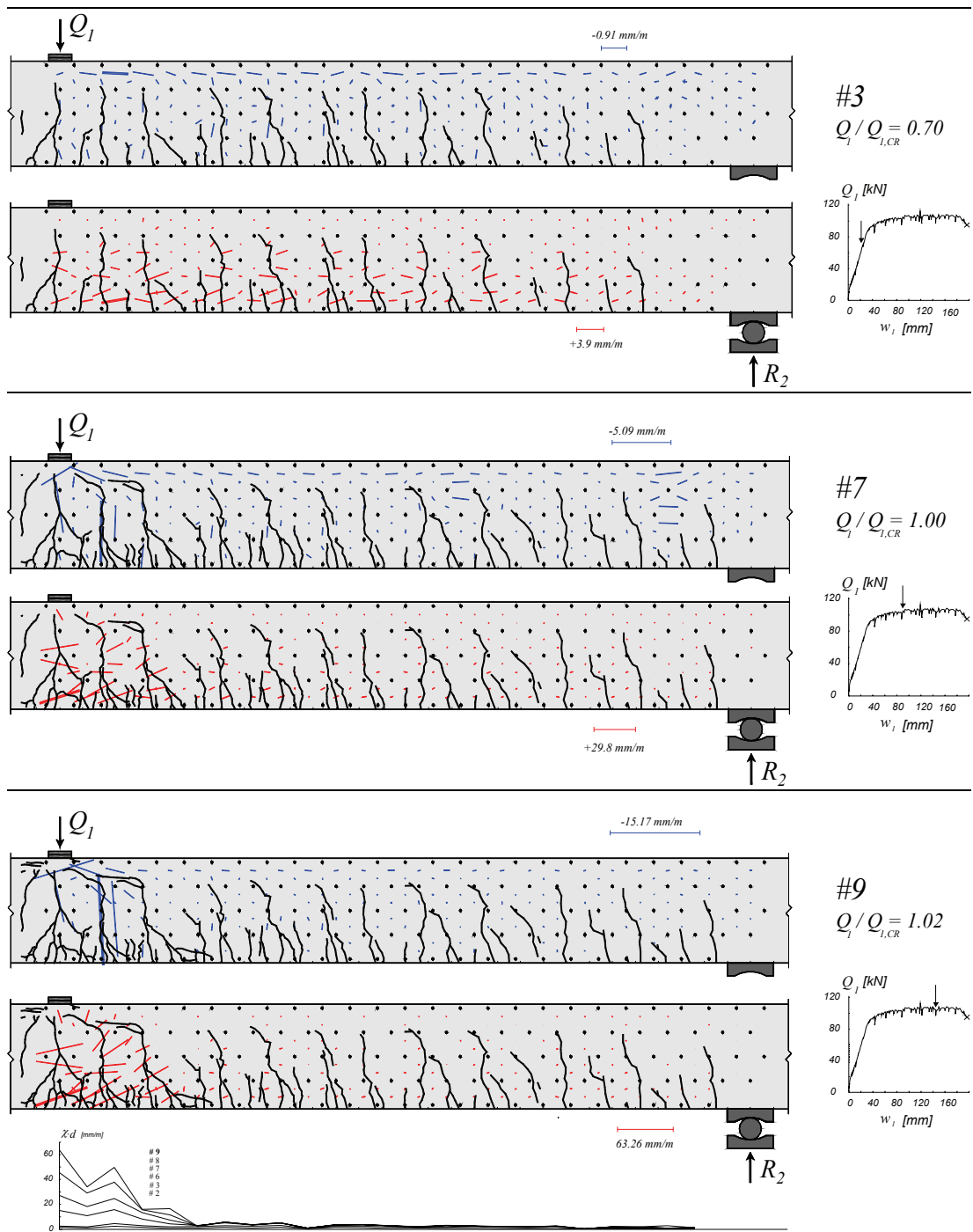


Figure B-4.23: Poutre SR5: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.6 Poutre SR6

La poutre SR6 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de +0.6. Pour un niveau de charge de $Q_1 = 117$ kN, une importante fissure d'effort tranchant s'est ouverte au droit de la section $cr2$, près de l'appui intermédiaire. Cette fissure n'a pas engendrée la rupture de la poutre, ni la perte totale de la charge appliquée (fig. B-4.26a). Après rechargement, une rupture très fragile s'est produite en travée, pour $Q_1 = 148$ kN (fig. B-4.26b).

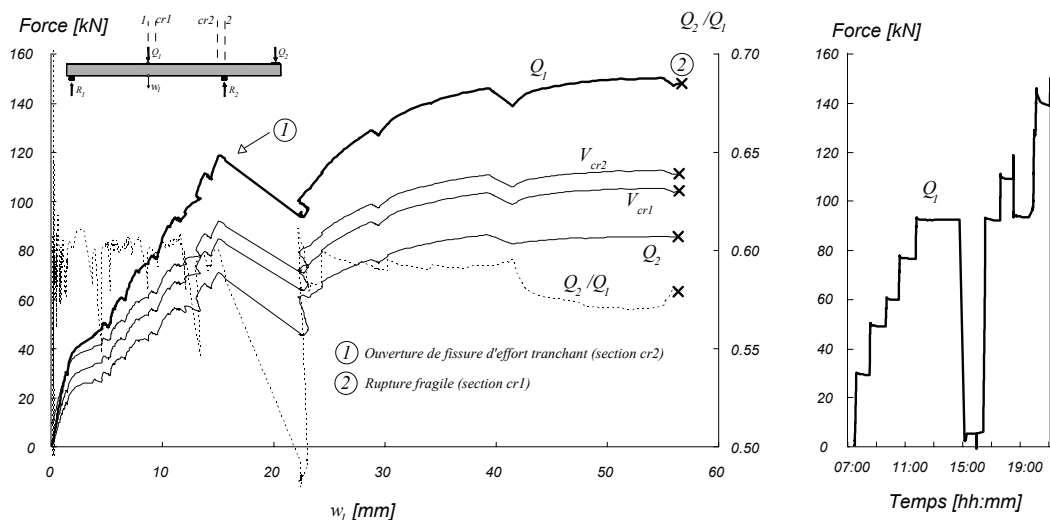


Figure B-4.24: Poutre SR6: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.9: Poutre SR6: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{11}	Ω_{00}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*
#2	30.0	17.7	0.6	36.1	31.9	-40.8	-36.0	-22.2	-22.6	-30.1	-29.8	0.17	0.11	1.39	1.78	26%	DP
	29.3	17.4	0.6	35.3	31.2	-40.2	-35.5	-21.7	-22.1	-29.7	-29.4					25%	FD
	29.3	17.4	0.6	35.2	31.1	-40.3	-35.6	-21.7	-22.1	-29.6	-29.4	0.17	0.12	1.40	1.85	25%	FP
#3	50.2	30.2	0.6	53.5	46.7	-65.2	-58.1	-36.4	-36.8	-44.4	-44.1	0.55	0.22	4.82	4.54	43%	DP
	49.0	29.7	0.6	52.3	45.6	-64.2	-57.2	-35.7	-36.1	-43.6	-43.3					42%	FD
	49.1	29.7	0.6	52.5	45.8	-64.1	-57.1	-35.7	-36.1	-43.6	-43.4	0.60	0.23	5.10	4.74	42%	FP
#4	60.8	36.5	0.6	63.1	54.9	-77.4	-69.2	-43.8	-44.3	-51.8	-51.5	0.81	0.27	6.28	6.19	52%	DP
	60.0	36.2	0.6	62.2	54.1	-76.8	-68.7	-43.3	-43.8	-51.3	-51.0					51%	FD
	60.0	36.0	0.6	62.4	54.2	-76.5	-68.4	-43.3	-43.7	-51.2	-50.9	0.85	0.27	6.61	6.34	51%	FP
#5	77.4	46.3	0.6	78.1	67.7	-96.4	-86.3	-55.4	-55.8	-63.3	-63.1	1.15	0.32	9.13	8.58	66%	DP
	76.7	45.8	0.6	77.4	67.2	-95.5	-85.5	-54.9	-55.3	-62.8	-62.5					66%	FD
	76.7	45.8	0.6	77.5	67.2	-95.5	-85.6	-54.9	-55.3	-62.9	-62.6	1.18	0.32	9.40	8.69	66%	FP
#6	93.0	56.3	0.6	91.1	78.7	-116.0	-104.2	-66.5	-67.0	-74.5	-74.2	1.49	0.35	11.19	11.42	80%	DP
	92.5	55.9	0.6	90.8	78.4	-115.1	-103.4	-66.1	-66.6	-74.1	-73.8					79%	FD
	92.5	55.8	0.6	90.8	78.5	-115.0	-103.3	-66.1	-66.5	-74.0	-73.8	1.51	0.34	11.50	11.63	79%	FP
#7	5.4	6.4	1.2	10.8	9.6	-18.8	-16.6	-6.1	-6.5	-14.0	-13.7	0.52	0.12	2.67	4.55	5%	DP
	5.4	6.2	1.1	11.0	9.8	-18.5	-16.3	-6.0	-6.5	-14.0	-13.7					5%	FD
	5.4	6.3	1.2	10.9	9.7	-18.6	-16.4	-6.0	-6.5	-14.0	-13.7	0.51	0.12	2.69	4.38	5%	FP
#8	92.8	56.2	0.6	91.0	78.6	-115.8	-104.0	-66.4	-66.9	-74.4	-74.1	1.52	0.34	11.51	11.93	80%	DP
	92.4	56.1	0.6	90.5	78.1	-115.5	-103.8	-66.2	-66.6	-74.1	-73.8					79%	FD
	92.2	56.0	0.6	90.2	77.9	-115.4	-103.7	-66.0	-66.5	-74.0	-73.7	1.53	0.34	11.53	11.99	79%	FP
#9	110.2	65.2	0.6	107.8	93.2	-133.3	-119.6	-78.1	-78.5	-86.0	-85.7	1.92	0.37	14.06	14.22	94%	DP
	109.3	64.8	0.6	106.9	92.4	-132.4	-118.9	-77.5	-77.9	-85.5	-85.2					94%	FD
	109.2	64.7	0.6	107.0	92.5	-132.2	-118.6	-77.4	-77.9	-85.4	-85.1	1.94	0.37	14.34	14.36	94%	FP
CFAP	116.7	68.2	0.6	114.5	99.1	-139.1	-124.7	-82.3	-82.8	-90.3	-90.0	2.42	0.39	15.63	17.10	100%	CFAP
CR	148.0	85.6	0.6	143.6	124.2	-172.9	-155.2	-103.8	-104.2	-111.7	-111.4	2.12	0.57	56.47	57.47	127%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CFAP : Ouverture de fissure d'effort tranchant à l'appui ; CR : Charge de rupture ;

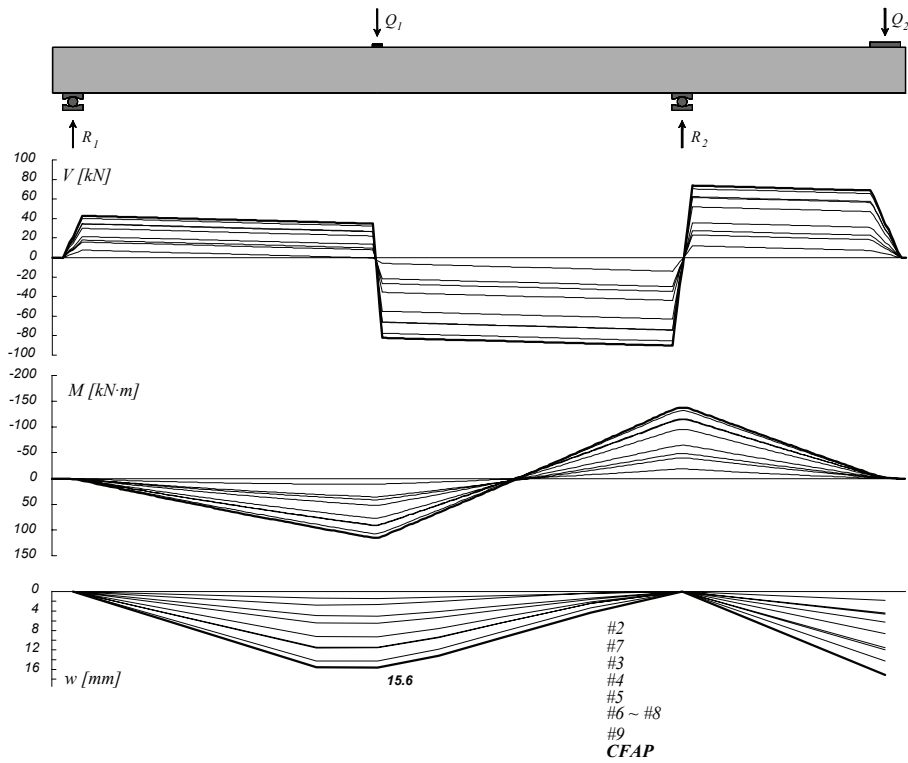


Figure B-4.25: Poutre SR6: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

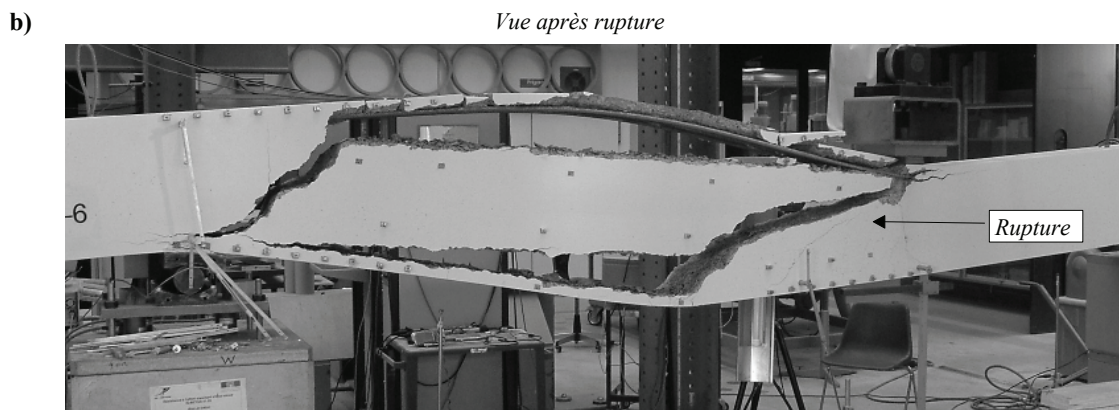
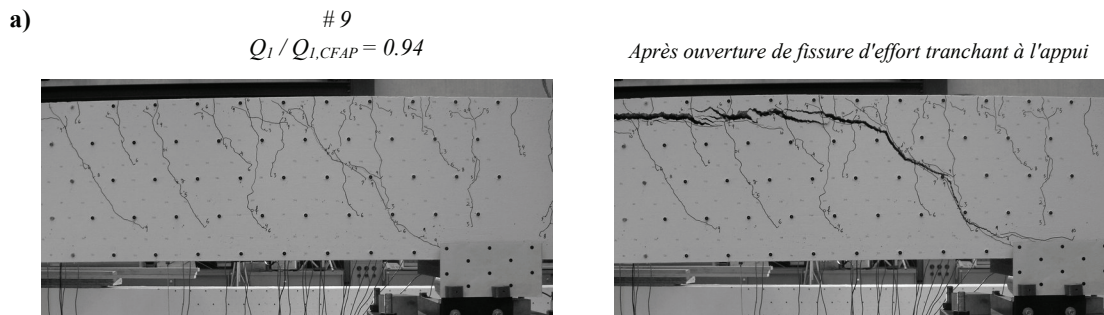


Figure B-4.26: Poutre SR6: a) Ouverture de fissure d'effort tranchant non critique à l'appui; b) rupture fragile en travée

(3)

Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant essai

Palier	a	b	c	d	e	f	g	h	i
2	0.02	0							
3	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.05	0	0.08
4	0.2	0	0.3	0	0.2	0	0.05	0	0.05
5	0.2	0	0.3	0	0.2	0	0.08	0	0.05
6	0.2	0	0.4	0	0.2	0	0.1	0.05	0.2
8	0.2	0	0.4	0	0.2	0	0.1	0.08	0.2
9	0.2	0	0.4	0	0.2	0	0.8	0.2	0.05

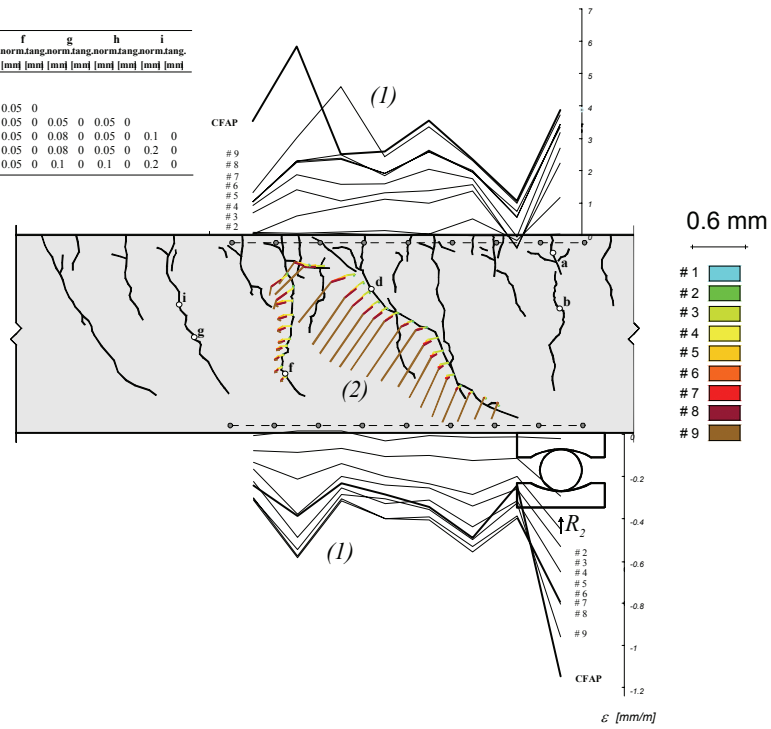
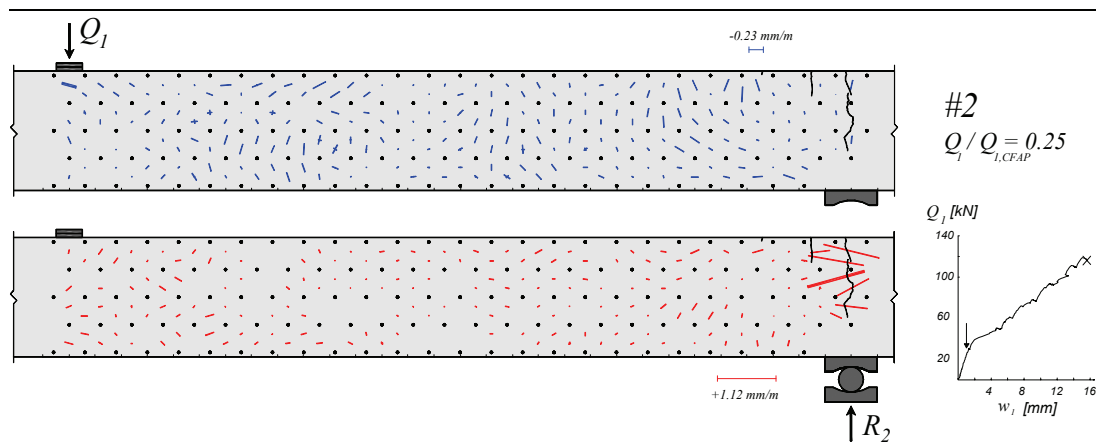


