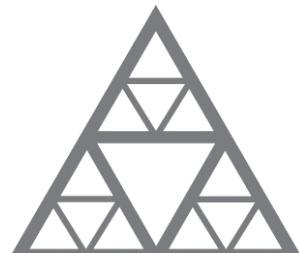


MODULE « BETON ARME ET BETON PRECONTRAINTE »
- BAEP2 -

ENPC 2023-2024 - 1^{er} Semestre



École des Ponts
ParisTech



**ÉTUDE D'UNE POUTRE ISOSTATIQUE
EN BETON PRECONTRAINTE
ANALYSE ET MODELISATION
NUMÉRIQUE AVEC SOFiSTiK**

Abderrahman OMRI

Année Scolaire 2023-2024

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	3
2.	MODELISATION SOFISISTIK	3
2.1	Modèle géométrique	3
2.2	Câbles de précontrainte	3
2.3	Caractéristiques mécaniques de la section	4
2.4	Matériaux	5
2.5	Sollicitations de flexion	9
2.6	Phasage de construction et combinaisons d'action	13
3.	RESULTATS DES CALCULS	15
3.1	Contrainte fibre inférieure	15
3.2	Contrainte fibre supérieure	16
3.3	Contrainte câble n°1 (le plus bas)	16
3.4	Contrainte câble n°2	17
3.5	Contrainte câble n°3	17
3.6	Contrainte câble n°4 (le plus haut)	18
3.7	Diagramme des contraintes (béton et câbles) au niveau de la section médiane	18
3.8	Conclusion	22
4.	RESULTATS DES CALCULS : DEUXIEME ITERATION.....	23
4.1	Contrainte fibre inférieure	23
4.2	Contrainte fibre supérieure	24
4.3	Contrainte câble n°1 (le plus bas)	24
4.4	Contrainte câble n°2	25
4.5	Contrainte câble n°3	25
4.6	Contrainte câble n°4 (le plus haut)	26
4.7	Diagramme des contraintes (béton et câbles) au niveau de la section médiane	26
4.8	Conclusion	30
5.	CONCLUSION GENERALE	31

1. INTRODUCTION

Le présent note porte sur le **dimensionnement d'une poutre isostatique en I de portée 24,00 m réalisée en béton précontraint**.

L'objectif est de vérifier la poutre selon l'**Eurocode 2**, en prenant en compte :

- Les sollicitations induites par les charges permanentes et variables,
- Les effets de la précontrainte,
- Le phasage de construction et les pertes associées.

La justification est effectuée **aux États Limites de Service (ELS)**.

Cette étude numérique a été réalisée sous **SOFiSTiK**, afin de dépasser les hypothèses simplificatrices du calcul manuel et d'aborder de manière plus réaliste le comportement de la poutre.

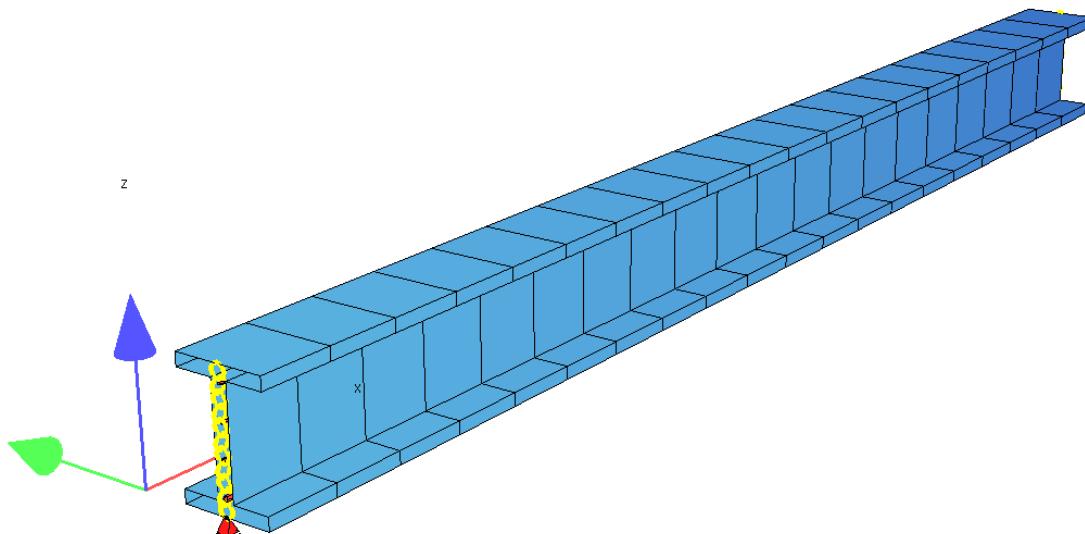
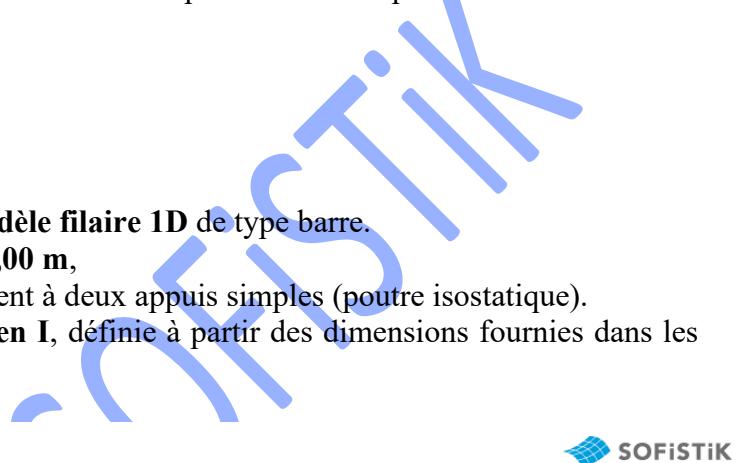
2. MODELISATION SOFISiSTiK

2.1 Modèle géométrique

La poutre étudiée est représentée par un **modèle filaire 1D** de type barre.

- La **longueur totale** du tablier est de **24,00 m**,
- Les **conditions aux limites** correspondent à deux appuis simples (poutre isostatique).

La section transversale est de type **poutre en I**, définie à partir des dimensions fournies dans les plans d'exécution.

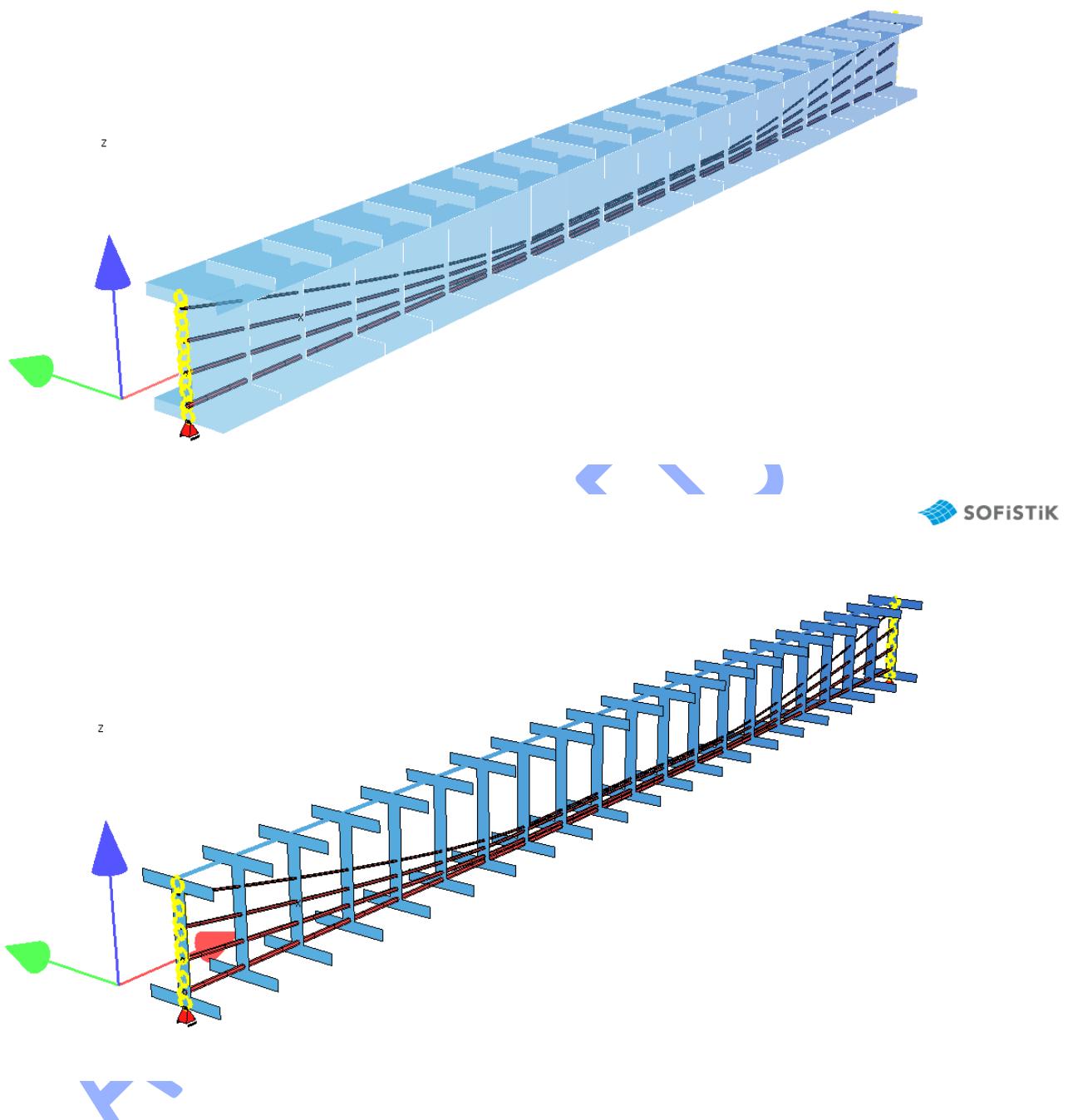


2.2 Câbles de précontrainte

La précontrainte est assurée par quatre câbles, introduits dans le modèle conformément aux plans de coffrage.

Le tracé des câbles est défini en coordonnées locales, ce qui permet de reproduire avec précision leur géométrie dans la poutre.

Chaque câble est caractérisé par son profil, son aire d'acier, sa résistance en traction et son allongement initial.



2.3 Caractéristiques mécaniques de la section

Les caractéristiques mécaniques de la section sont calculées de façon simple en faisant le constat que la section en « I » est obtenue par soustraction de 2 sections rectangulaires.

$$\text{Section } \mathbf{A}_c = 2,00 \times 1,40 - (1,40 - 0,25) \times (2,00 - 2 \times 0,20) = \mathbf{0,96 \text{ m}^2}$$

$$\text{Périmètre } \mathbf{U} = 2,00 \times 2,00 + 2,00 \times 1,40 + 2,00 \times (1,40 - 0,25) = \mathbf{9,10 \text{ m}}$$

$$\text{Inertie } \mathbf{I}_y = 1,40 \times 2,00^3 / 12 - (1,40 - 0,25) \times (2,00 - 2 \times 0,20)^3 / 12 = \mathbf{0,5408 \text{ m}^4}$$

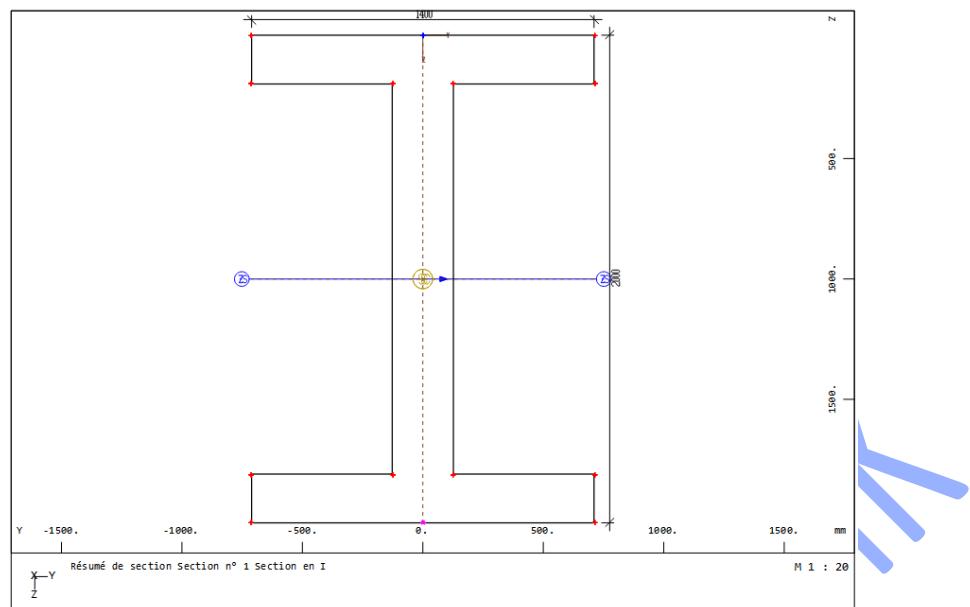
$$\text{Fibre supérieure } \mathbf{v} = \mathbf{1,00 \text{ m}}$$

$$\text{Fibre inférieure } \mathbf{v'} = \mathbf{1,00 \text{ m}}$$

$$\text{Module d'inertie } \mathbf{I/v} = \mathbf{0,5408 \text{ m}^3}$$

$$\text{Module d'inertie } \mathbf{I/v'} = \mathbf{0,5408 \text{ m}^3}$$

$$\text{Rendement géométrique } \mathbf{\rho} = I/(Ac v v') = \mathbf{0,5633.}$$



Sections 1, Sections Valeurs de section totale

SNo	yc [mm]	zc [mm]	ysc [mm]	zsc [mm]	A [m ²]	Ay [m ²]	Az [m ²]	It [m ⁴]	Iy [m ⁴]	Iz [m ⁴]	Iyz [m ⁴]	gam/m [kg/m]
1	0.0	1000.0	0.0	1000.0	0.9600	0.5221	0.4346	0.017	0.541	0.094	0.000	2400.0
SNo Numéro de section												
yc	y-Ordinate Center of elasticity	Az	Sheardeformation area Z									
zc	z-Ordinate Center of elasticity	It	Torsional moment of inertia									
ysc	y-Ordinate of Shear-Center	Iy	Moments of inertia y-y									
zsc	z-Ordinate of Shear-Center	Iz	Moments of inertia z-z									
A	Area	Iyz	Moments of inertia y-z									
Ay	Sheardeformation area Y	gam/m	Weight per length									

2.4 Matériaux

Béton : C 50/60

Le poids volumique du béton armé est pris égal à 25kN/m³ pour toutes les parties béton.

Le tableau suivant récapitule les principales caractéristiques du béton :

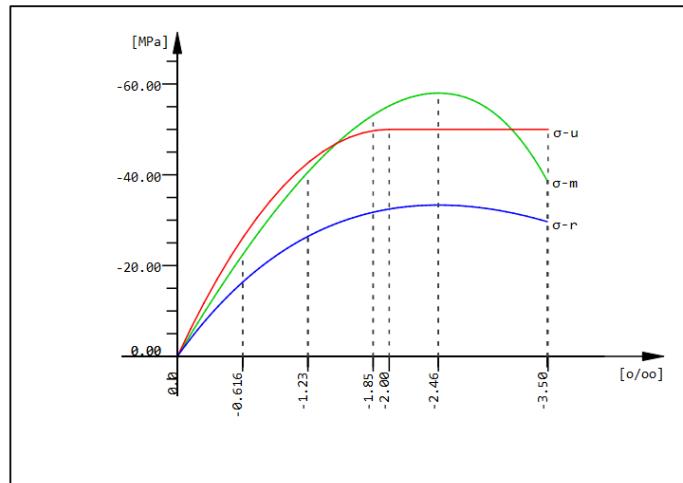
Classe de Résistance	fck [MPa]	Ecm [MPa]	fcm [MPa]	fctm [MPa]
C50/60	50	37278	58	4.10

Mat 1 C 50/60 (EN 1992)

Module de Young E	37278 [N/mm ²]	Coefficient de sécurité	1.50 [-]
Coefficient de Poisson μ	0.20 [-]	Résistance ¹ f _c	50.00 [MPa]
Module de cisaillement G	15532 [N/mm ²]	Résistance nominale f _{ck}	50.00 [MPa]
Module de compression K	20710 [N/mm ²]	Résistance en traction f _c tm	4.07 [MPa]
Poids nominal Y	25.0 [kN/m ³]	Résistance en traction f _c tk,05	2.85 [MPa]
Densité moyenne P	2400.0 [kg/m ³]	Résistance en traction f _c tk,95	5.29 [MPa]
Coefficient de dilatation α	1.00E-05 [1/K]	Résistance d'adhérence f _{bd}	3.66 [MPa]
		Résistance de service f _{cm}	58.00 [MPa]
		Résistance en fatigue f _{cd,fat}	22.67 [MPa]
		Résistance en traction f _c td	1.90 [MPa]
		Énergie rupt. traction G _f	0.15 [N/mm]

¹ f_c = f_{ck} * α -cc

Loi de comportement ELS	ϵ [ε/ε ₀]	σ -m [MPa]	E-t [N/mm ²]
Uniquement valide entre les points de définition (Pas d'extrapolation)	0.000	0.00	39142
	-0.616	-22.38	33229
	-1.232	-40.56	25432
	-1.849	-53.15	14855
	-2.465	-58.00	0
	-3.491	-38.77	-42498
Coefficient de sécurité	1.50		