Figure B-4.27: Poutre SR6: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

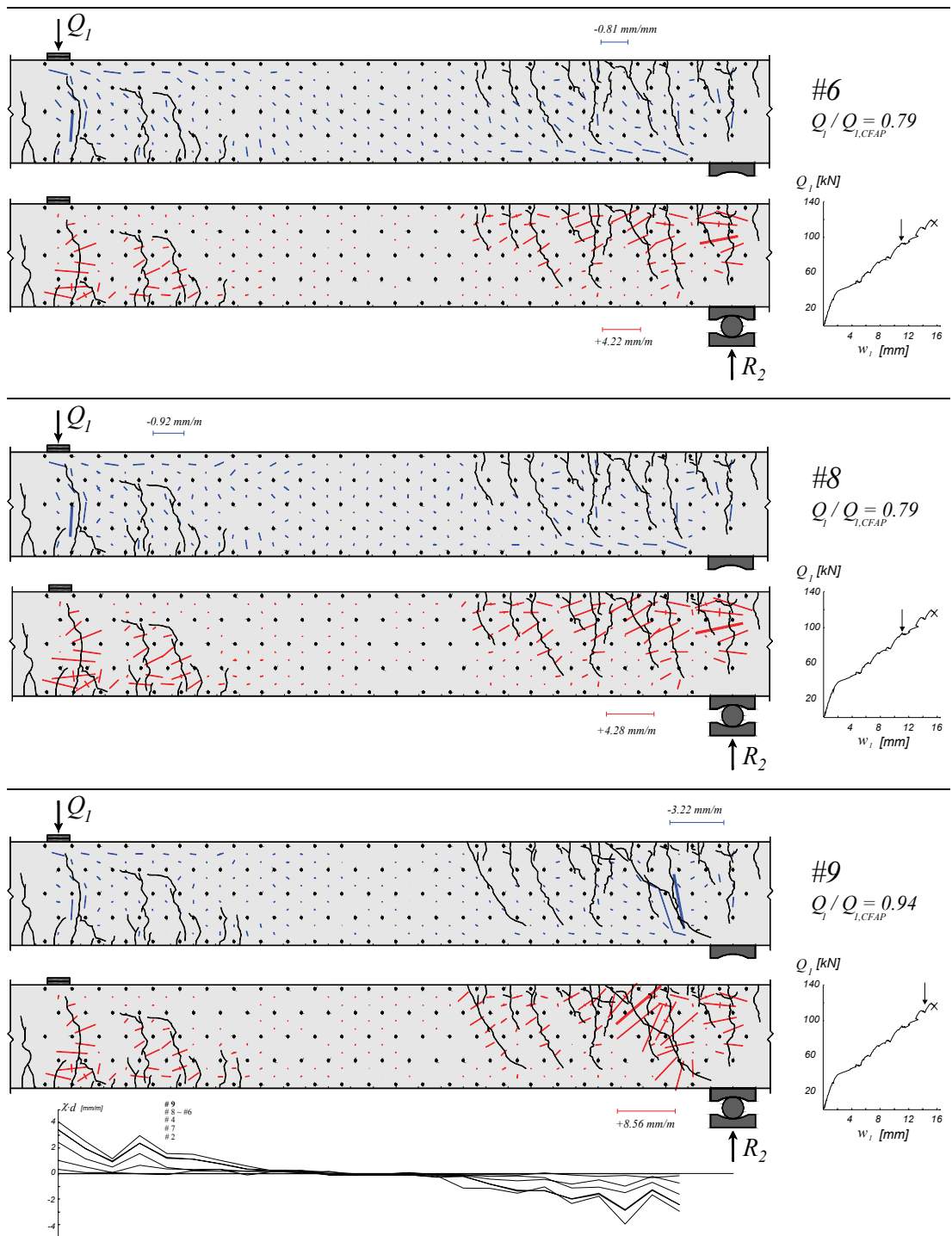


Figure B-4.28: Poutre SR6: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.7 Poutre SR7

La poutre SR7 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de +0.10 dans la première partie de l'essai. Pour un niveau de charge de $Q_1 = 123$ kN, une importante fissure d'effort tranchant s'est ouverte au droit de la section $cr1$, près de la charge Q_1 . Cette fissure n'a pas engendrée la rupture de la poutre, ni la perte totale de la charge appliquée (fig. B-4.31a). Après rechargement, une rupture très fragile s'est produite, pour $Q_1 = 140$ kN (fig. B-4.31b) et un rapport Q_2/Q_1 de +0.51.

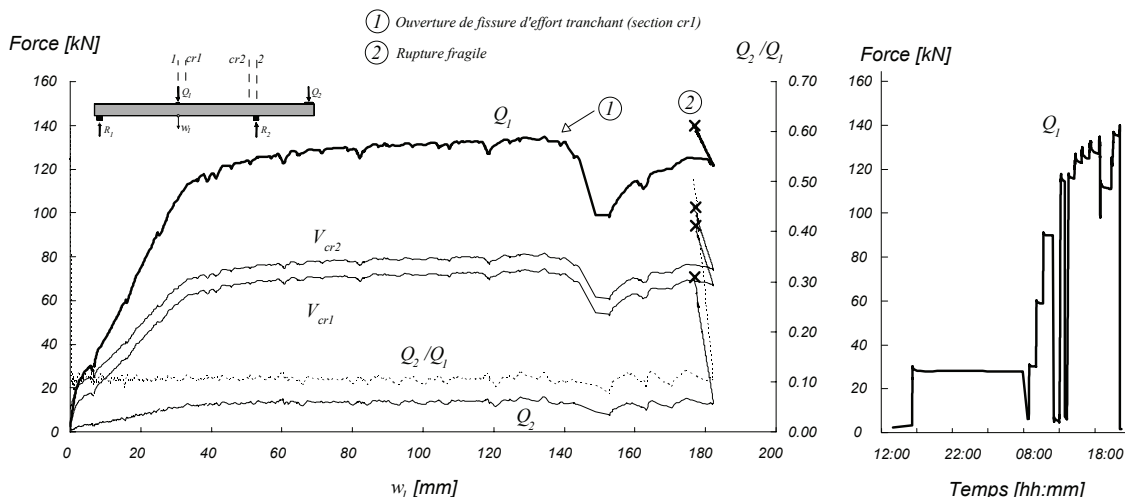


Figure B-4.29: Poutre SR7: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.10: Poutre SR7: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*
#0	2.9	1.7	0.59	11.8	11.1	-9.7	-7.9	-3.3	-3.7	-11.2	-10.9	0.00	0.00	0.00	0.00	2%	
#1	3.4	1.8	0.53	12.4	11.7	-9.9	-8.0	-3.6	-4.0	-11.5	-11.2	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#2	29.6	3.4	0.12	49.7	46.5	-12.7	-8.5	-17.2	-17.6	-25.1	-24.8	0.26	0.10	6.00	-4.86	24%	DP
	28.4	3.5	0.12	47.9	44.8	-12.9	-8.7	-16.6	-17.1	-24.6	-24.3	0.27	0.11	6.19	-4.95	23%	FP
#3	30.7	3.3	0.11	51.5	48.2	-12.5	-8.2	-17.7	-18.1	-25.7	-25.4	0.29	0.12	6.69	-5.43	25%	DP
	30.3	3.5	0.12	50.7	47.5	-12.9	-8.5	-17.6	-18.0	-25.5	-25.2	0.29	0.11	6.75	-5.43	24%	FD
	30.3	3.5	0.12	50.7	47.4	-12.9	-8.5	-17.6	-18.0	-25.5	-25.2	0.29	0.11	6.75	-5.43	24%	FP
#4	59.3	6.6	0.11	90.8	84.7	-18.5	-11.5	-33.1	-33.5	-41.0	-40.7	0.70	0.19	16.01	-13.45	48%	DP
	58.9	6.7	0.11	90.1	84.0	-18.8	-11.8	-32.9	-33.4	-40.9	-40.6	0.70	0.19	16.06	-13.50	48%	FD
	58.9	6.7	0.11	90.0	84.0	-18.8	-11.8	-32.9	-33.4	-40.9	-40.6	0.70	0.19	16.06	-13.50	48%	FP
#5	90.7	10.0	0.11	134.0	124.9	-24.9	-14.9	-49.9	-50.3	-57.9	-57.6	1.13	0.26	24.88	-20.80	73%	DP
	89.8	10.3	0.11	132.4	123.4	-25.5	-15.6	-49.6	-50.0	-57.5	-57.2	1.13	0.26	25.15	-20.91	72%	FD
	89.7	10.3	0.11	132.3	123.3	-25.5	-15.6	-49.6	-50.0	-57.5	-57.2	1.13	0.26	25.15	-20.91	72%	FP
#6	116.6	12.8	0.11	169.8	158.2	-30.1	-17.7	-63.9	-64.3	-71.8	-71.5	2.67	0.68	40.94	-32.98	94%	DP
	115.9	13.0	0.11	168.6	157.0	-30.5	-18.1	-63.5	-64.0	-71.5	-71.2	2.71	0.69	41.23	-33.03	93%	FD
	115.7	13.0	0.11	168.2	156.6	-30.5	-18.2	-63.4	-63.9	-71.4	-71.1	2.71	0.69	41.23	-33.03	93%	FP
#7	125.0	14.6	0.12	180.6	168.1	-33.5	-20.2	-68.6	-69.1	-76.6	-76.3	5.80	1.44	59.59	-45.11	101%	DP
	123.2	14.8	0.12	177.6	165.3	-33.9	-20.9	-67.8	-68.2	-75.7	-75.4	5.93	1.48	60.30	-45.21	99%	FD
	122.9	14.8	0.12	177.2	164.9	-34.0	-21.0	-67.7	-68.1	-75.6	-75.3	5.93	1.48	60.30	-45.21	99%	FP
#8	127.3	13.5	0.11	185.1	172.5	-31.3	-17.9	-69.4	-69.9	-77.4	-77.1	9.83	2.49	81.32	-59.43	103%	DP
	125	13.9	0.11	181.3	168.9	-32.1	-18.9	-68.4	-68.9	-76.4	-76.1	9.98	2.53	82.04	-59.62	101%	FD
	124.9	14.0	0.11	181.0	168.6	-32.3	-19.1	-68.4	-68.8	-76.3	-76.0	9.98	2.53	82.04	-59.62	101%	FP
#9	129.0	14.6	0.11	186.5	173.6	-33.5	-19.9	-70.6	-71.1	-78.6	-78.3	4.18	3.77	117.8	-83.30	104%	DP
	128	14.9	0.12	183.9	171.2	-34.1	-20.6	-70.0	-70.4	-77.9	-77.6	4.27	3.79	118.3	-83.41	103%	FD
	127.1	14.9	0.12	183.2	170.5	-34.1	-20.7	-69.8	-70.2	-77.7	-77.4	4.27	3.79	118.3	-83.41	103%	FP
CFTR	123.8	12.2	0.10	181.1	168.9	-28.8	-15.7	-67.2	-67.6	-75.2	-74.9	2.80	3.98	144.25	-98.88	100%	CFTR
CR	139.9	71.3	0.51	146.0	128.3	-144.8	-128.3	-95.0	-95.4	-102.9	-102.6	2.60	3.95	176.43	-73.52	113%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CFTR : Ouverture de fissure d'effort tranchant en travée ; CR : Charge de rupture

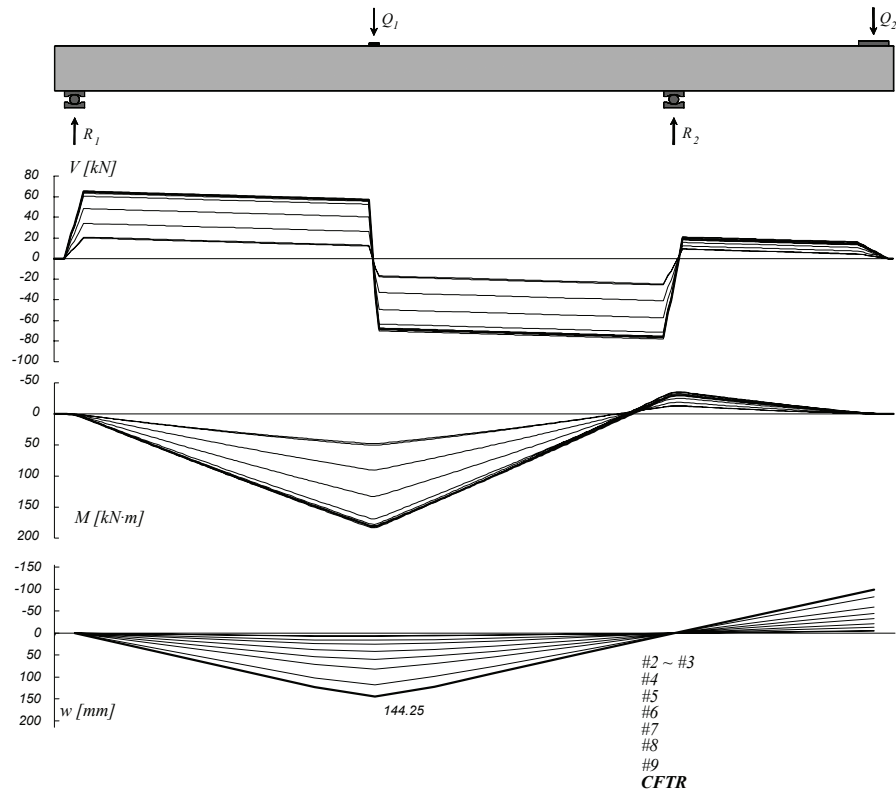


Figure B-4.30: Poutre SR7: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

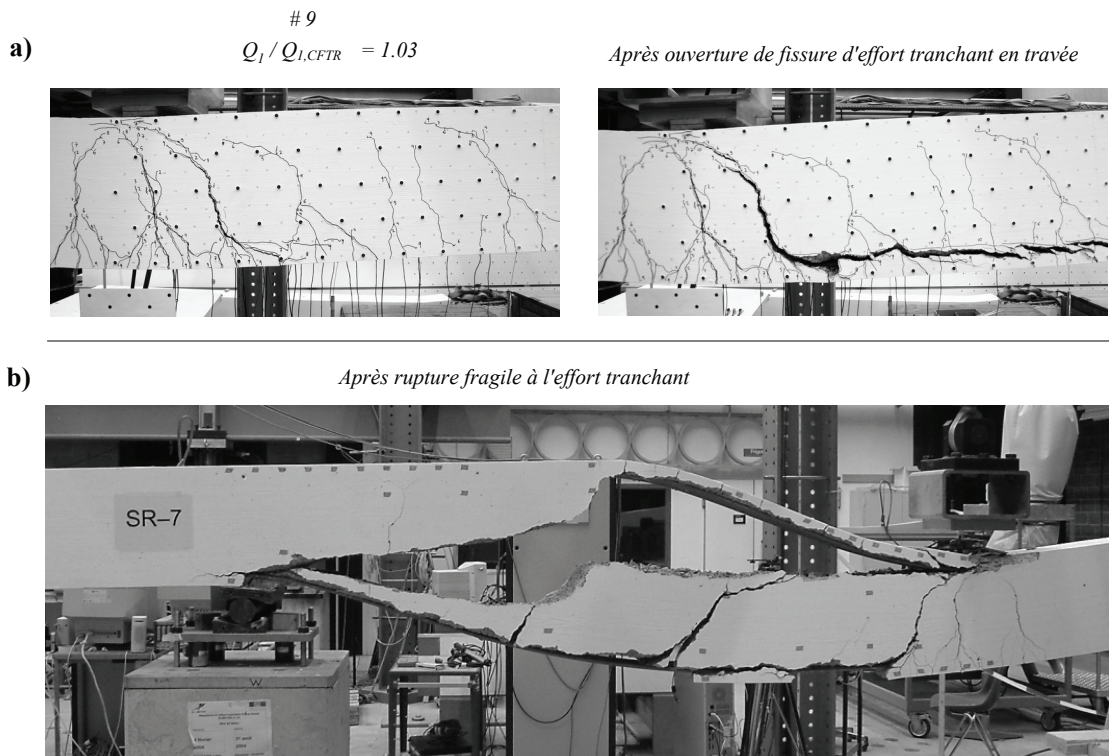


Figure B-4.31: Poutre SR7: a) Ouverture de fissure d'effort tranchant non critique en travée ; b) rupture fragile à l'appui