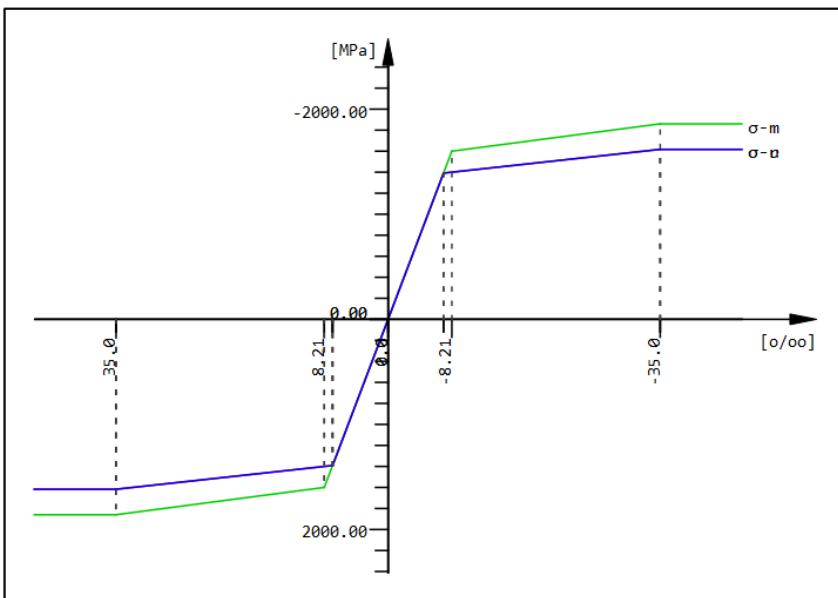
Précontrainte :

- Aciers de classe 1860 MPa : $f_{pk} = 1860$ MPa $f_{p0,1k} = 1650$ MPa $E_p = 190$ GPa
- Câbles 12T15S, $A_p = 1800$ mm², Φ_g (diamètre de gaine) = 80 mm
 $\mu = 0,19$ (coefficient de frottement), $k = 0,01$ m⁻¹ (coefficient de déviation parasite), recul d'ancrage : 7 mm

Mat 3 Y 1860 A (EN 1992)

Module de Young	E	195000	[N/mm ²]	Coefficient de sécurité	1.15	[-]
Coefficient de Poisson	μ	0.30	[-]	Limite d'élasticité f_y	1600.00	[MPa]
Module de cisaillement	G	75000	[N/mm ²]	Limite élast. en compr. f_{yc}	1600.00	[MPa]
Module de compression	K	162500	[N/mm ²]	Résistance en traction f_t	1860.00	[MPa]
Poids nominal	γ	78.5	[kN/m ³]	Résist. en compression f_c	1860.00	[MPa]
Densité moyenne	ρ	7850.0	[kg/m ³]	Déformation en rupture	35.00	[%]
Coefficient de dilatation α		1.20E-05	[1/K]	Coef. adhérence relatif	0.50	[-]
Épaisseur maximale	t-max	18.00	[mm]	Coef. adhérence EN1992 k1	1.60	[-]
Relaxation	EN-1992	Classe 2		Module d'écrouissage E_h	0.00	[MPa]
Relaxation	$\rho(1000h)$	2.50	[%]	Limite proportionnalité f_p	1600.00	[MPa]
				Réduction dynamique σ_{-dyn}	160.87	[MPa]

Loi de comportement ELS	ϵ [%]	σ -m [MPa]	$E-t$ [N/mm ²]
Extrapolation en-dehors du domaine de définition	1000.000	1860.00	0
	35.000	1860.00	0
	8.205	1600.00	9703
	0.000	0.00	195000
	-8.205	-1600.00	9703
	-35.000	-1860.00	0
	-1000.000	-1860.00	0
Coefficient de sécurité			1.15


Système de précontrainte: 1 12T15

Force de référence P_{ref}	2673.0 [kN]	Aire de chaque câble de pré	1800 [mm ²]
Contrainte de référence σ_r	1485.00 [MPa]	Nombre de torons	12
Glissement à l'ancre actif	7.0 [mm]	Excentricité maximale	0.0 [mm]
Allongement additionnel	7.0 [mm]		
Diamètre de gaine DO	40.0 [mm]	Rayon de courbure admissible	8.000 [m]
Ligne droite à l'ancre actif	0.001 [m]	Distance minimale du bord	100.0 [mm]
Ligne droite à l'ancre pas	0.001 [m]	Distance minimale des gaines	40.0 [mm]
Matériau	3	Coefficient de frottement à	0.190 [-]
Module de Young	195000.00 [MPa]	Coefficient de frottement au	0.190 [-]
Résistance élastique	1600.00 [MPa]	Coefficient d'oscillation sur	0.401 [°/m]
Résistance en traction	1860.00 [MPa]	Coefficient d'oscillation sur	0.401 [°/m]

Armatures passives :

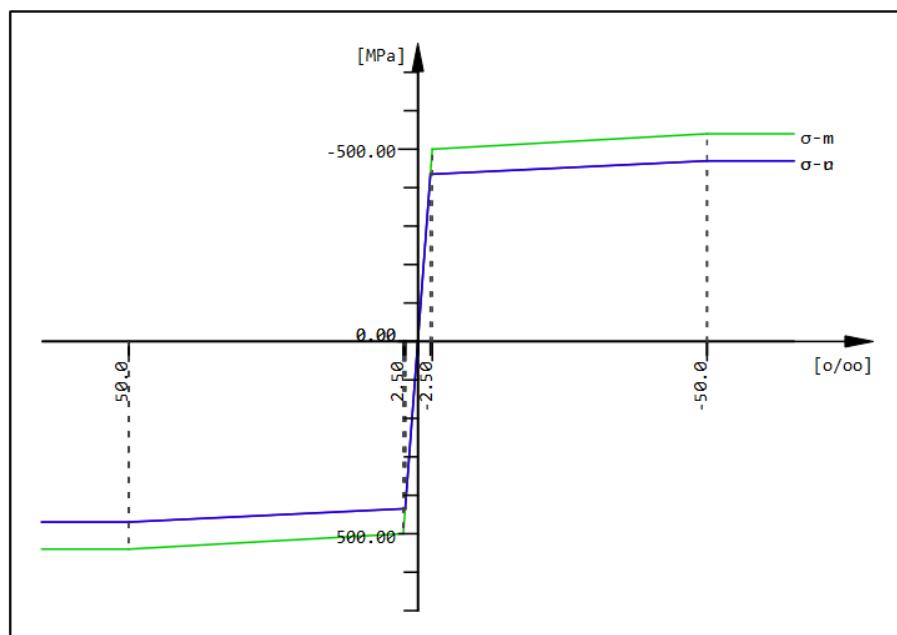
Conformément à l'EN1992-1-1 § 3.2.7, les caractéristiques mécaniques principales des aciers HA de type B500B sont les suivantes :

- Module d'élasticité : $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$
- Limite caractéristique d'élasticité : $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- Allongement maximal de calcul : relations contraintes-déformations avec palier horizontal sans limite d'allongement

Mat 2 B 500 B (EN 1992)