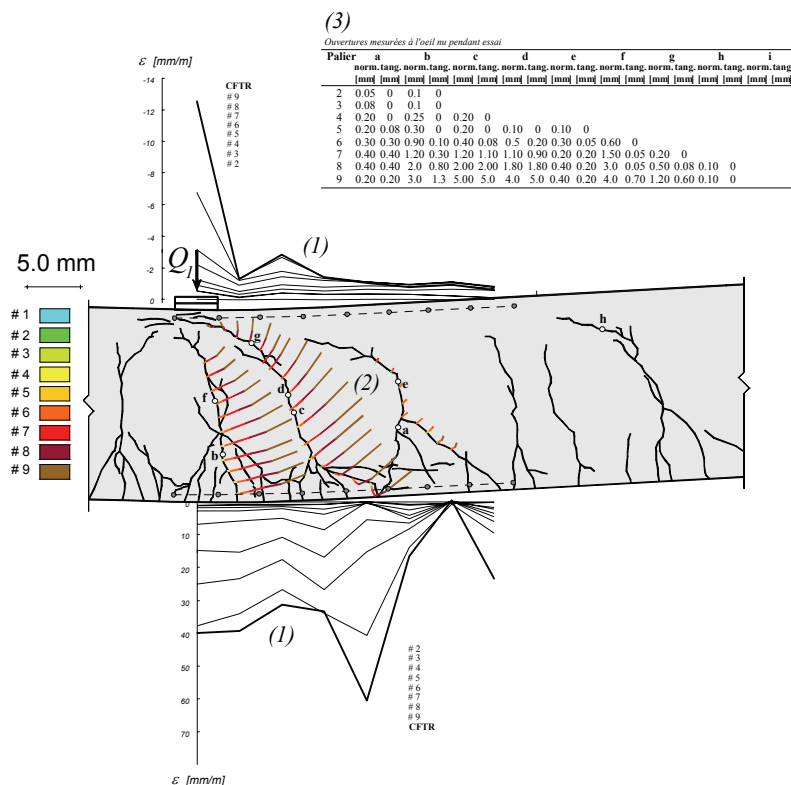
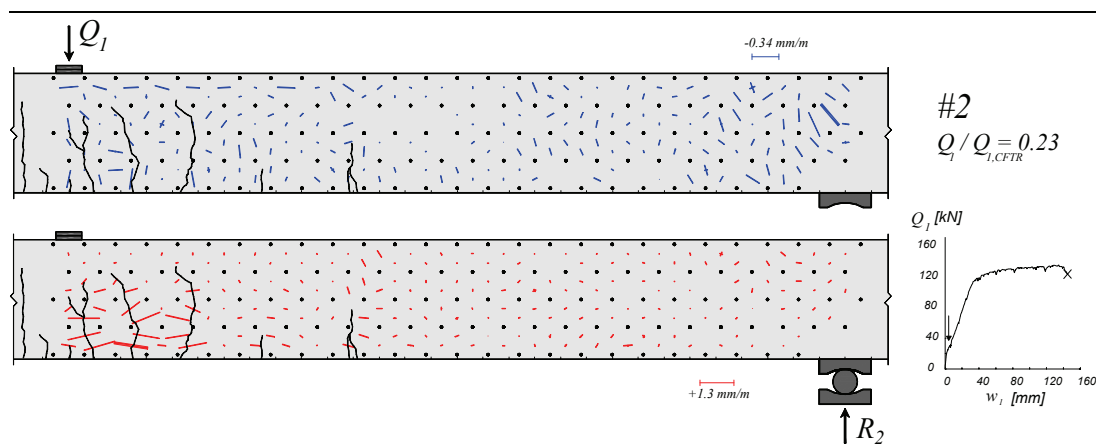


Figure B-4.32: Poutre SR7: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures
 au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l’œil nu pendant l’essai



Suite page suivante

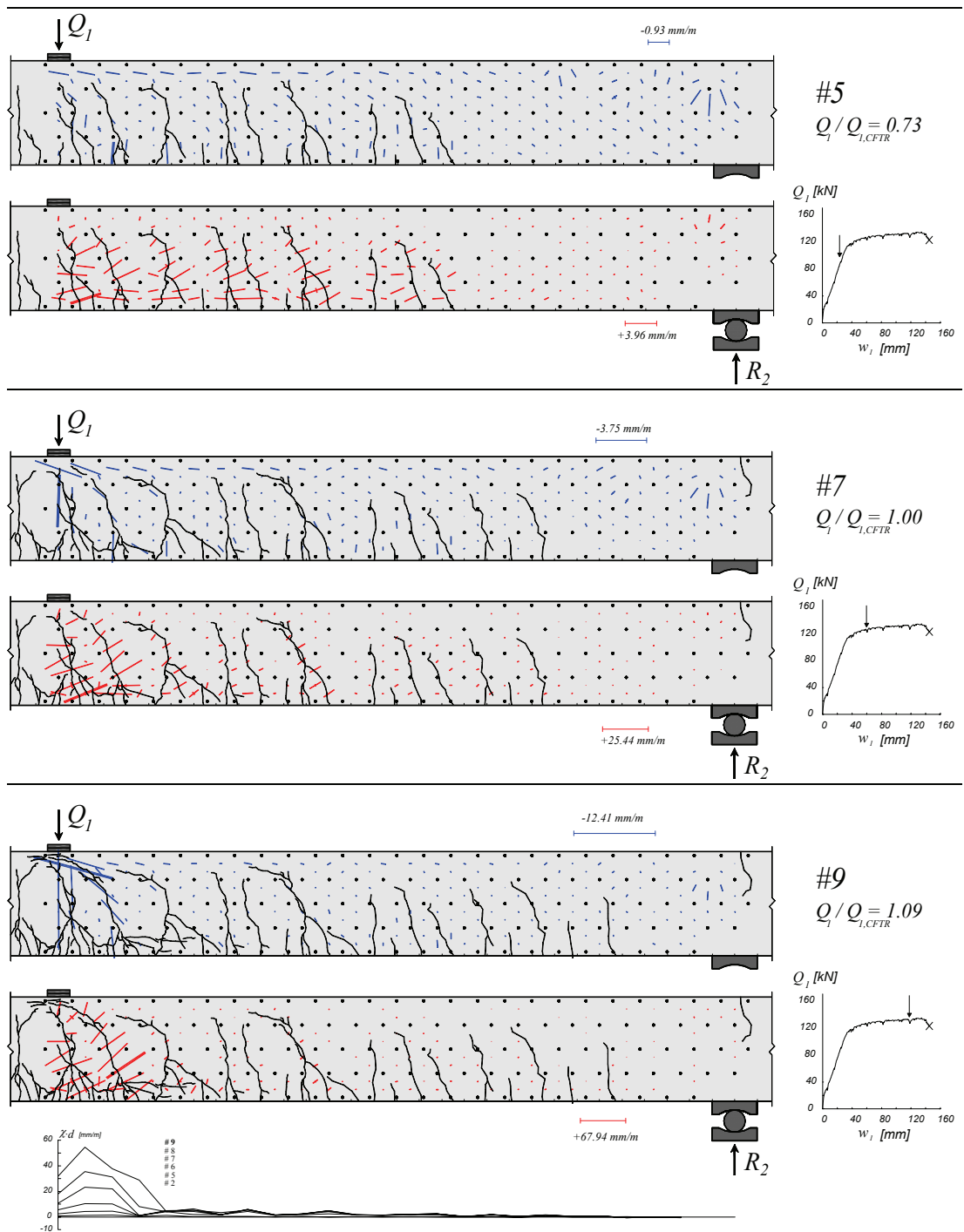


Figure B-4.33: Poutre SR7: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.8 Poutre SR8

La poutre SR8 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de -0.10. La rupture par effort tranchant a été observée en travée en présence des déformations plastiques importantes de l'armature de flexion (fig. B-4.36).

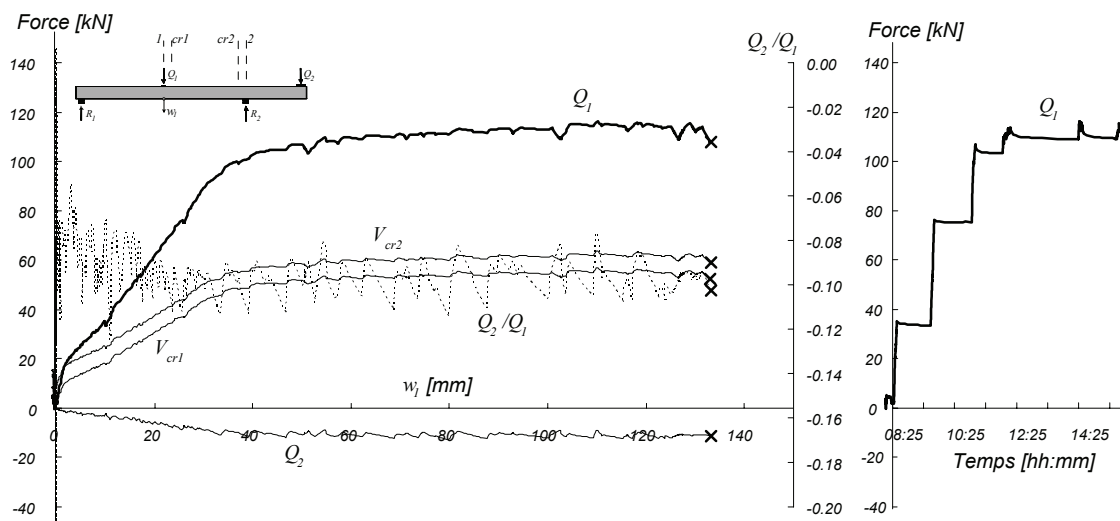


Figure B-4.34: Poutre SR8: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.11: Poutre SR8: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*
#0	3.3	3.2	0.97	10.9	10.1	-12.6	-10.7	-4.0	-4.4	-11.9	-11.6	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#1	3.4	3.4	1.00	10.8	10.0	-13.0	-11.1	-4.1	-4.5	-12.0	-11.7	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#2	34.8	-3.0	-0.08	63.9	60.7	-0.1	4.4	-17.7	-18.1	-25.6	-25.4	0.49	0.16	9.94	-8.51	32%	DP
	33.7	-2.4	-0.07	61.7	58.5	-1.2	3.2	-17.3	-17.7	-25.3	-25.0					31%	FD
#3	33.4	-2.4	-0.07	61.1	58.0	-1.3	3.1	-17.1	-17.6	-25.1	-24.8	0.48	0.16	10.16	-8.68	31%	FP
	75.6	-7.9	-0.10	129.5	123.0	10.2	18.2	-36.4	-36.9	-44.4	-44.1	0.85	0.30	25.89	-25.22	70%	DP
#4	75.2	-7.6	-0.10	128.6	122.1	9.5	17.5	-36.3	-36.8	-44.3	-44.0					70%	FD
	75.3	-7.4	-0.10	128.5	122.0	9.1	17.1	-36.5	-36.9	-44.4	-44.1	0.85	0.30	26.04	-25.35	70%	FP
#5	104.8	-10.0	-0.10	175.1	166.1	14.7	25.2	-50.3	-50.8	-58.3	-58.0	3.30	1.65	50.76	-44.82	98%	DP
	103.3	-9.33	-0.09	172.1	163.2	13.3	23.7	-49.8	-50.2	-57.7	-57.5					96%	FD
#6	103.2	-9.2	-0.09	171.9	162.9	13.1	23.5	-49.8	-50.2	-57.7	-57.4	3.37	1.69	51.35	-45.05	96%	FP
	110.7	-9.6	-0.09	183.5	173.9	14.0	25.0	-53.4	-53.8	-61.4	-61.1	7.88	4.63	101.7	-80.03	103%	DP
#7	109.5	-9.13	-0.08	181.2	171.7	13.0	24.0	-53.0	-53.4	-60.9	-60.6					102%	FD
	109.0	-8.9	-0.08	180.2	170.8	12.5	23.5	-52.8	-53.2	-60.8	-60.5	7.93	4.67	102.4	-79.72	101%	FP
#8	111.3	-11.3	-0.10	186.0	176.5	17.3	28.4	-53.1	-53.6	-61.1	-60.8	8.85	5.87	125.9	-96.19	104%	DP
	109.4	-10.9	-0.10	182.8	173.4	16.4	27.4	-52.3	-52.8	-60.3	-60.0					102%	FD
#9	109.2	-10.7	-0.10	182.3	173.0	16.1	27.1	-52.3	-52.7	-60.2	-59.9	8.95	5.89	126.6	-96.41	102%	FP
CM	115.4	-11.0	-0.10	191.8	181.9	16.7	28.1	-55.3	-55.7	-63.2	-63.0	9.18	5.94	129.02	-98.24	107%	CM
CR	107.5	-11.0	-0.10	180.1	170.9	16.7	27.4	-51.3	-51.8	-59.3	-59.0	8.53	5.92	133.11	-99.35	100%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

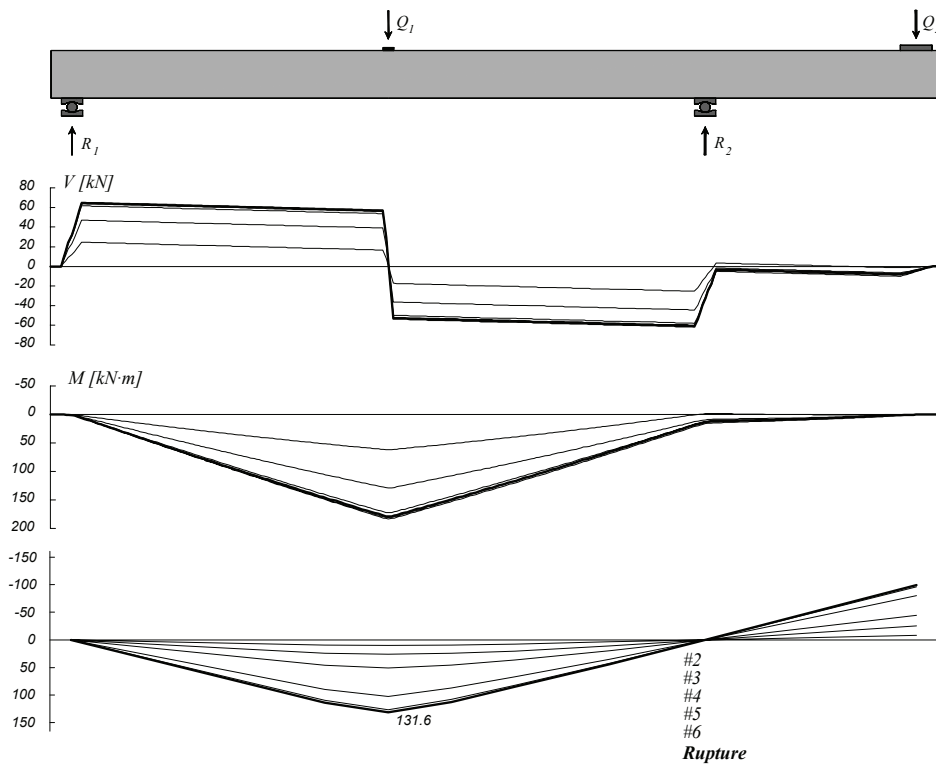
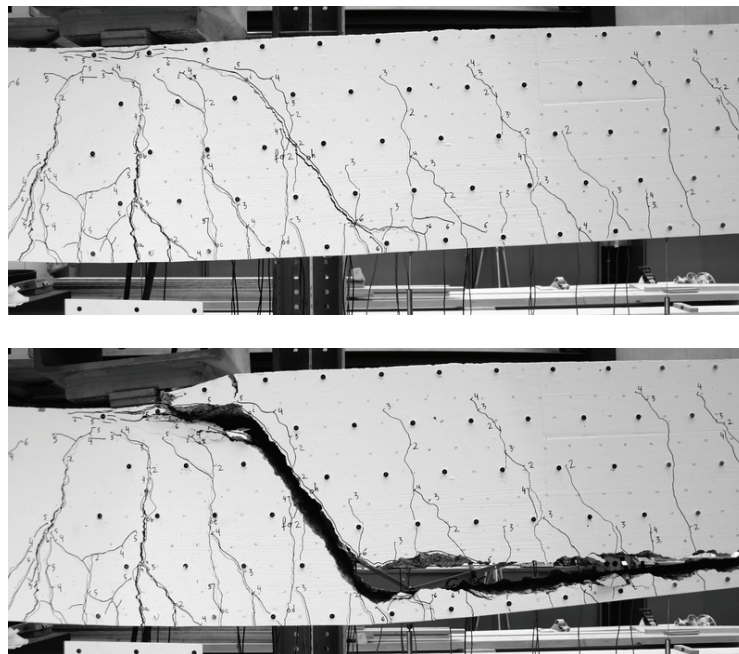


Figure B-4.35: Poutre SR8: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée



6
 $Q_1 / Q_{1,CR} = 0.97$

Rupture

Figure B-4.36: Poutre SR8: Fissuration avant rupture en travée (palier 6) et après rupture

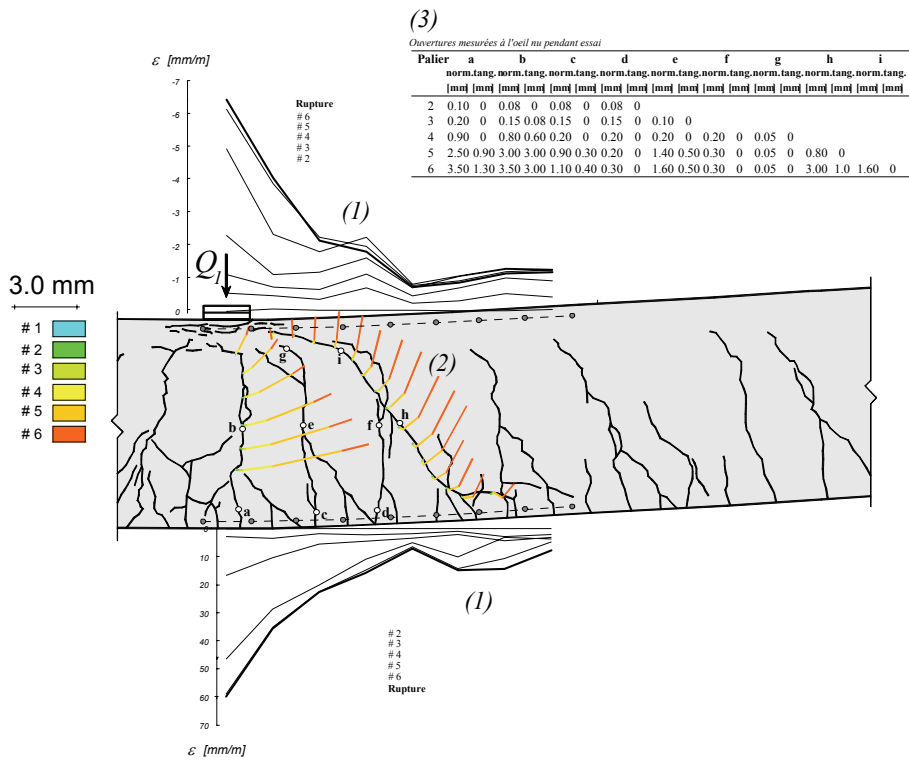
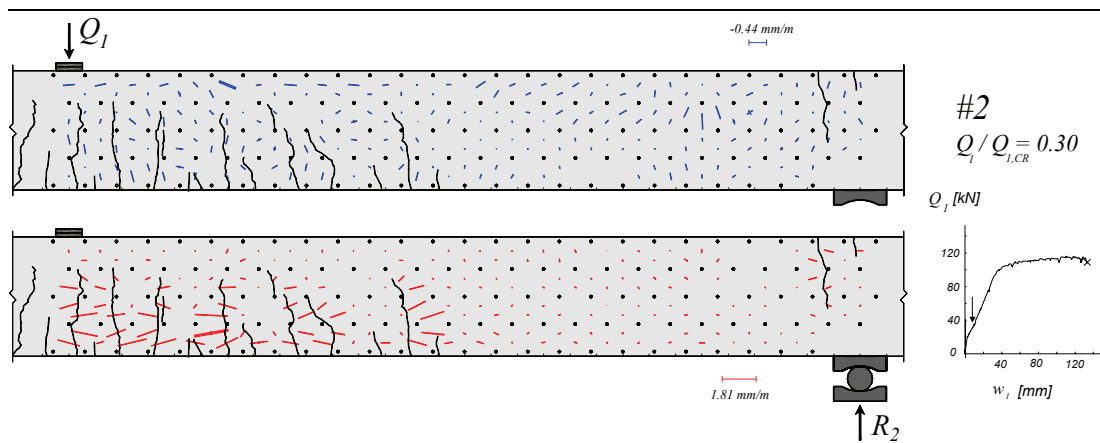