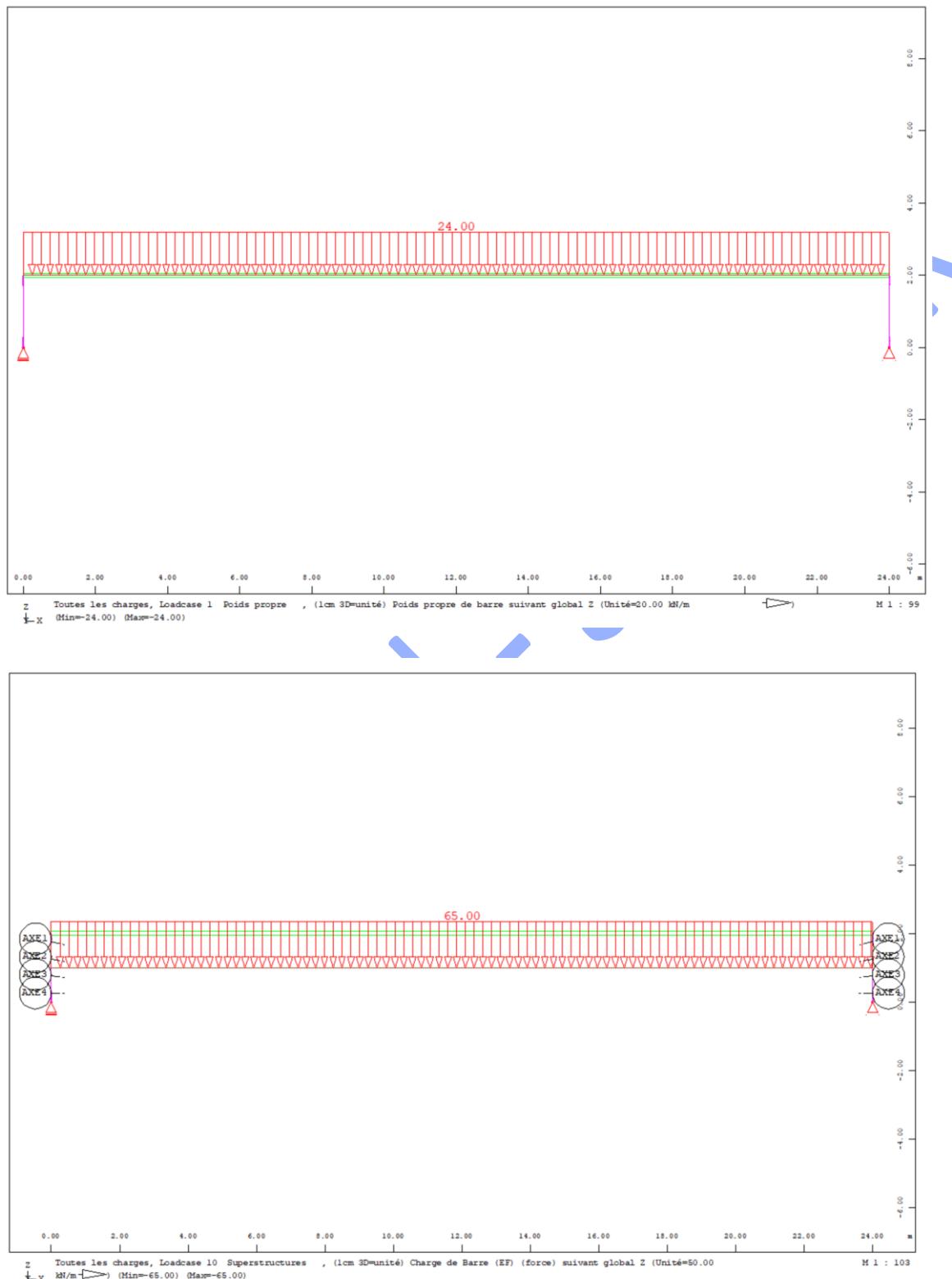
Module de Young	E	200000	[N/mm ²]	Coefficient de sécurité	1.15	[-]
Coefficient de Poisson	μ	0.30	[-]	Limite d'élasticité f_y	500.00	[MPa]
Module de cisaillement	G	76923	[N/mm ²]	Limite élast. en compr. f_{yc}	500.00	[MPa]
Module de compression	K	166667	[N/mm ²]	Résistance en traction f_t	540.00	[MPa]
Poids nominal	γ	78.5	[kN/m ³]	Résist. en compression f_c	540.00	[MPa]
Densité moyenne	ρ	7850.0	[kg/m ³]	Déformation en rupture	50.00	[o/oo]
Coefficient de dilatation α		1.20E-05	[1/K]	Coef. adhérence relatif	1.00	[-]
Épaisseur maximale	t-max	32.00	[mm]	Coef. adhérence EN1992 k_1	0.80	[-]
				Module d'écrouissage E_h	0.00	[MPa]
				Limite proportionnalité f_p	500.00	[MPa]
				Réduction dynamique σ_{-dyn}	152.17	[MPa]

Loi de comportement ELS	ϵ [o/oo]	σ -m [MPa]	E -t [N/mm ²]
Extrapolation en-dehors du domaine de définition	1000.000	540.00	0
	50.000	540.00	0
	2.500	500.00	842
	0.000	0.00	200000
	-2.500	-500.00	842
	-50.000	-540.00	0
	-1000.000	-540.00	0
Coefficient de sécurité			1.15

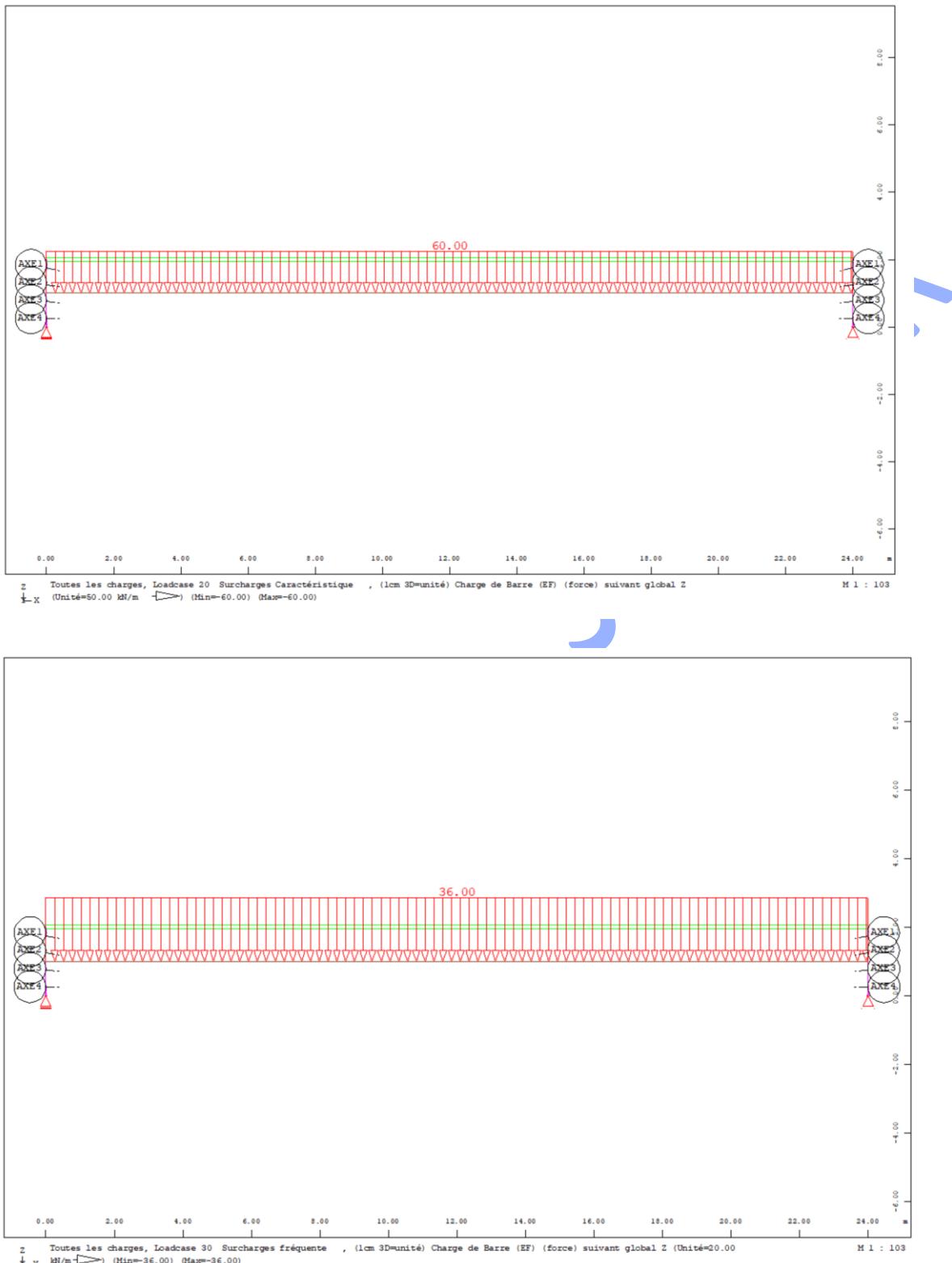


2.5 Sollicitations de flexion

Permanentes : Poids propre $g = \gamma_{\text{béton}} \times A_c = 24,0 \text{ kN/ml}$
 Superstructure : $g' = 65,0 \text{ kN/ml}$



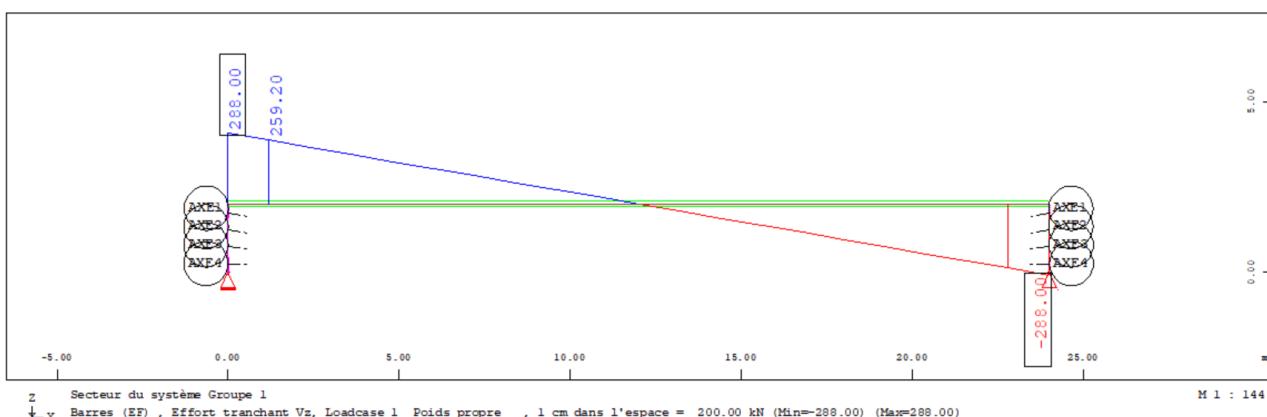
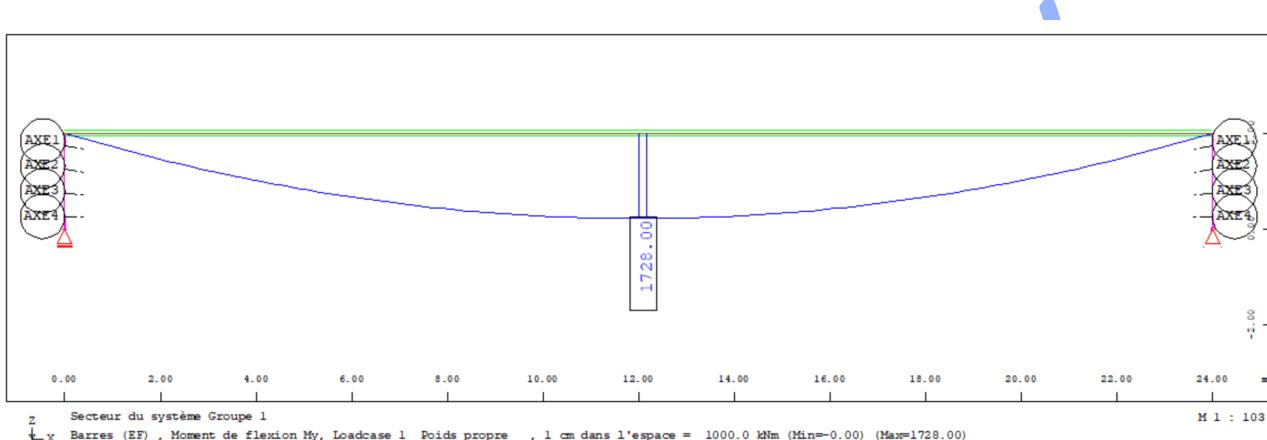
Variable : valeur caractéristique $q_k = 60,0 \text{ kN/ml}$
 Valeur fréquente $\psi_1 q_k = 36,00 \text{ kN/ml}$

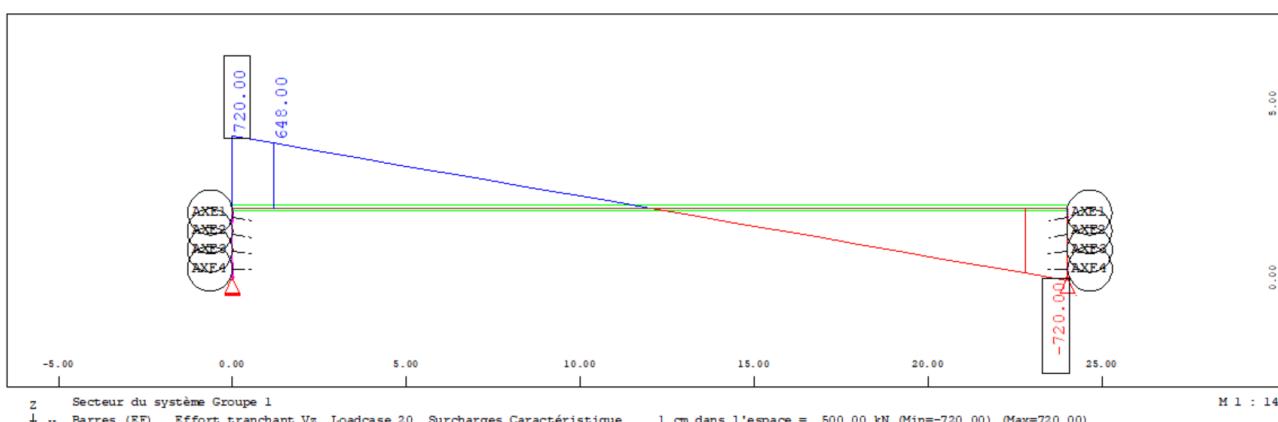
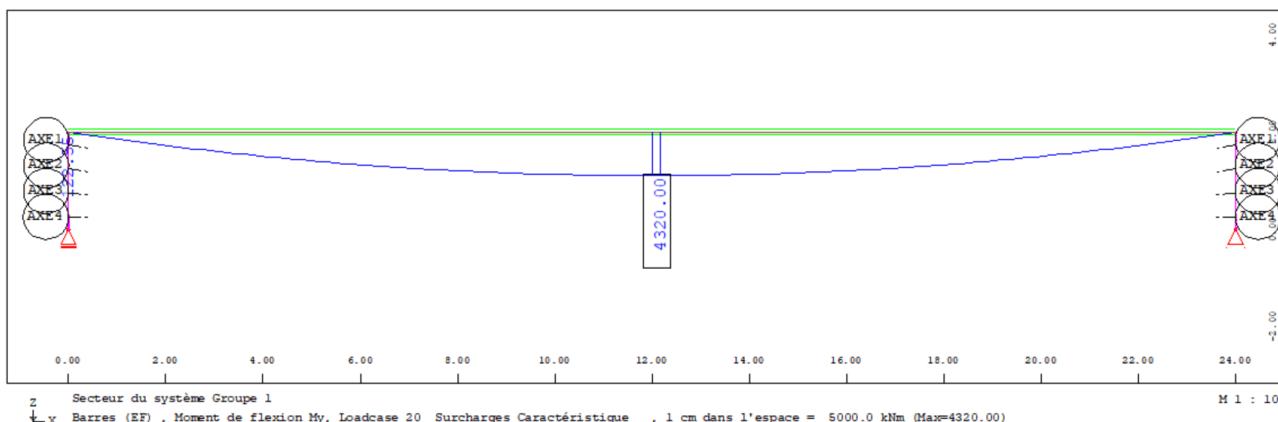
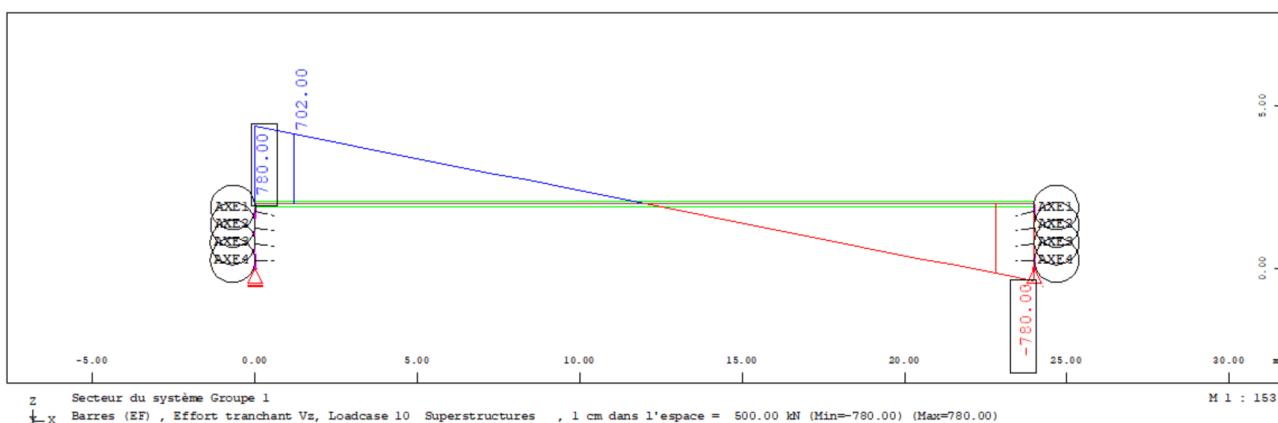
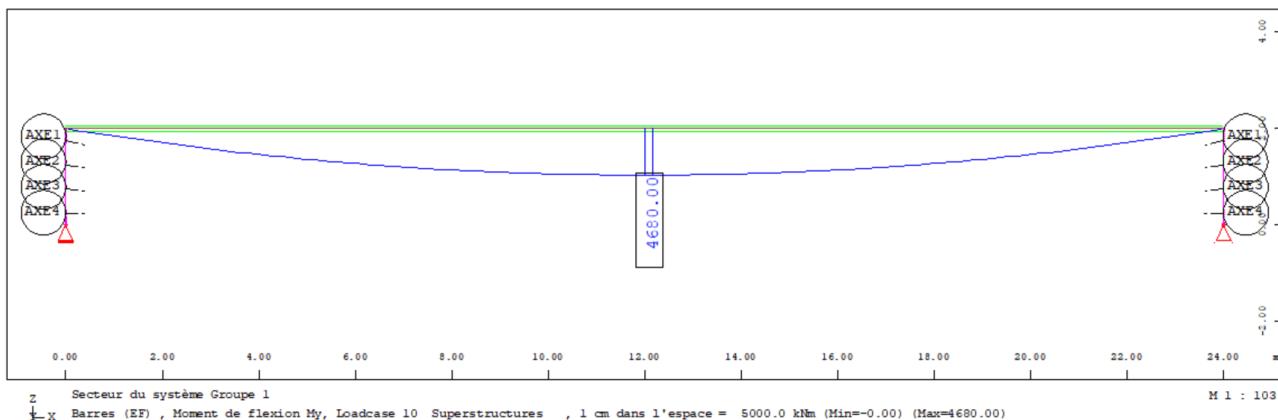