Figure B-4.37: Poutre SR8: (1) Déformations mesurées avec les jauges "oméga" ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre;
 (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

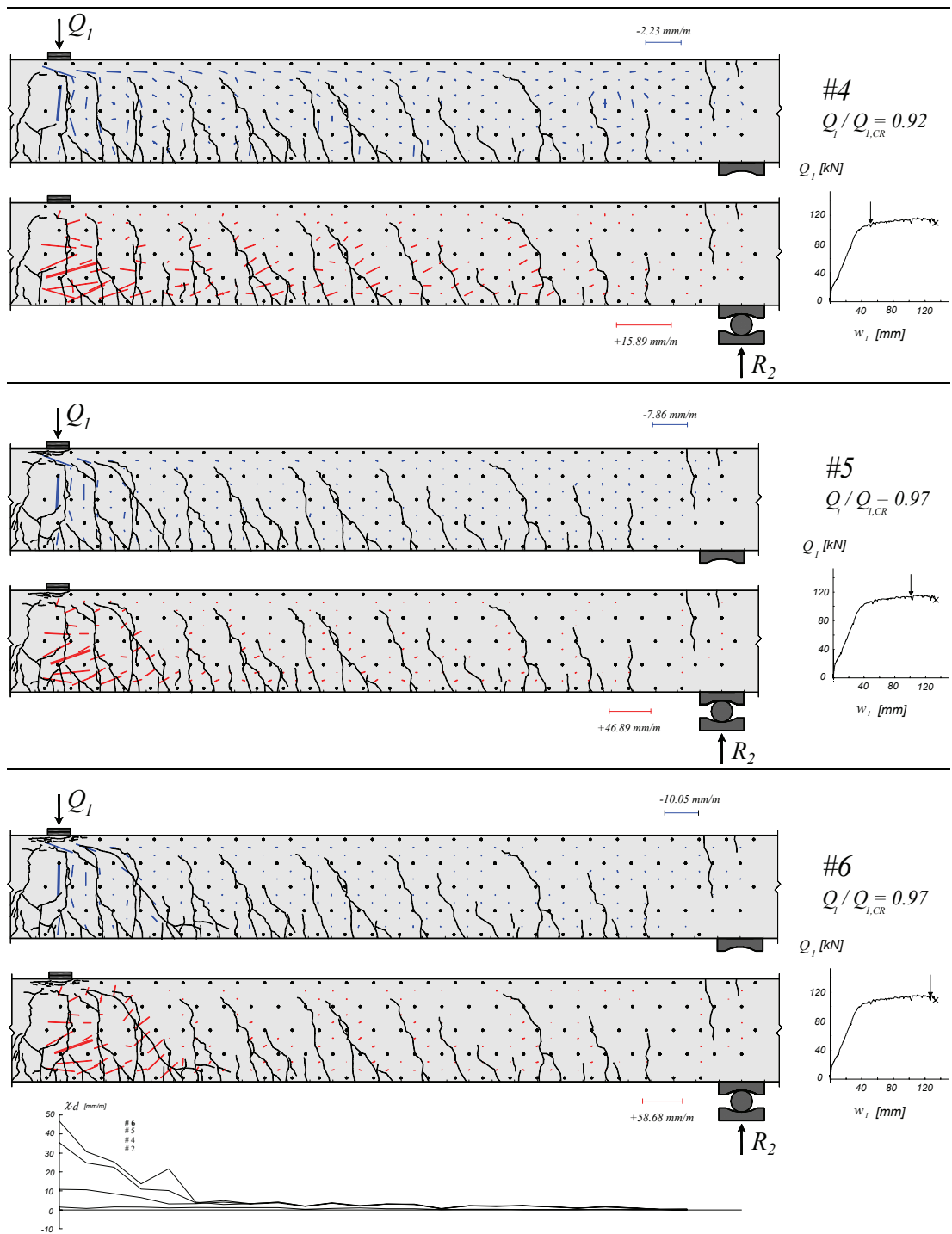


Figure B-4.38: Poutre SR8: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.9 Poutre SR9

La poutre SR9 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de +0.35. Pour un niveau de charge de $Q_1 = 125$ kN, une importante fissure d'effort tranchant s'est ouverte au droit de la section $cr2$, près de l'appui intermédiaire. Cette fissure n'a pas engendrée la rupture de la poutre, ni la perte totale de la charge appliquée (fig. B-4.41a). Après rechargement, une fissure inclinée s'est créée au droit de la section $cr1$, près de la charge Q_1 . Pour $Q_1 = 125$ kN, cette fissure s'est considérablement ouverte (plusieurs centimètres au niveau de l'armature tendue) et la charge a diminué à $Q_1 = 85$ kN environ (fig. B-4.41b). La charge de rupture est identifiée à $Q_1 = 125$ kN.

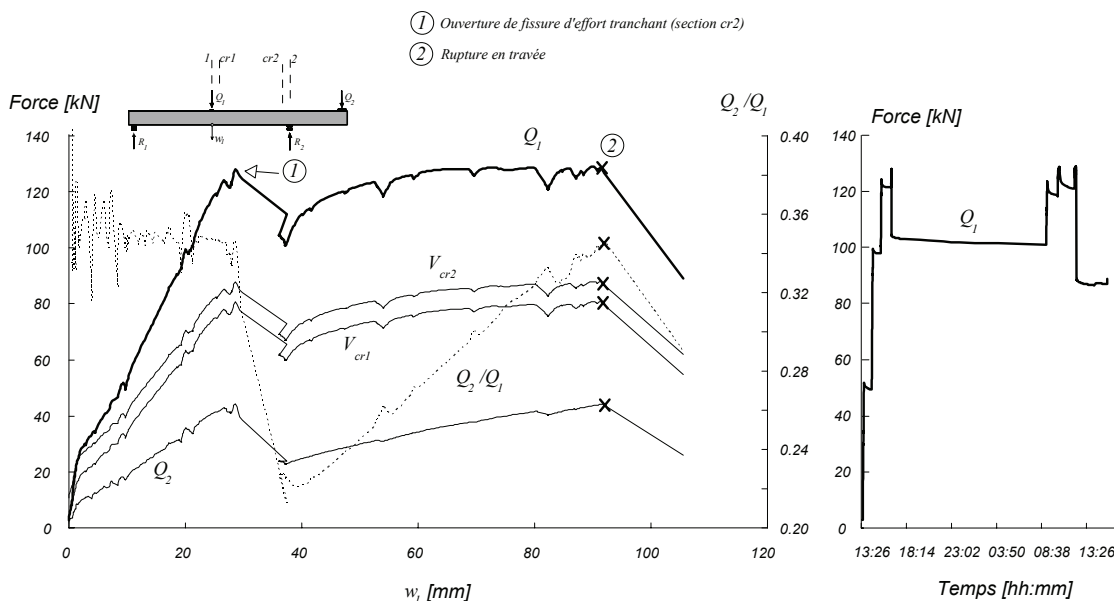


Figure B-4.39: Poutre SR9: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.12: Poutre SR9: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1 [kN]	Q_2 [kN]	Q_2/Q_1 -	M_1 [kN·m]	M_{cr1} [kN·m]	M_2 [kN·m]	M_{cr2} [kN·m]	V_1 [kN]	V_{cr1} [kN]	V_2 [kN]	V_{cr2} [kN]	Ω_{49} [mm]	Ω_{59} [mm]	w_1 [mm]	w_0 [mm]	$Q_1/Q_{1,CR}$ %	Rem. *
#0	2.8	1.9	0.68	11.4	10.7	-10.1	-8.3	-3.3	-3.7	-11.2	-10.9	0.00	0.00	0.00	0.00	2%	
#1	3.12	1.9	0.61	11.9	11.2	-10.1	-8.2	-3.4	-3.9	-11.4	-11.1	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#2	50.6	17.4	0.34	67.1	61.1	-39.9	-33.2	-32.4	-32.8	-40.3	-40.0	0.24	0.08	9.68	-4.43	41%	DP
	49.6	17.2	0.35	65.7	59.8	-39.6	-33.0	-31.8	-32.2	-39.7	-39.4					40%	FD
#3	49.4	17.2	0.35	65.4	59.5	-39.6	-33.0	-31.7	-32.1	-39.6	-39.3	0.25	0.08	9.72	-4.40	40%	FP
	98.9	35.5	0.36	120.8	109.2	-75.0	-63.4	-62.6	-63.0	-70.5	-70.2	0.24	0.14	20.16	-5.08	79%	DP
#4	98.0	35.2	0.36	119.7	108.2	-74.4	-62.9	-62.0	-62.4	-69.9	-69.6					79%	FD
	97.9	35.2	0.36	119.6	108.1	-74.3	-62.8	-61.9	-62.4	-69.9	-69.6	0.24	0.15	20.56	-5.02	79%	FP
CFAP	122.7	41.7	0.34	150.0	135.9	-86.8	-72.8	-76.5	-76.9	-84.5	-84.2	0.25	0.17	27.13	-6.65	99%	DP
	121.5	41.3	0.34	148.6	134.6	-86.1	-72.3	-75.8	-76.2	-83.7	-83.4					98%	FD
CR	121.4	41.3	0.34	148.5	134.5	-86.0	-72.2	-75.7	-76.2	-83.7	-83.4	0.24	0.17	27.65	-6.54	98%	FP
CFAP	124.5	38.3	0.31	156.0	142.0	-80.2	-66.2	-76.3	-76.7	-84.3	-84.0	0.51	0.15	29.71	-4.19	100%	CFAP
CR	126.5	43.8	0.35	153.5	138.9	-90.9	-76.5	-79.1	-79.5	-87.0	-86.7	0.24	0.16	92.07	-5.94	102%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CFAP : Ouverture de fissure d'effort tranchant à l'appui ; CR : Charge de rupture ;

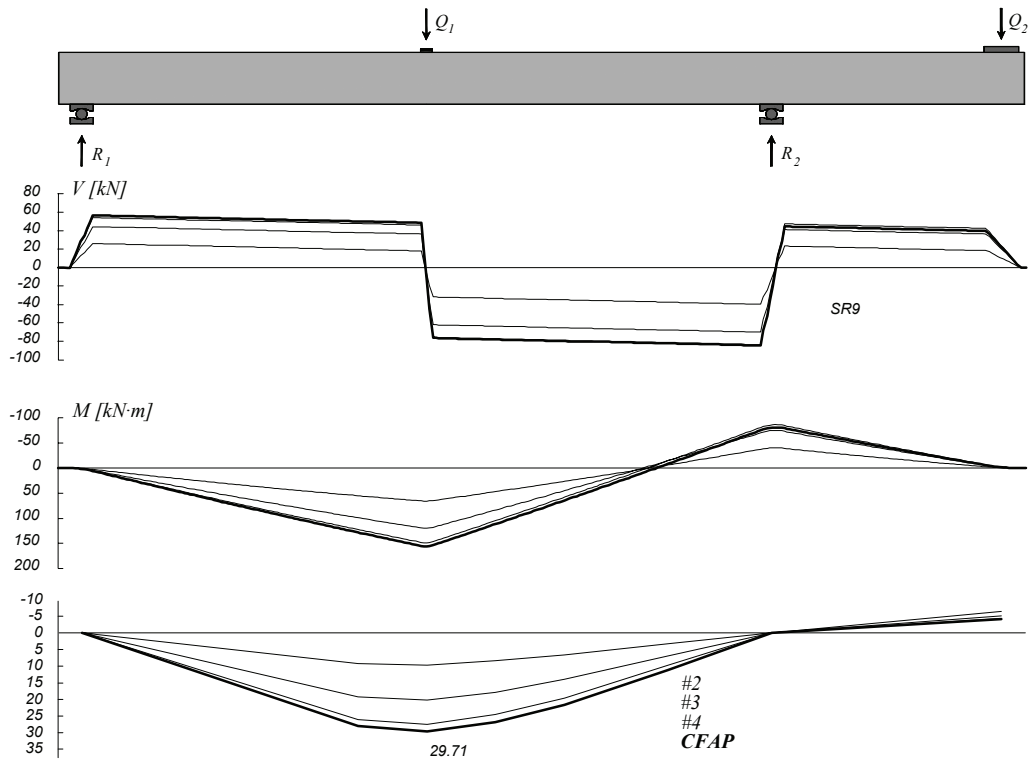


Figure B-4.40: Poutre SR9: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée

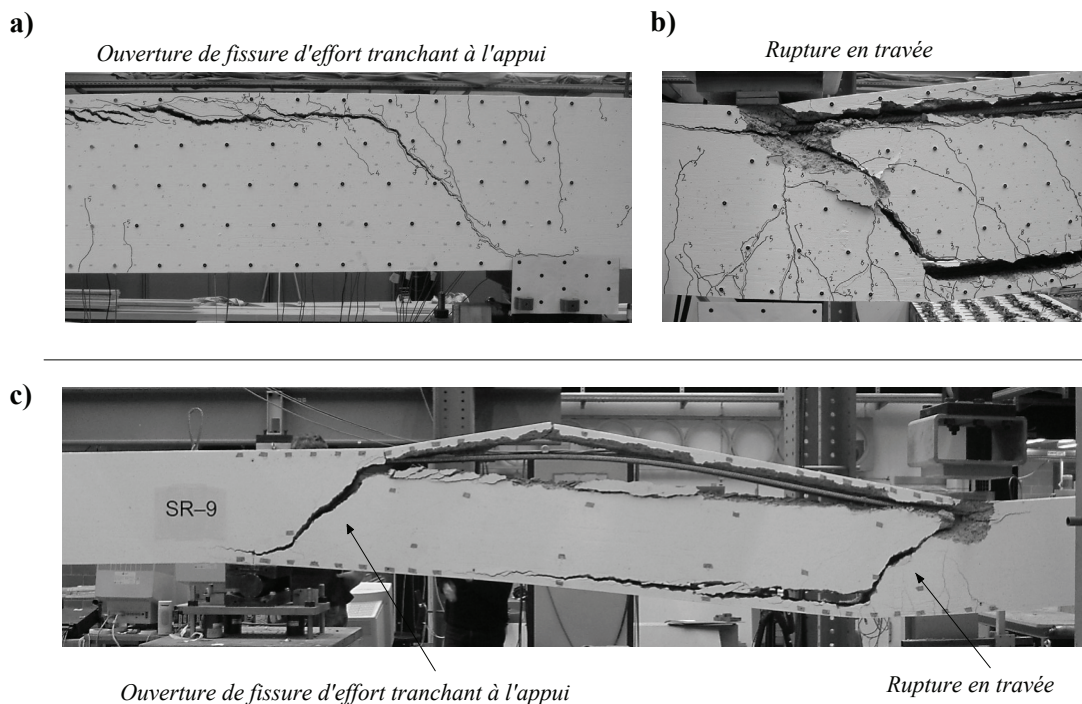


Figure B-4.41: Poutre SR9: a) Ouverture de fissure d'effort tranchant à l'appui ;
 b) Rupture en travée ; c) Vue d'ensemble après la fin de l'essai

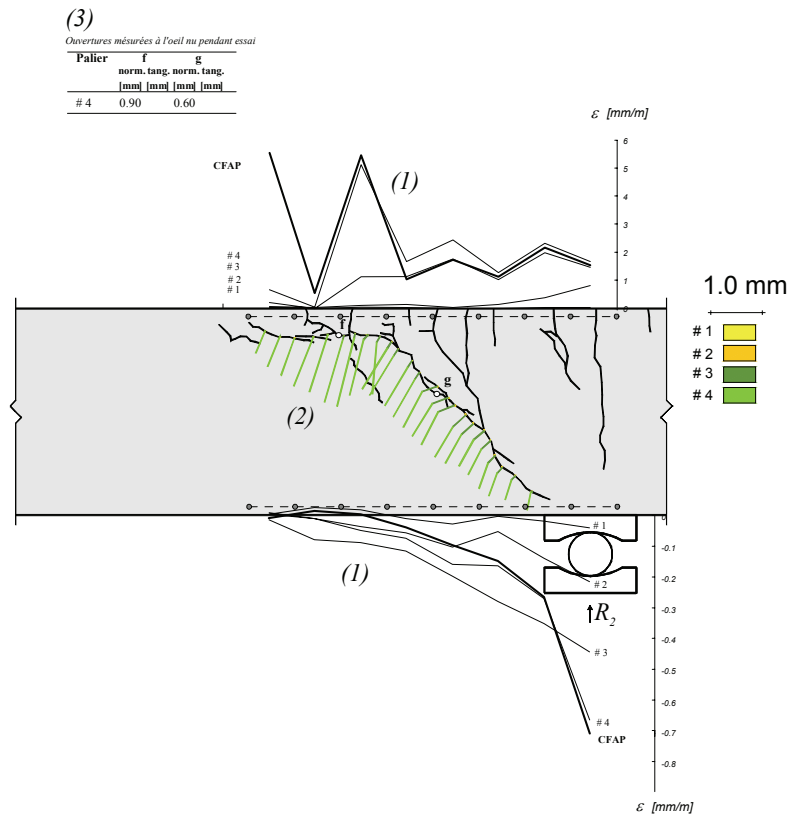
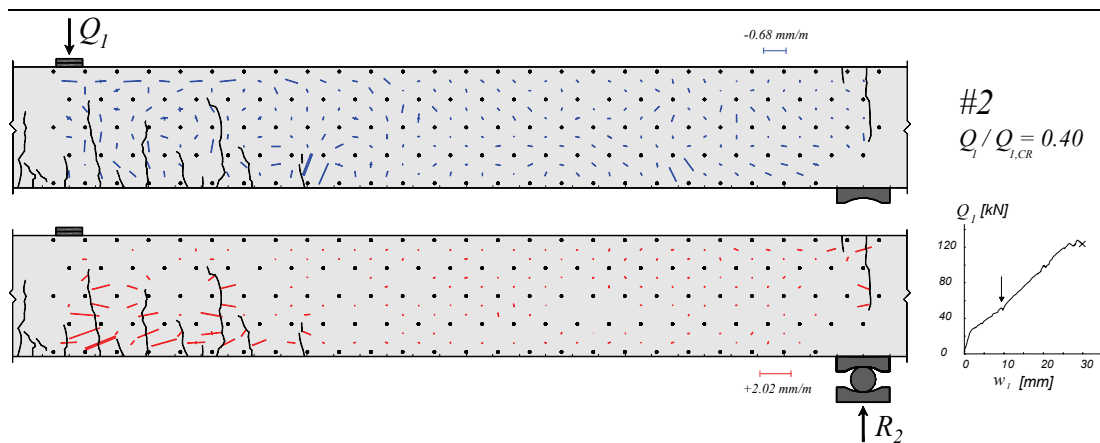


Figure B-4.42: Poutre SR9: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures
 au déformètre; (3) Ouverture mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

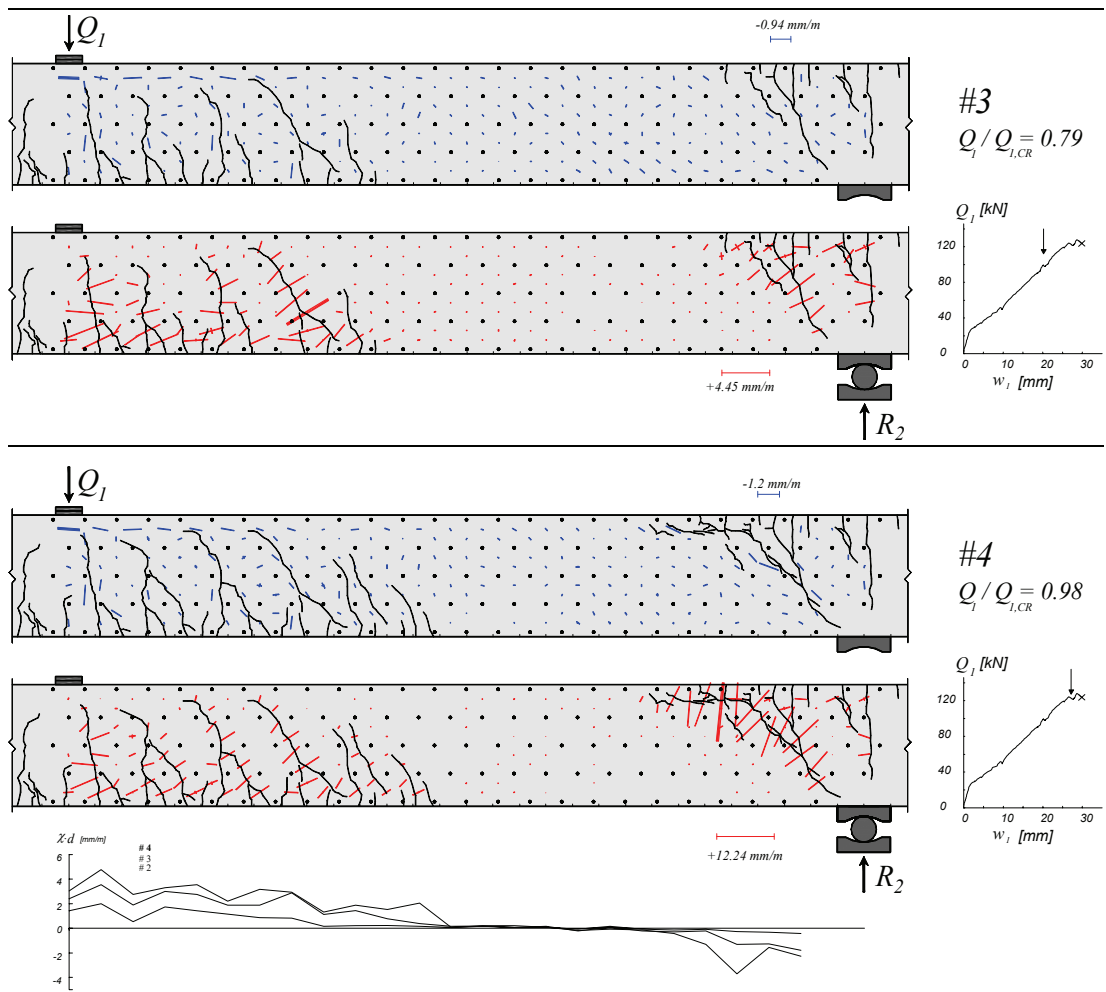


Figure B-4.43: Poutre SR9: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.10 Poutre SR10

La poutre SR10 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de -0.10. Le type de l'acier était laminé à chaud. Après un très grand plateau plastique, pour un niveau de charge de $Q_1 = 103$ kN et une flèche de $w_1 = 140$ mm, une importante fissure s'est ouverte à environ 20 cm de l'axe de la charge Q_1 . Par la suite la charge appliquée a diminuée à $Q_1 = 80$ kN environ et le béton d'enrobage au niveau de l'armature tendue a éclaté. La fissure n'a pas engendrée la rupture de la poutre, ni la perte totale de la charge appliquée (figs. B-4.44 et B-4.46).

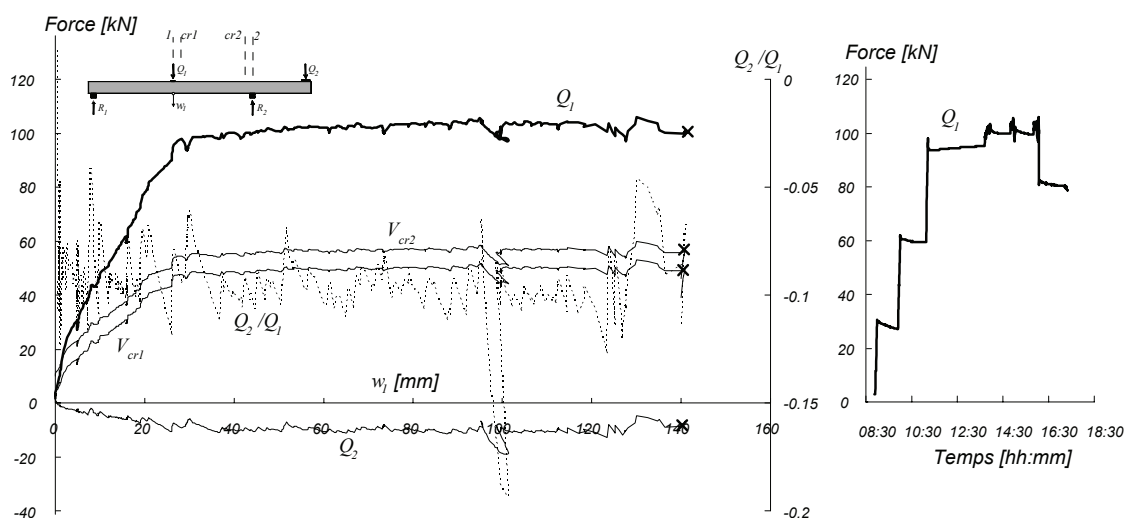


Figure B-4.44: Poutre S10: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.13: Poutre SR10: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1 [kN]	Q_2 [kN]	Q_2/Q_1 -	M_1 [kN·m]	M_{cr1} [kN·m]	M_2 [kN·m]	M_{cr2} [kN·m]	V_1 [kN]	V_{cr1} [kN]	V_2 [kN]	V_{cr2} [kN]	Ω_{49} [mm]	Ω_{59} [mm]	w_1 [mm]	w_0 [mm]	$Q_1/Q_{1,CR}$ %	Rem.
#0	1.2	0.5	0.42	10.4	10.0	-7.3	-5.7	-2.0	-2.5	-10.0	-9.7	0.00	0.00	0.00	0.00	1%	
#1	2.1	0.2	0.10	12.1	11.6	-6.7	-5.0	-2.4	-2.8	-10.3	-10.0	0.00	0.00	0.00	0.00	2%	
#2	29.7	-2.3	-0.08	55.6	52.8	-1.4	2.6	-15.3	-15.8	-23.3	-23.0	0.21	0.13	5.51	-5.10	29%	DP
	27.9	-2.73	-0.10	53.4	50.8	-0.6	3.3	-14.3	-14.7	-22.2	-22.0					28%	FD
#3	27.4	-3.0	-0.11	52.8	50.3	-0.2	3.6	-14.0	-14.4	-21.9	-21.6	0.22	0.13	5.63	-5.39	27%	FP
	60.8	-5.7	-0.09	105.2	99.9	5.6	12.3	-29.7	-30.2	-37.7	-37.4	0.72	0.28	17.14	-16.37	60%	DP
#4	59.5	-6	-0.10	103.7	98.4	6.2	12.8	-29.0	-29.4	-37.0	-36.7					59%	FD
	59.6	-5.9	-0.10	103.7	98.5	6.0	12.7	-29.1	-29.5	-37.0	-36.7	0.68	0.27	17.17	-16.54	59%	FP
#5	94.1	-8.1	-0.09	157.2	149.1	10.8	20.5	-45.6	-46.0	-53.5	-53.2	1.05	1.20	31.26	-29.10	93%	DP
	93.9	-7.2	-0.08	156.0	147.8	9.0	18.6	-45.8	-46.2	-53.8	-53.5					93%	FD
#6	95.0	-6.0	-0.06	156.6	148.1	6.7	16.5	-46.8	-47.2	-54.7	-54.4	1.05	1.31	32.06	-29.19	94%	FP
	100.7	-8.7	-0.09	167.7	159.0	12.1	22.3	-48.7	-49.1	-56.7	-56.4	6.10	4.60	91.79	-69.78	99%	DP
#7	99.4	-8.3	-0.08	165.3	156.7	11.2	21.3	-48.2	-48.6	-56.1	-55.8					98%	FD
	99.8	-8.1	-0.08	165.7	157.0	10.9	21.1	-48.4	-48.9	-56.4	-56.1	6.11	4.61	92.15	-69.91	99%	FP
#8	101.4	-9.5	-0.09	169.5	160.7	13.6	23.9	-48.8	-49.2	-56.7	-56.4	>10.0	5.07	126.3	-94.46	100%	DP
	99.7	-9.4	-0.09	166.9	158.3	13.4	23.5	-48.0	-48.4	-55.9	-55.6					98%	FD
#9	99.4	-9.5	-0.10	166.5	158.0	13.6	23.7	-47.8	-48.2	-55.7	-55.4	>10.0	5.08	126.5	-94.57	98%	FP
CM	105.8	-4.9	-0.05	171.5	162.0	4.5	15.4	-52.5	-53.0	-60.5	-60.2	>10.0	5.17	130.2	-	105%	CM
CR	101.3	-6.8	-0.07	166.6	157.7	8.3	18.6	-49.6	-50.0	-57.6	-57.3	>10.0	5.18	140.9	-	100%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

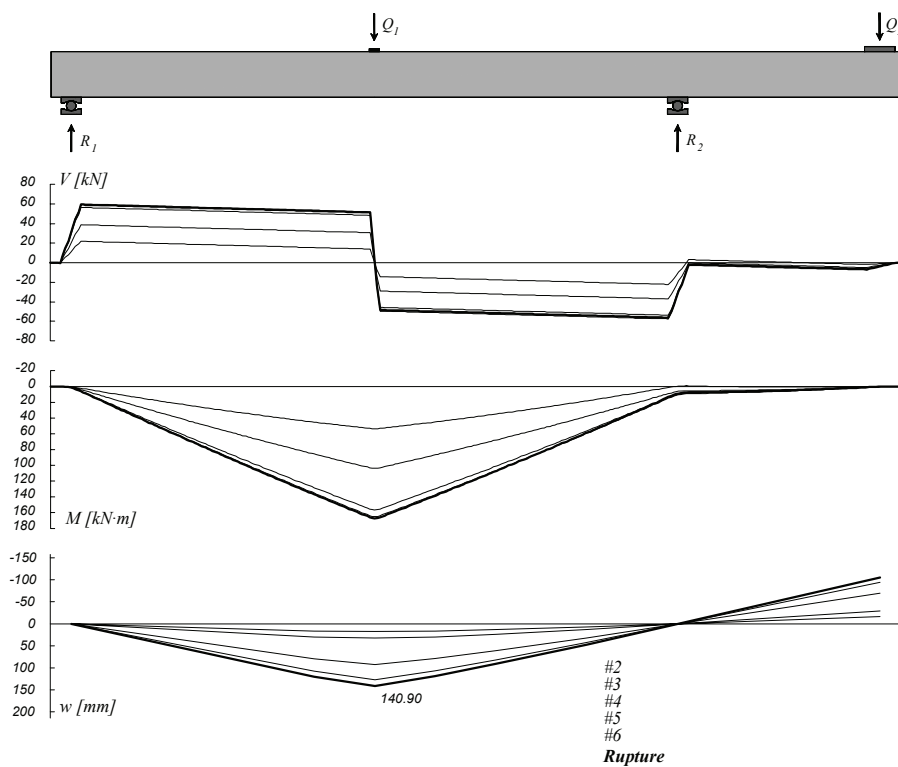
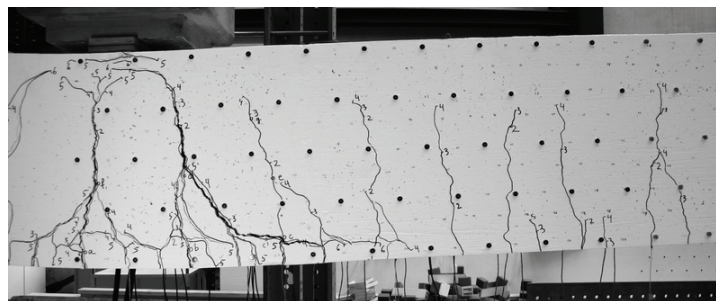
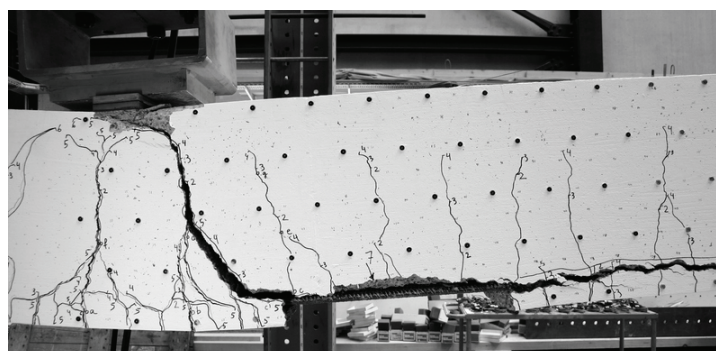


Figure B-4.45: Poutre SR10: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée



6
 $Q_1 / Q_{I,CR} = 0.98$



Rupture

Figure B-4.46: Poutre SR10: Fissuration avant rupture en travée (palier 6) et après rupture

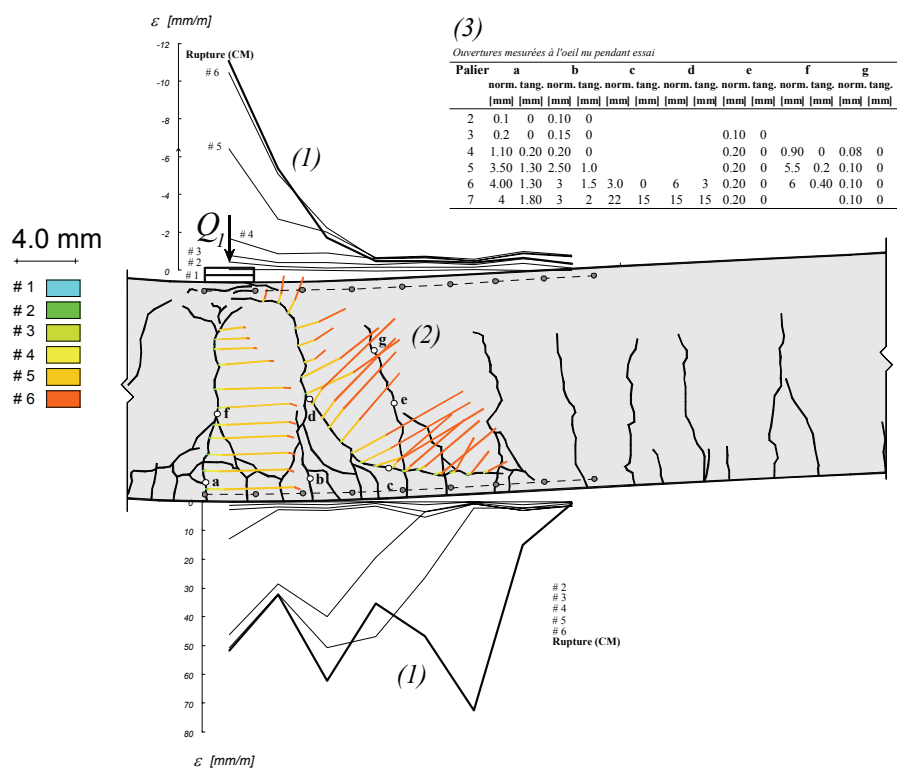
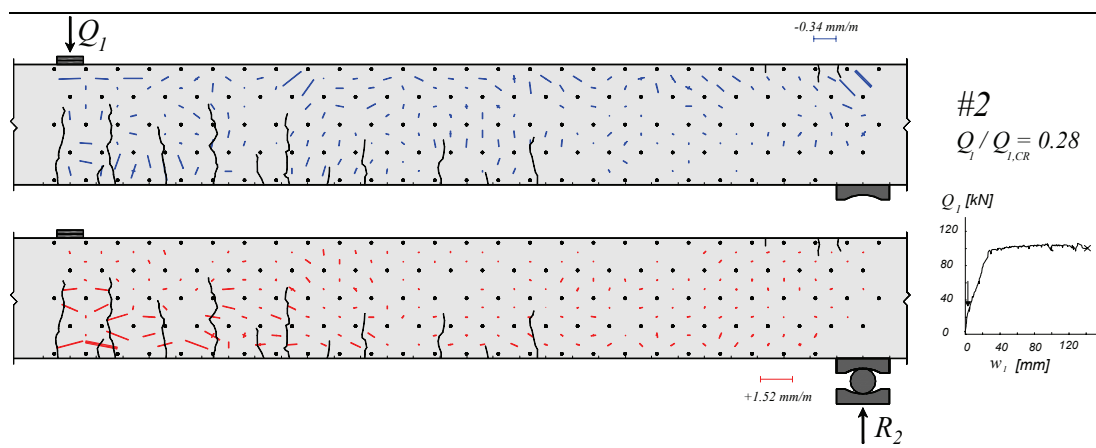