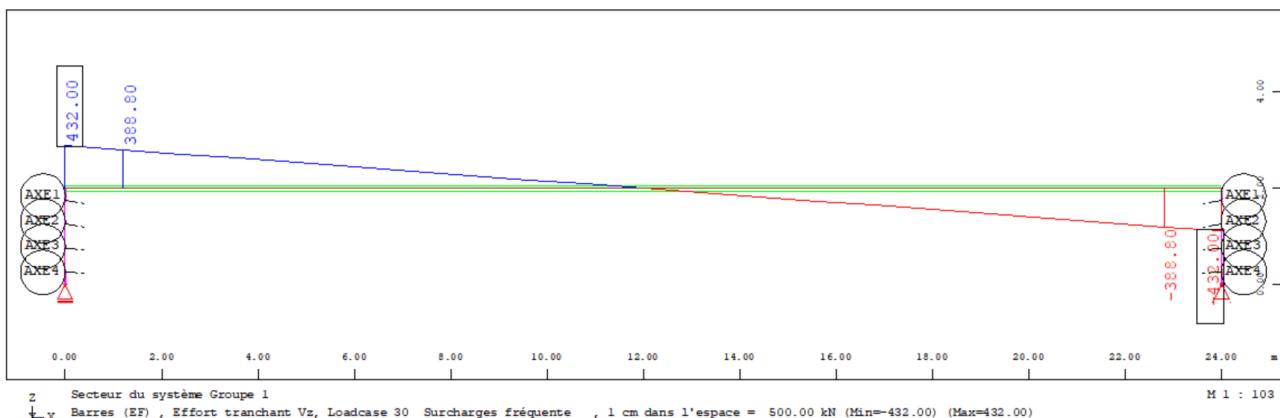
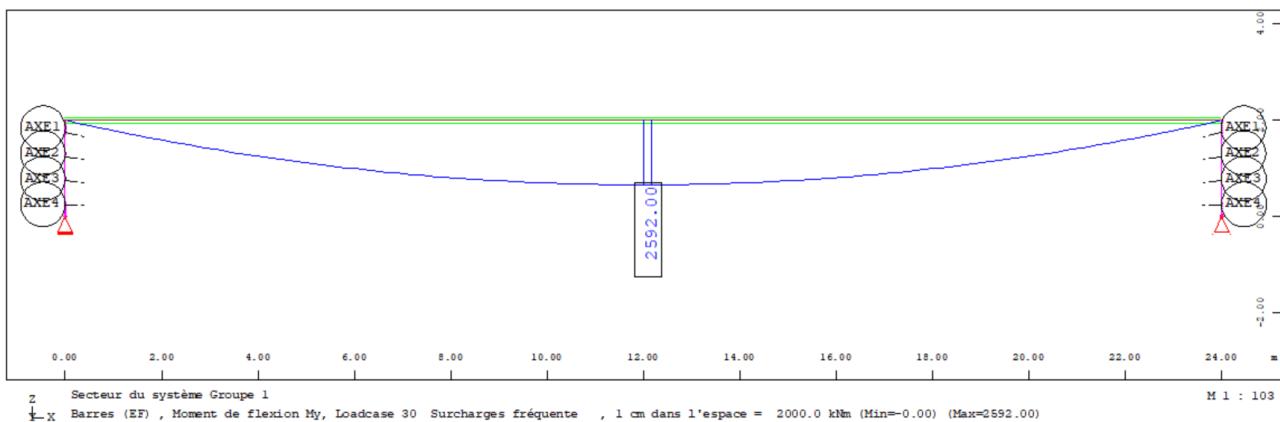
L'ensemble des charges est composé de charges uniformément réparties en kN/m.

Le schéma statique de la poutre est isostatique, avec deux appuis simples de portée de **24,00 m**. Sous une charge uniformément répartie p , le moment maximum est égal à $pl^2/8$ au milieu de la travée (section de dimensionnement) et l'effort tranchant maximal est égal à $pl/2$ sur appui.

Cas de charge	Moment de flexion (MN.m)	Effort tranchant (MN)
g	1,728	0,288
g'	4,680	0,780
q_k	4,320	0,720
$\Psi_1 q_k$	2,592	0,432







2.6 Phasage de construction et combinaisons d'action

Phasage de construction :

Phases
Phase 10 : bétonnage ($t=0$)
Phase 20 : mise en tension de la première famille des câbles et application simultanée du poids propre ($t=7$ jours)
Phase 25 : Calcul des effets du fluage et de retrait (durée 21 jours)
Phase 30 : pose des superstructures ($t=28$ jours)
Phase 40 : mise en tension des câbles restants ($t=28$ jours)
Phase 45 : Calcul des effets du fluage et de retrait (durée 28 jours)
Phase 50 : Application des surcharges fréquentes à court terme
Phase 60 : Application des surcharges caractéristique à court terme
Phase 65 : Calcul des effets du fluage et de retrait (durée 100x365 jours)
Phase 70 : Application des surcharges fréquentes à long terme
Phase 80 : Application des surcharges caractéristique à long terme

Note : Les phases 50, 60, 70 et 80 sont introduites directement dans le phasage de construction afin d'éviter le recours aux combinaisons de calcul dans **AQB** (il s'agit d'une simplification).

- Les phases 50 et 60 sont appliquées avant le calcul des effets de retrait et de fluage à long terme.
- Les phases 70 et 80 correspondent à l'état final de la structure (toutes pertes comprises).

Ces phases sont définies comme étant de type « SL », ce qui permet à SOFiSTiK de ne pas les inclure dans le calcul des effets différents (en particulier le fluage, qui dépend de l'état de contrainte permanente dans la structure).

La capture suivante, présente un extrait du rapport de calcul SOFISITK, qui présente le phasage de construction :

Étapes de construction							
CS	Type	t [d]	RH [%]	T [°C]	Dist_1 [m]	Dist_2 [m]	Désignation
10	G_1						Activation PP de la poutre
20	P						Mise en tension 1ère famille de
25	C_1	7	80	20			Creep+shrinkage
30	G_1						Pose des superstructures
40	P						Mise en tension 2ème famille de
45	C_1	21	80	20			Creep+shrinkage
50	SL						Application des Surcharges fréq
60	SL						Application des Surcharges carac
65	C_2	106	80	20			Creep+shrinkage
66	C_2	423	80	20			Creep+shrinkage
67	C_2	1702	80	20			Creep+shrinkage
68	C_2	6833	80	20			Creep+shrinkage
69	C_2	27436	80	20			Creep+shrinkage
70	SL						Application des Surcharges fréq
80	SL						Application des Surcharges carac

CS Numéro de la phase de construction RH Humidité relative
 Type Type de l'action T Température dans la phase de fluage
 t Durée effective de la phase de fluage
 Dist_1 Distance de lancement pour cette étape de construction pour un poussage depuis côté 1
 Dist_2 Distance de lancement pour cette étape de construction pour un poussage depuis côté 2

A.O.N.°

3. RESULTATS DES CALCULS

Afin de bien exploiter et de faciliter la présentation des résultats dans **SOFiSTiK**, il existe de nombreuses possibilités.

Par exemple, les **points de contraintes** peuvent être définis directement dans la section transversale. Cela permet de cibler les zones critiques de la section et d'obtenir les valeurs correspondantes tout au long des éléments structurels.

Le module **CSM** est l'un des plus puissants de **SOFiSTiK**. En pratique, il regroupe et fait appel à d'autres modules, notamment **ASE** et **AQB**, pour réaliser l'ensemble des calculs en arrière-plan.

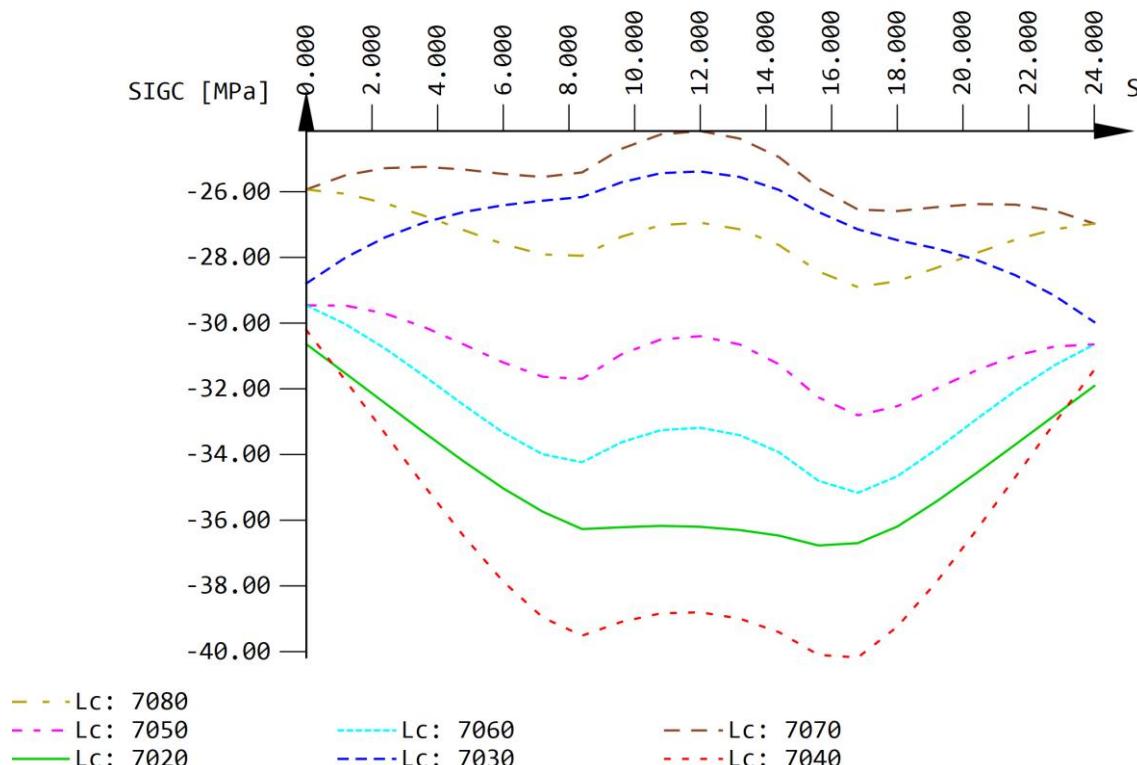
Les sorties **LC 70xx** correspondent à l'enregistrement des résultats relatifs au calcul des états de contrainte.

Rappel :

7020	Mise en tension de la première famille des câbles et application simultanée du poids propre (t=7 jours)
7030	Pose des superstructures (t=28 jours)
7040	Mise en tension de la deuxième famille de câbles (t=28 jours)
7050	Application des surcharges fréquentes à court terme
7060	Application des surcharges caractéristique à court terme
7070	Application des surcharges fréquentes à long terme
7080	Application des surcharges caractéristique à long terme

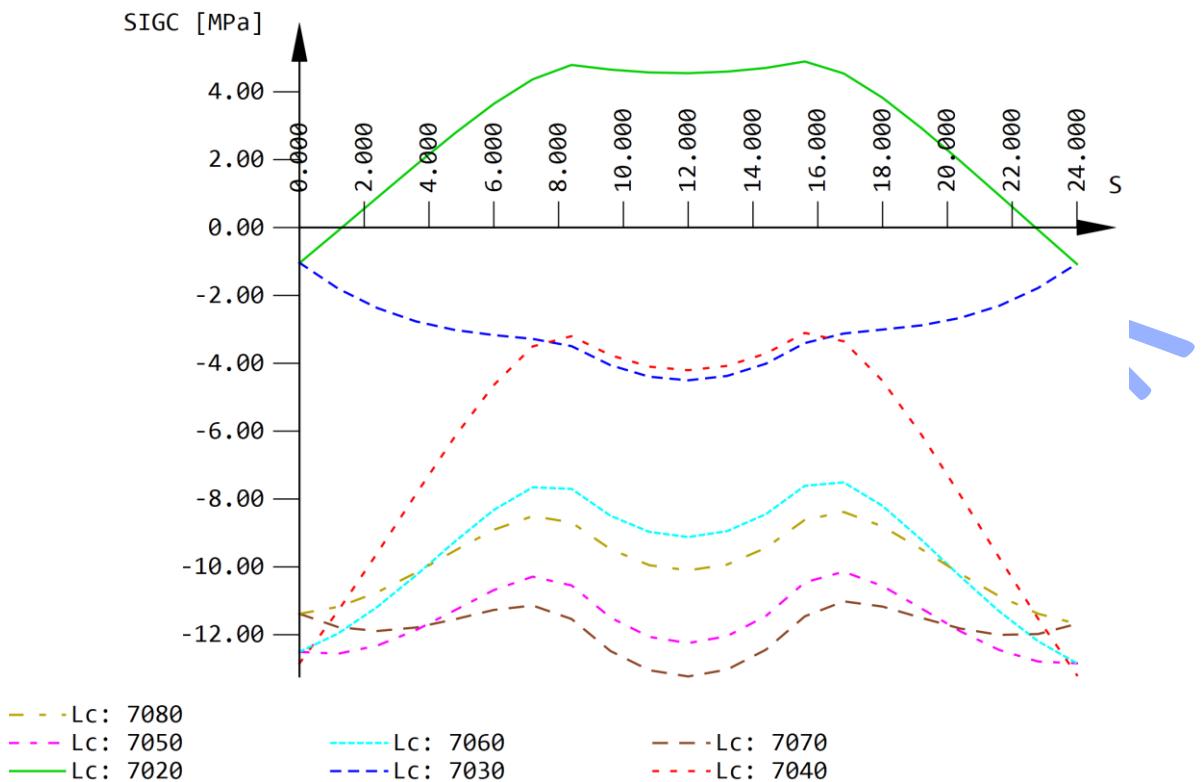
3.1 Contrainte fibre inférieure

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes en fibre inférieure le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



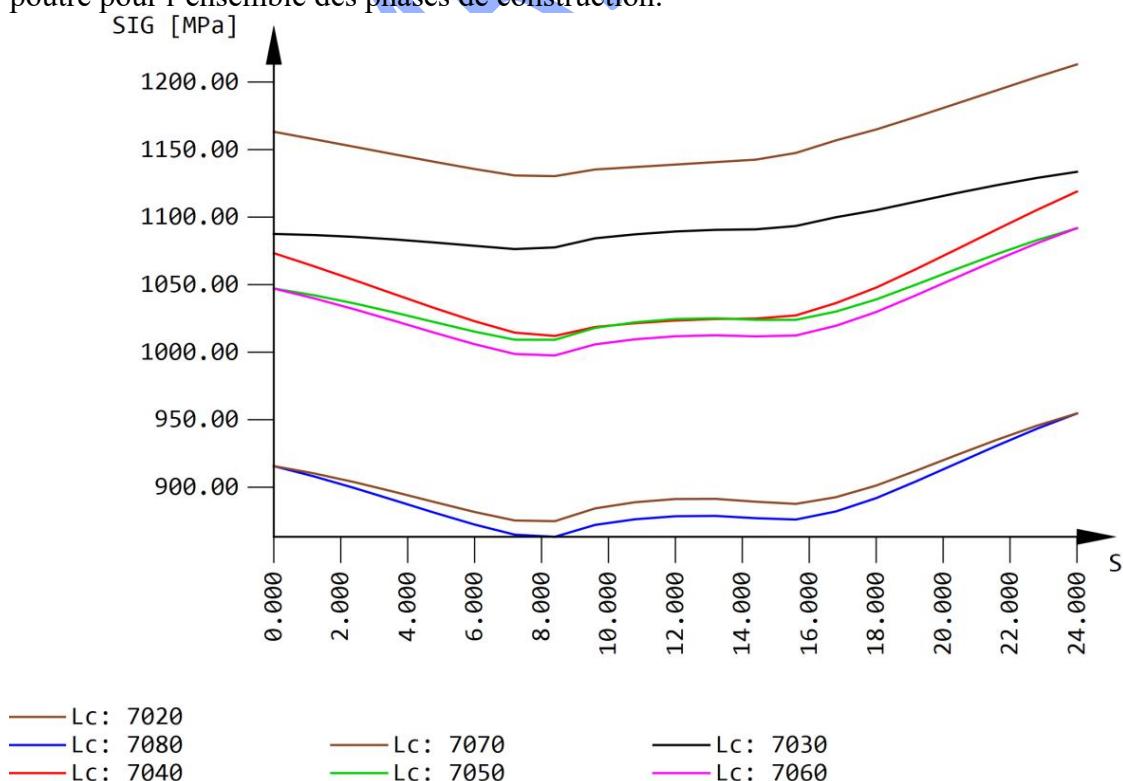
3.2 Contrainte fibre supérieure

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes en fibre supérieure le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