Figure B-4.47: Poutre SR10: (1) Déformations mesurées avec les jauges "oméga" ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

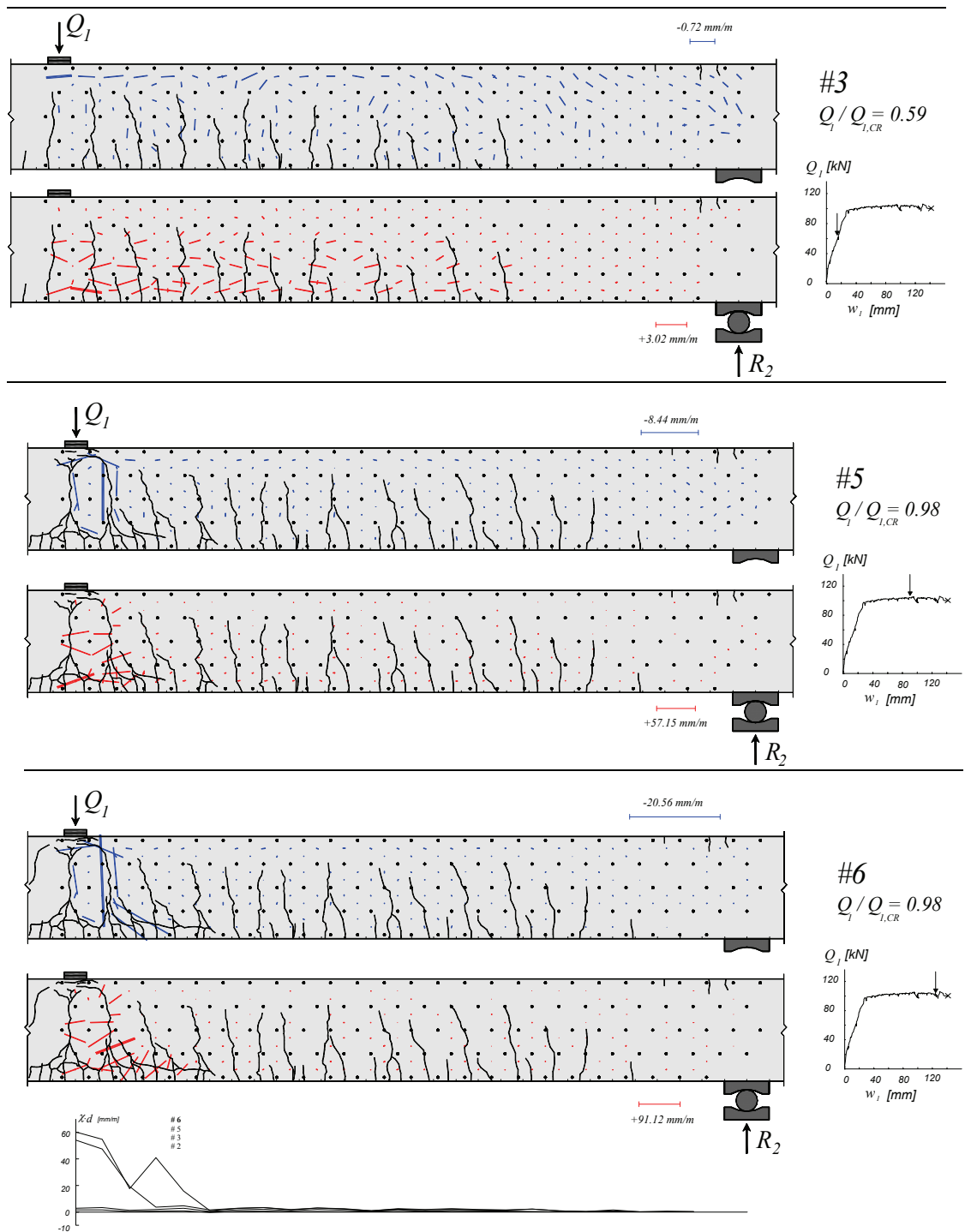


Figure B-4.48: Poutre SR10: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.11 Poutre SR11

La poutre SR11 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 ciblé de +0.35. Le type de l'acier était laminé à chaud. La rupture observée a été une rupture à l'effort tranchant très fragile (fig. B-4.51), dans la région proche de l'appui intermédiaire avec des ouvertures des fissures très petites. L'ouverture des fissures estimées au palier précédent la rupture est de l'ordre de 0.2 mm (voir figure B-4.52). Le comportement observé a été similaire à celui de la poutre SR2.

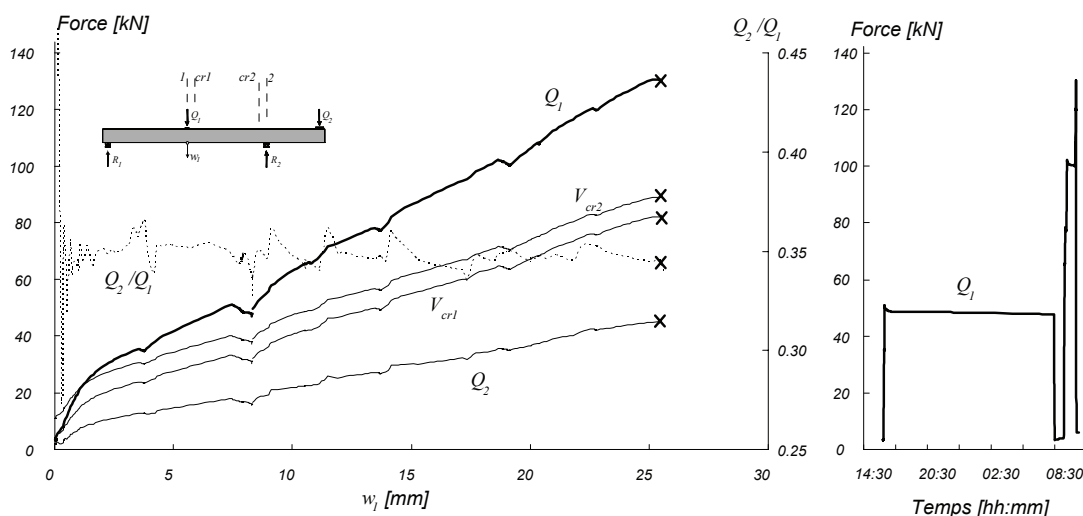


Figure B-4.49: Poutre SR11: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.14: Poutre SR11: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1 [kN]	Q_2 [kN]	Q_2/Q_1 -	M_1 [kN·m]	M_{cr1} [kN·m]	M_2 [kN·m]	M_{cr2} [kN·m]	V_1 [kN]	V_{cr1} [kN]	V_2 [kN]	V_{cr2} [kN]	Ω_{49} [mm]	Ω_{59} [mm]	w_1 [mm]	w_0 [mm]	$Q_1/Q_{1,CR}$ %	Rem. *
#0	3.3	1.7	0.52	12.4	11.7	-9.7	-7.8	-3.5	-3.9	-11.4	-11.1	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#1	3.4	2	0.59	12.2	11.5	-10.3	-8.4	-3.6	-4.1	-11.6	-11.3	0.00	0.00	0.00	0.00	3%	
#2	48.5	16.9	0.35	64.4	58.6	-39.0	-32.6	-31.1	-31.6	-39.1	-38.8	10.00	0.11	7.94	-2.61	37%	DP
	48.6	16.9	0.35	64.5	58.7	-39.0	-32.5	-31.2	-31.6	-39.1	-38.8					37%	FD
	48.5	16.9	0.35	64.4	58.6	-39.0	-32.6	-31.1	-31.6	-39.1	-38.8	10.00	0.11	8.01	-2.63	37%	FP
#3	3.5	1.6	0.45	12.8	12.1	-9.4	-7.5	-3.5	-4.0	-11.5	-11.2	10.00	0.07	3.41	-1.02	3%	DP
	4.0	1.6	0.40	13.5	12.7	-9.5	-7.6	-3.8	-4.2	-11.7	-11.4					3%	FD
	4.0	1.6	0.39	13.5	12.8	-9.4	-7.5	-3.8	-4.2	-11.7	-11.4	10.00	0.07	3.38	-1.05	3%	FP
#4	101.5	35.4	0.35	124.7	112.9	-74.8	-63.0	-63.8	-64.2	-71.8	-71.5	10.00	0.23	18.86	-3.87	78%	DP
	100.4	35.1	0.35	123.4	111.7	-74.1	-62.4	-63.2	-63.6	-71.1	-70.8					77%	FD
	100.2	35.1	0.35	123.1	111.4	-74.1	-62.4	-63.1	-63.5	-71.0	-70.7	10.00	0.23	19.17	-3.74	77%	FP
CM	130.6	45.1	0.35	158.3	143.2	-93.5	-78.7	-81.6	-82.0	-89.5	-89.3	0.34	0.27	25.44	-5.06	100%	CM
CR	130.6	45.1	0.35	158.3	143.2	-93.5	-78.7	-81.6	-82.0	-89.5	-89.3	0.34	0.27	25.44	-5.06	100%	CR

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

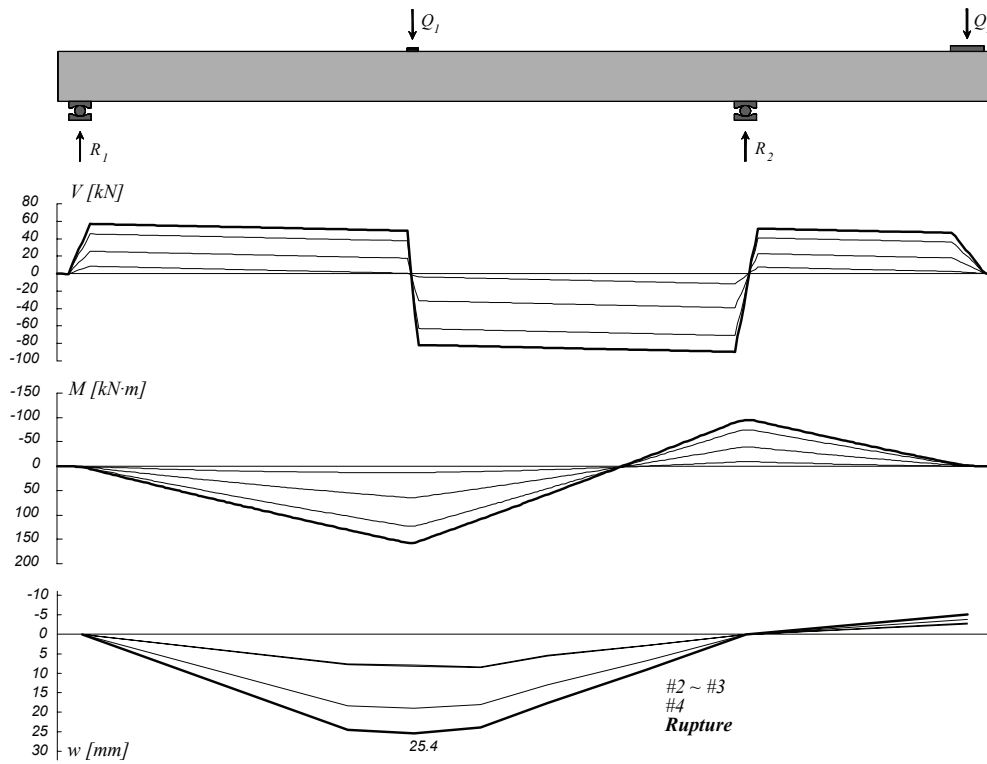
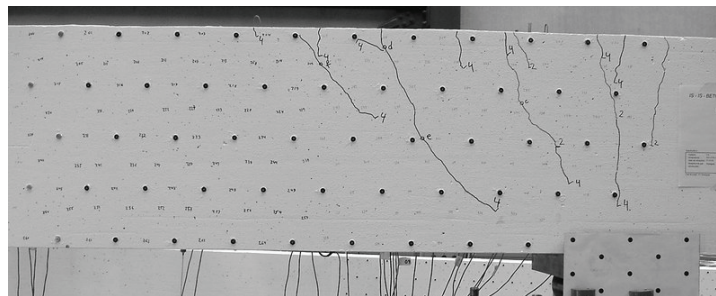
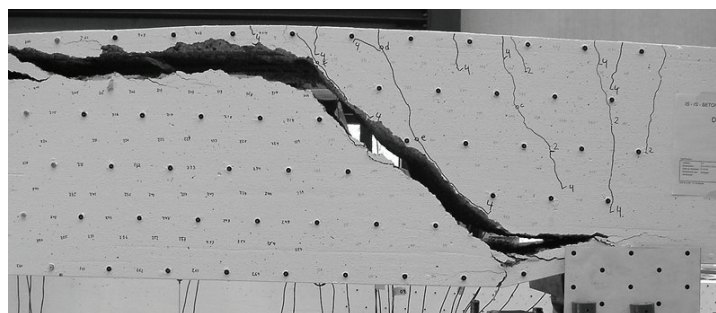


Figure B-4.50: Poutre SR11: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée



4
 $Q_1 / Q_{I,CR} = 0.77$



Rupture

Figure B-4.51: Poutre SR11: Fissuration avant rupture à l'appui (palier 4) et après rupture

Chapitre B-4

(3)

Ouvertures mesurées à l'oeil nu pendant essai

Palier	a		b		c		d		e		f	
	norm.	tang.	norm.	tang.	norm.	tang.	norm.	tang.	norm.	tang.	norm.	tang.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2	0.10	0	0.10	0	0.05	0						
3	0.05	0	0.02	0	0.02	0						
4	0.20	0	0.15	0	0.20	0	0.20	0	0.20	0	0.10	0

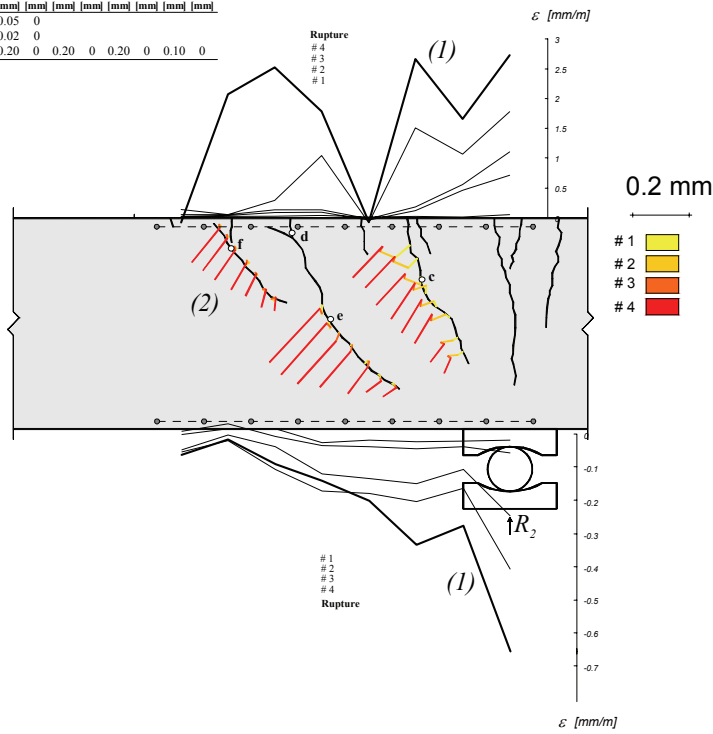
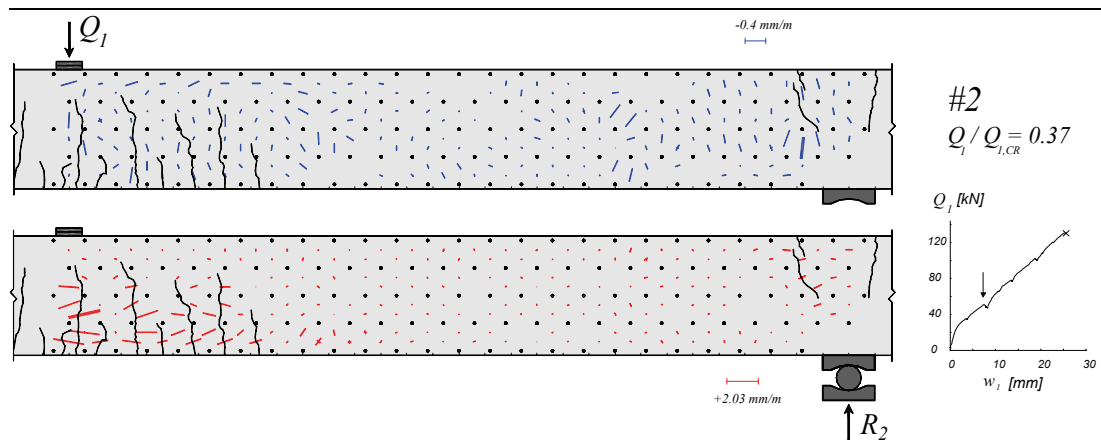


Figure B-4.52: Poutre SR11: (1) Déformations mesurées avec les jauges “oméga” ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l’œil nu pendant l’essai



Suite page suivante

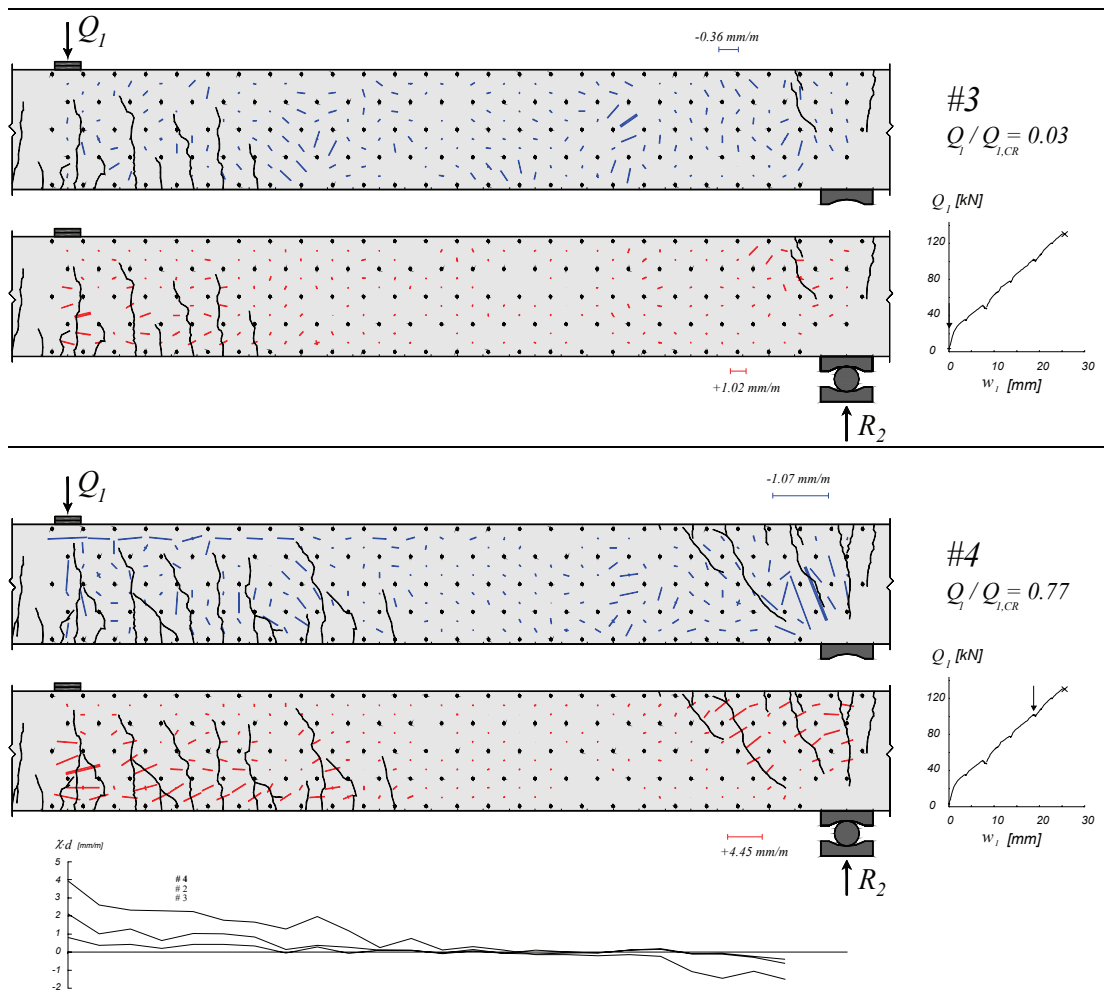


Figure B-4.53: Poutre SR11: déformations principales, fissuration et courbures

B-4.12 Poutre SR12

La poutre SR12 a été testée avec un rapport Q_2/Q_1 de +0.20. Le type de l'acier était laminé à chaud. Après un très grand plateau plastique, pour un niveau de charge de $Q_1 = 131$ kN et une flèche de $w_1 = 150$ mm, une importante fissure s'est ouverte à la proximité de la charge Q_1 . Par la suite la charge appliquée a diminuée à $Q_1 = 100$ kN environ et le béton d'enrobage au niveau de l'armature tendue a éclaté. La fissure n'a pas engendrée la rupture de la poutre, ni la perte totale de la charge appliquée (figs. B-4.54 et B-4.56).

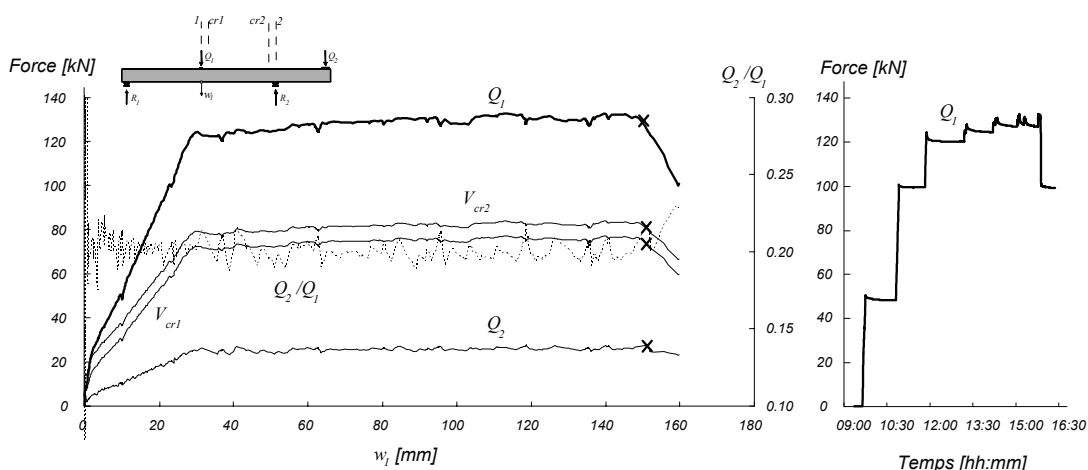


Figure B-4.54: Poutre SR12: Diagramme charge – flèche et évolution dans le temps

Tableau B-4.15: Poutre SR12: Evolution des valeurs mesurées et calculées

Palier	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	M_1	M_{cr1}	M_2	M_{cr2}	V_1	V_{cr1}	V_2	V_{cr2}	Ω_{49}	Ω_{59}	w_1	w_0	$Q_1/Q_{1,CR}$	Rem.	
	[kN]	[kN]	-	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN·m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	%	*	
#0	2.5	1.8	0.72	11.1	10.4	-9.9	-8.1	-3.1	-3.5	-11.1	-10.8	0.00	0.00	0.00	0.00	2%		
#1	2.8	1.8	0.64	11.5	10.9	-9.9	-8.1	-3.3	-3.7	-11.2	-10.9	0.00	0.00	0.00	0.00	2%		
#2	49.8	10.3	0.21	73.0	67.5	-26.0	-19.7	-29.6	-30.0	-37.5	-37.3	0.61	0.14	9.75	-6.96	38%	DP	
	48.5	10.3	0.21	71.0	65.7	-26.0	-19.8	-28.9	-29.4	-36.9	-36.6						37%	FD
	48.6	10.4	0.21	71.0	65.7	-26.2	-20.0	-29.0	-29.4	-37.0	-36.7	0.60	0.14	9.86	-6.82	37%	FP	
#3	99.9	20.3	0.20	137.5	126.9	-45.0	-33.8	-58.0	-58.4	-65.9	-65.6	1.09	0.27	23.01	-15.19	76%	DP	
	99.5	20.5	0.21	136.7	126.0	-45.4	-34.3	-57.8	-58.3	-65.8	-65.5						76%	FD
	99.6	20.5	0.21	136.7	126.1	-45.5	-34.3	-57.9	-58.3	-65.8	-65.5	1.11	0.27	23.34	-15.13	76%	FP	
#4	121.8	25.1	0.21	165.3	152.3	-54.2	-40.9	-70.5	-71.0	-78.5	-78.2	2.60	2.02	36.29	-22.25	93%	DP	
	120.5	25.2	0.21	163.2	150.4	-54.4	-41.2	-69.9	-70.3	-77.9	-77.6						92%	FD
	120.5	25.3	0.21	163.1	150.3	-54.7	-41.5	-70.0	-70.4	-77.9	-77.6	2.68	2.14	37.01	-22.25	92%	FP	
#5	126.2	26.1	0.21	170.8	157.4	-56.2	-42.4	-73.1	-73.5	-81.0	-80.7	5.97	3.53	62.11	-38.06	96%	DP	
	124.9	26.16	0.21	168.8	155.5	-56.2	-42.6	-72.4	-72.9	-80.4	-80.1						95%	FD
	124.6	26.1	0.21	168.5	155.2	-56.1	-42.5	-72.3	-72.7	-80.2	-79.9	5.72	3.59	62.66	-38.14	95%	FP	
#6	128.4	27.0	0.21	173.1	159.5	-57.9	-44.0	-74.5	-74.9	-82.4	-82.1	8.81	4.40	95.28	-59.61	98%	DP	
	127.6	27.1	0.21	171.9	158.3	-58.1	-44.2	-74.1	-74.5	-82.0	-81.7						97%	FD
	127.2	27.1	0.21	171.3	157.8	-58.0	-44.1	-73.9	-74.3	-81.8	-81.5	8.83	4.43	95.64	-59.64	97%	FP	
#7	128.2	26.1	0.20	173.8	160.2	-56.1	-42.2	-74.1	-74.5	-82.0	-81.7	10.00	4.89	135.2	-86.23	98%	DP	
	127.2	26.3	0.21	172.1	158.6	-56.5	-42.7	-73.6	-74.1	-81.6	-81.3						97%	FD
	127.2	26.3	0.21	172.0	158.5	-56.5	-42.7	-73.6	-74.0	-81.6	-81.3	10.00	4.91	135.5	-86.27	97%	FP	
CM	132.7	27.2	0.21	179.3	165.3	-58.3	-43.9	-76.7	-77.1	-84.6	-84.4	10.00	4.98	139.70	-88.90	101%	CM	
CR	131.5	26.9	0.20	177.8	163.9	-57.7	-43.5	-76.0	-76.4	-83.9	-83.6	10.00	5.18	148.23	-94.37	100%	CR	

* DP : Début du palier ; FD : Fin des mesures avec le déformètre ; FP : Fin du palier ; CM : Charge maximale ; CR : Charge de rupture ;

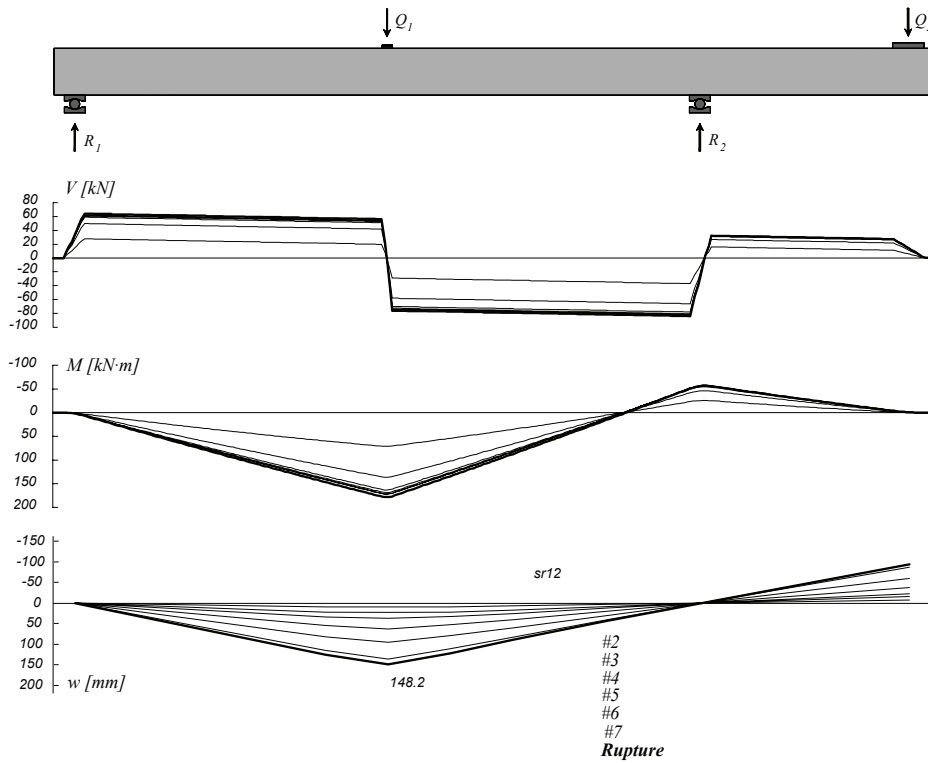
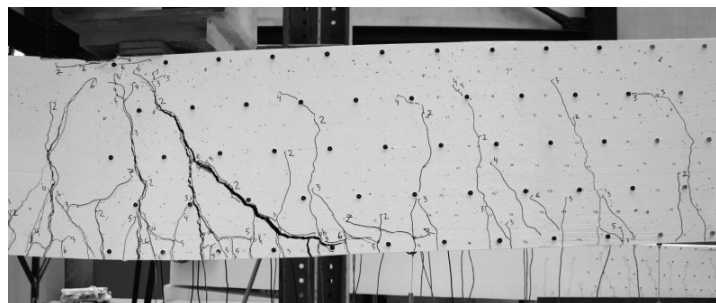
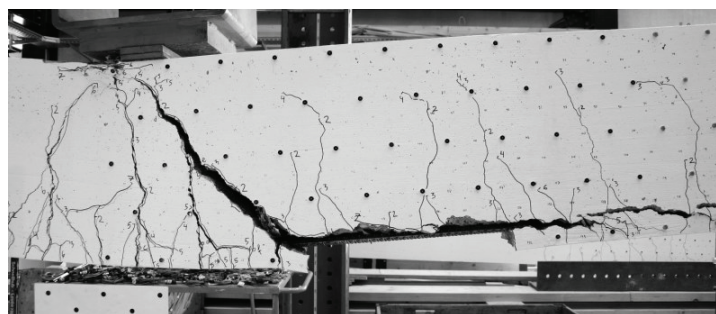


Figure B-4.55: Poutre SR12: Diagramme des efforts tranchants, diagramme des moments de flexion et déformée



7
 $Q_1 / Q_{I,CR} = 0.97$



Rupture

Figure B-4.56: Poutre SR12: Fissuration avant rupture en travée (palier 7) et après rupture

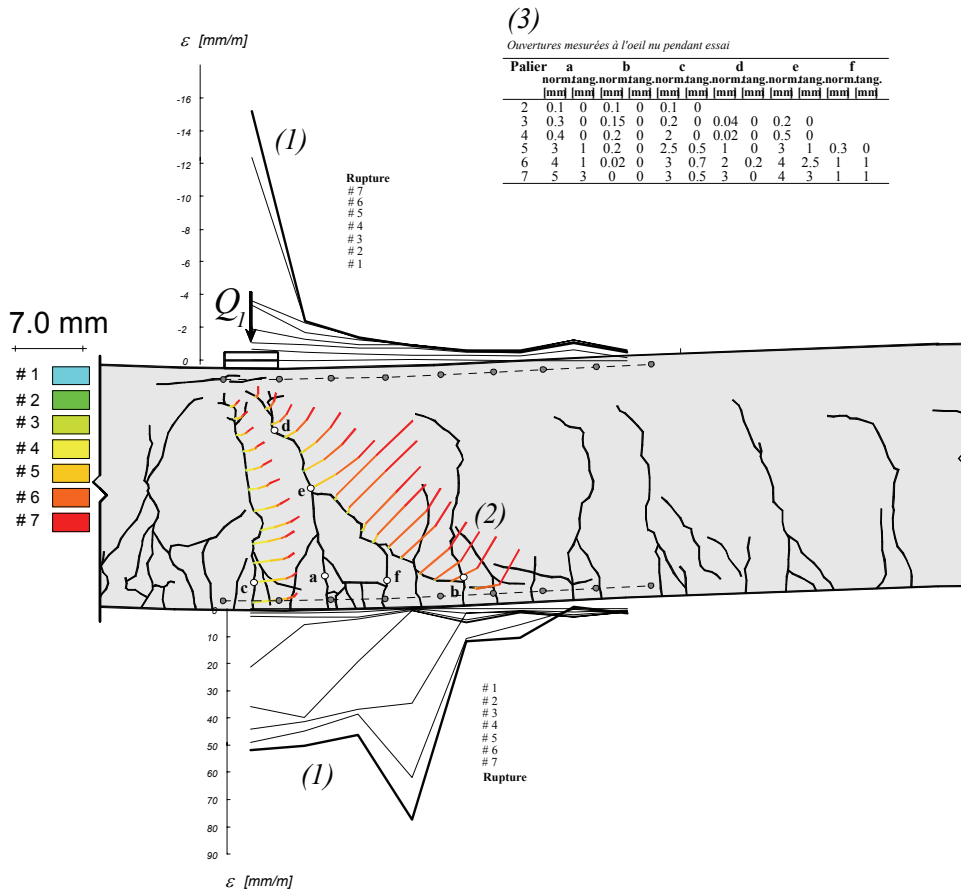
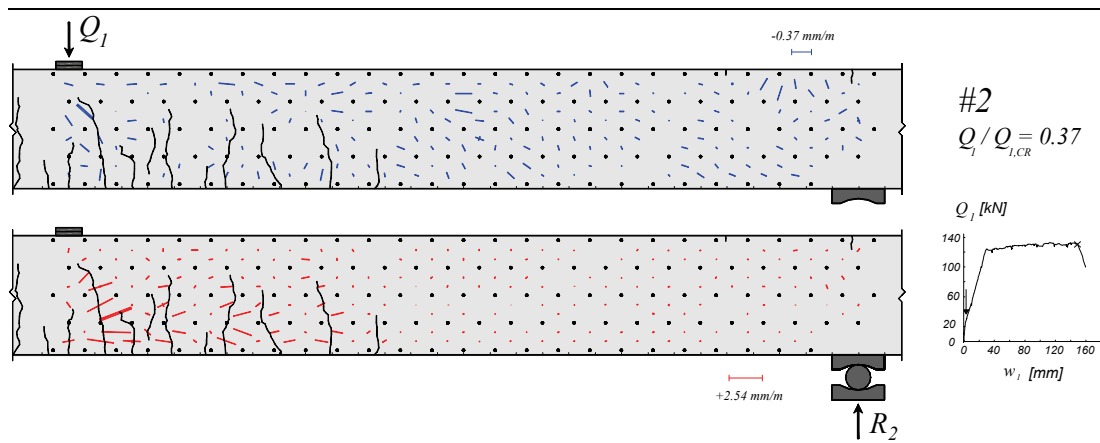


Figure B-4.57: (1) Déformations mesurées avec les jauges "oméga" ;
 (2) Déplacement relatif entre les 2 lèvres des fissures, calculé avec les mesures au déformètre; (3) Ouvertures mesurées à l'œil nu pendant l'essai



Suite page suivante

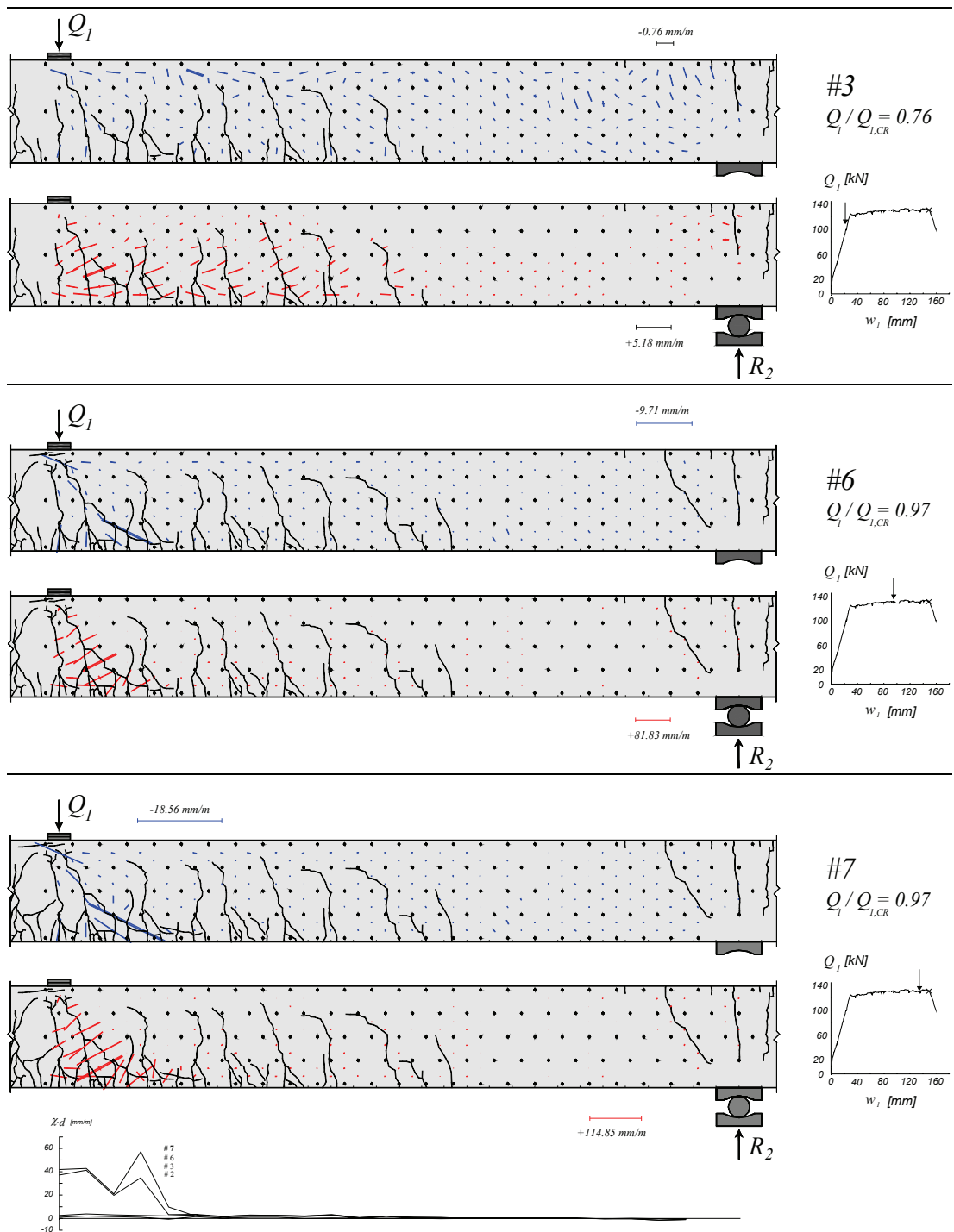


Figure B-4.58: Poutre SR12: déformations principales, fissuration et courbures

B-5 Comparaison des essais

Une vue d'ensemble de tous les essais réalisés est montrée à la figure B-5.2. Les variables suivantes sont utilisées pour comparer les essais.

- Le rapport entre la résistance à l'effort tranchant (τ_R) et la résistance nominale au cisaillement (τ_c).
- La rotation θ de la poutre calculée à la région de rupture (fig B-5.1).

La résistance à l'effort tranchant (τ_R) est définie à l'équation B-5.1 et la résistance nominale τ_c est définie à l'équation B-5.2. La comparaison entre poutres avec bétons de différentes résistances à la compression est ainsi possible.

$$\tau_R = \frac{V_R}{b \cdot d} \quad (\text{B-5.1})$$

$$\tau_c = 0.3 \cdot \sqrt{f_c} \quad (\text{B-5.2})$$

L'effort tranchant résistant (V_R) dans l'équation B-5.1 est calculé avec la contribution des charges Q_1 et Q_2 et avec la contribution du poids propre. Les sections $cr1$ et $cr2$ de calcul de V_R sont indiquées à la figure B-5.1. La section critique se situe à une distance de $0.5 \cdot d$ de l'axe de la force Q_1 (section $cr1$) ou de la réaction R_2 (section $cr2$). La section $cr1$ est utilisée pour des poutres avec rupture en travée et la section $cr2$ pour des poutres avec rupture en appui.

La rotation θ est calculée en intégrant les allongements horizontaux mesurés aux fibres inférieure et supérieure avec les jauges "oméga". Le calcul est fait en travée ou en appui selon la position de la section de rupture. La distance d'intégration vaut 800 mm, soit $1.96 \cdot d$ (fig. B-5.1).

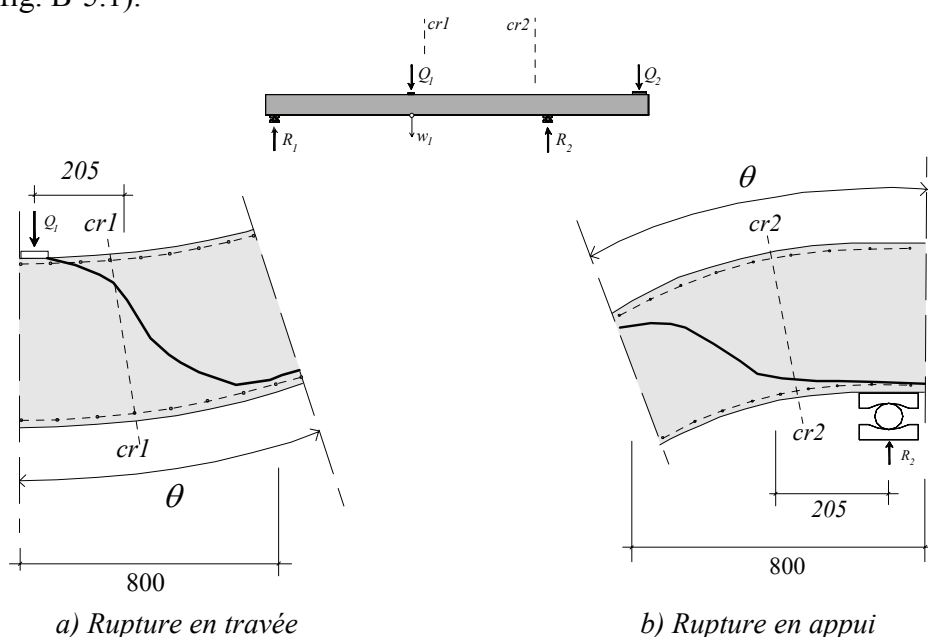


Figure B-5.1: Position de la section de calcul de V_R et définition de la rotation θ , [mm]

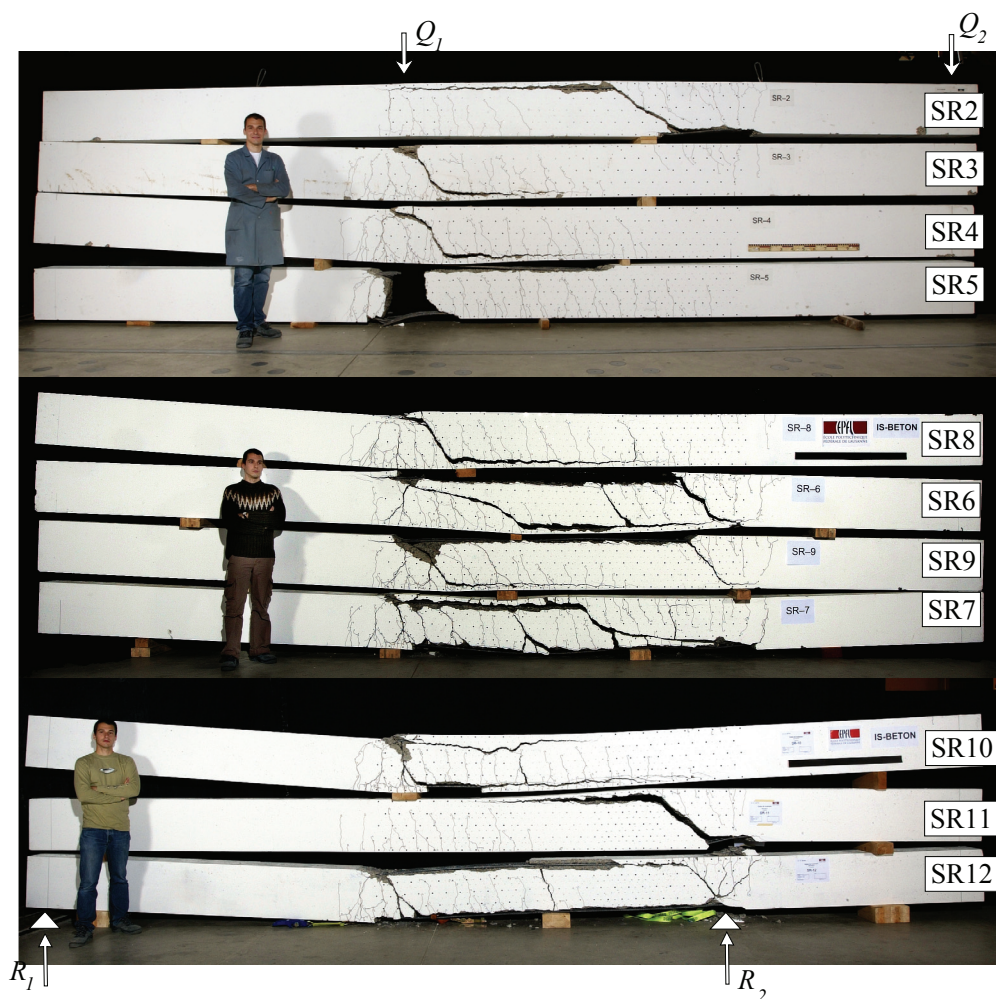


Figure B-5.2: Vue d'ensemble de toutes les poutres testées

Le tableau B-5.1 indique les valeurs à la rupture pour toutes les poutres testées. La flèche w_l est indiquée à la figure B-5.1. La portée de cisaillement équivalente a a été calculée avec considération du poids propre et avec les charges Q_1 et Q_2 à la rupture. Le moment M_R est calculé à la section de rupture avec la contribution des charges Q_1 et Q_2 et la contribution du poids propre (fig. B-5.1).

Tableau B-5.1: Comparaison des essais. Valeurs à la rupture

Essai	$Q_{1,CR}$ [kN]	$Q_{2,CR}$ [kN]	$w_{l,CR}$ [mm]	M_R [kN·m]	V_R [kN]	τ_R [MPa]	f_c [MPa]	τ_c [MPa]	τ_R/τ_c	θ_R [mrad]	a [m]	a/d	Type de Rupture	Endroit de Rupture
SR2	124.1	62.4	19.21	-112.8	-91.8	0.897	43.11	1.970	0.456	3.2	1.46	3.56	V	Appui
SR3	130.0	27.6	69.52-73.32	161.1	-75.9	0.742	50.62	2.134	0.348	30.1	2.25	5.50	V	Travée
SR4	115.2	0.0	110.43	169.9	-59.3	0.580	47.55	2.069	0.280	40.0	2.90	7.09	V	Travée
SR5	96.1	-18.7	195.95	163.1	-43.5	0.425	47.64	2.071	0.205	68.1	3.59	8.77	M	Travée
SR6	148.0	85.6	56.47	124.2	-104.2	1.019	52.71	2.178	0.468	18.6	1.38	3.37	V	Travée
SR7	139.9	71.3	176.43	-128.4	-102.6	1.004	49.11	2.102	0.477	8.6	1.48	3.61	V	Appui
SR8	107.5	-11.0	133.11	170.8	-51.8	0.506	49.16	2.103	0.241	47.2	3.25	7.96	V	Travée
SR9	126.5	43.8	92.07	138.9	-79.5	0.778	52.82	2.180	0.357	29.7	1.90	4.65	V	Travée
SR10	101.3	-6.8	140.90	157.7	-50.1	0.490	42.41	1.954	0.251	76.3	3.12	7.62		Travée
SR11	130.6	45.1	25.44	-78.7	-89.3	0.873	42.91	1.965	0.444	3.6	1.10	2.68	V	Appui
SR12	131.5	26.9	148.23	163.9	-76.4	0.747	43.51	1.979	0.378	> 55.8	2.27	5.56		Travée

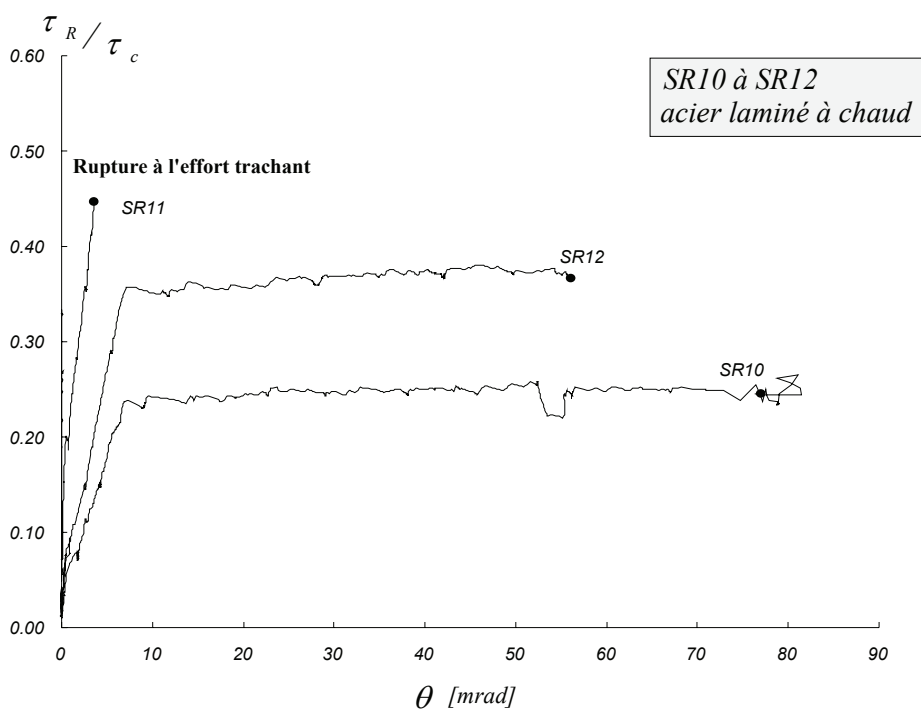
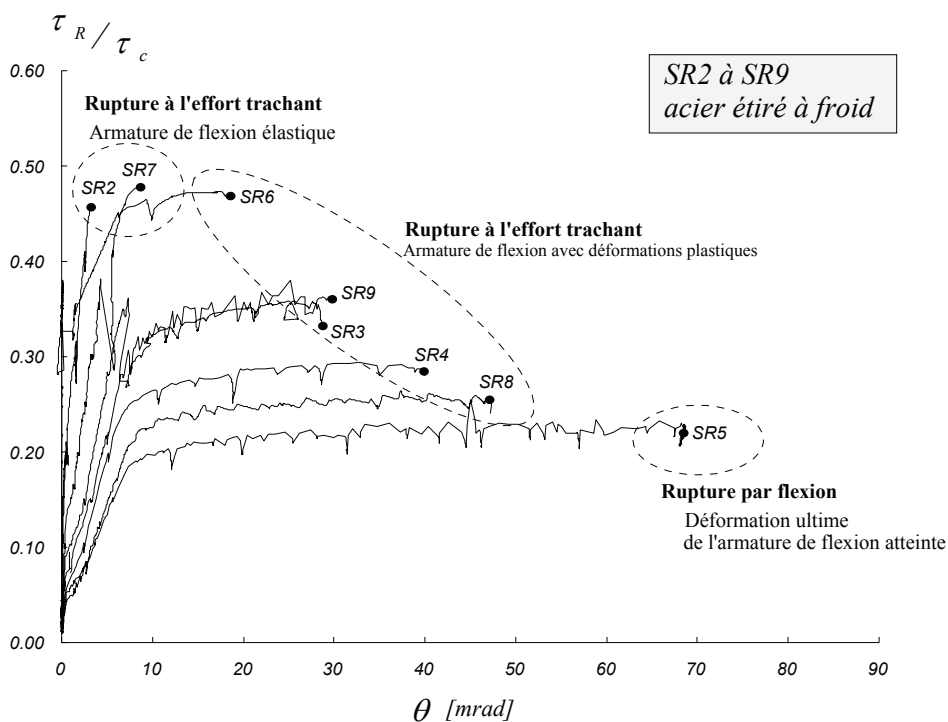


Figure B-5.3: Comparaison des essais

La figure B-5.3 montre l'évolution de la résistance au cisaillement (τ_R / τ_c) avec la rotation à la région de rupture θ pour toutes les poutres testées. Les considérations suivantes peuvent être énoncées :

- La rupture à l'effort tranchant des poutres SR2, SR7 et SR11 s'est produite avant ou au début de la plastification de l'armature de flexion.

Chapitre B-5

- Pour les poutres SR3, SR4, SR6, SR8 et SR9, la rupture à l'effort tranchant s'est produite en présence d'importantes déformations plastiques de l'armature de flexion.
- Une rupture par flexion a été obtenue pour la poutre SR5. La déformation ultime de l'armature inférieure de flexion a été atteinte.
- La résistance à l'effort tranchant τ_R / τ_C diminue avec l'augmentation de la rotation θ à la région de rupture.
- Les poutres avec acier de type laminé à chaud (SR10 et SR12) ont eu plus de ductilité par rapport aux poutres avec acier de type étiré à froid.