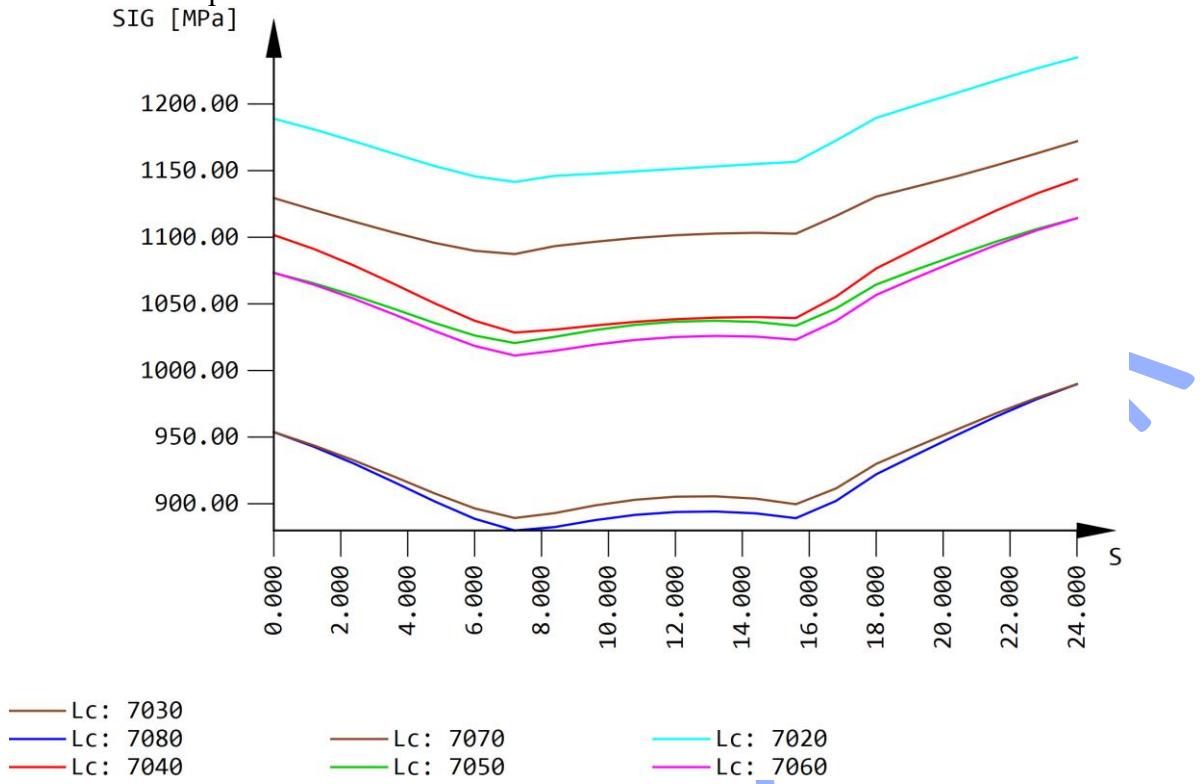
3.3 Contrainte câble n°1 (le plus bas)

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°1 (le plus bas) le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



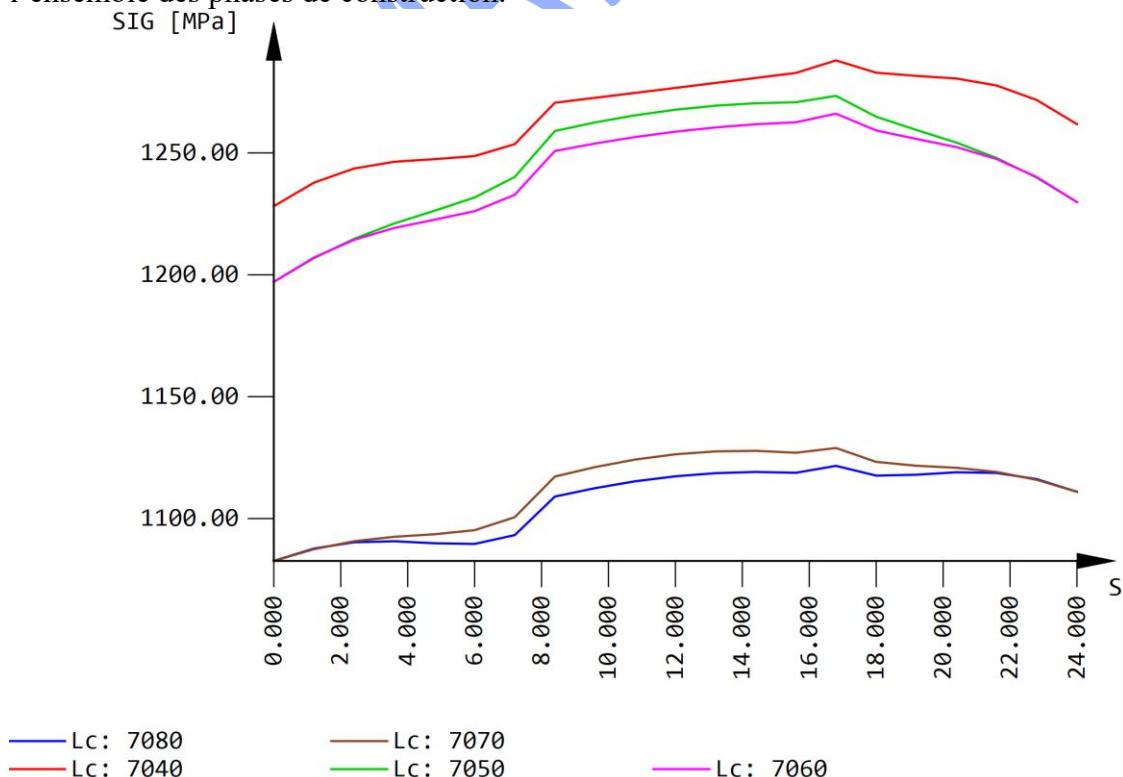
3.4 Contrainte câble n°2

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°2 le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



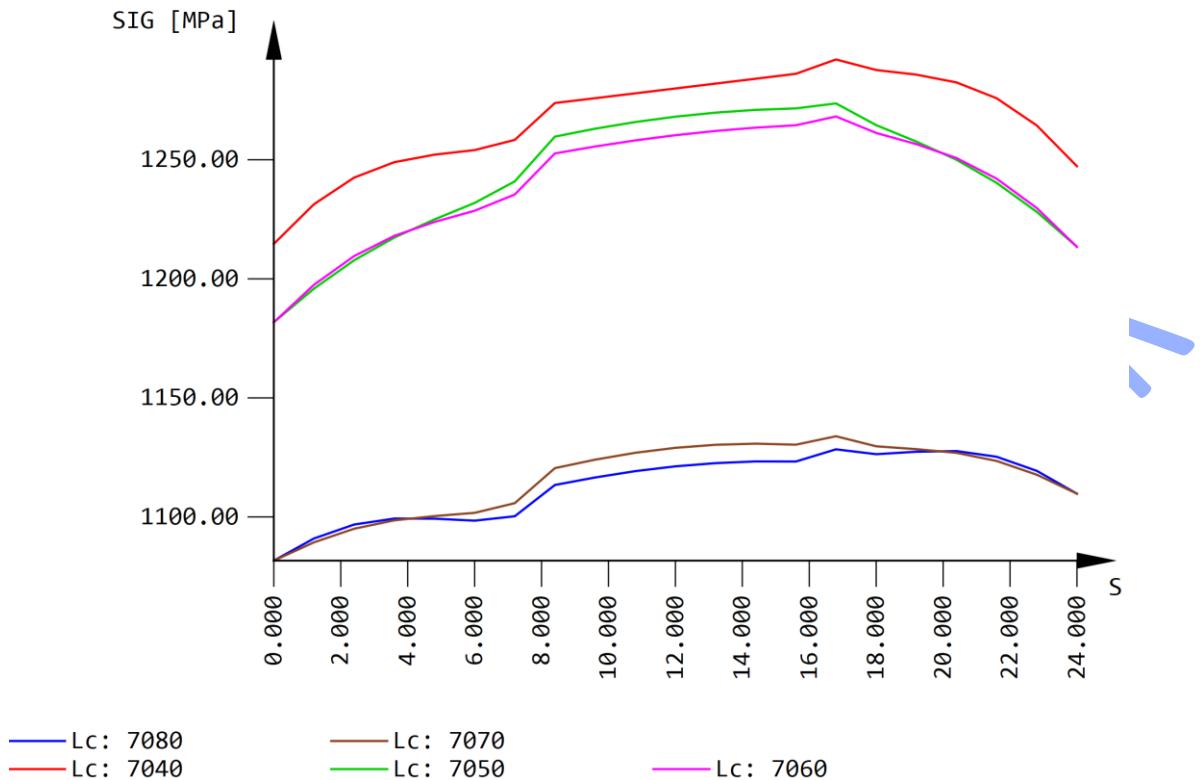
3.5 Contrainte câble n°3

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°3 le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



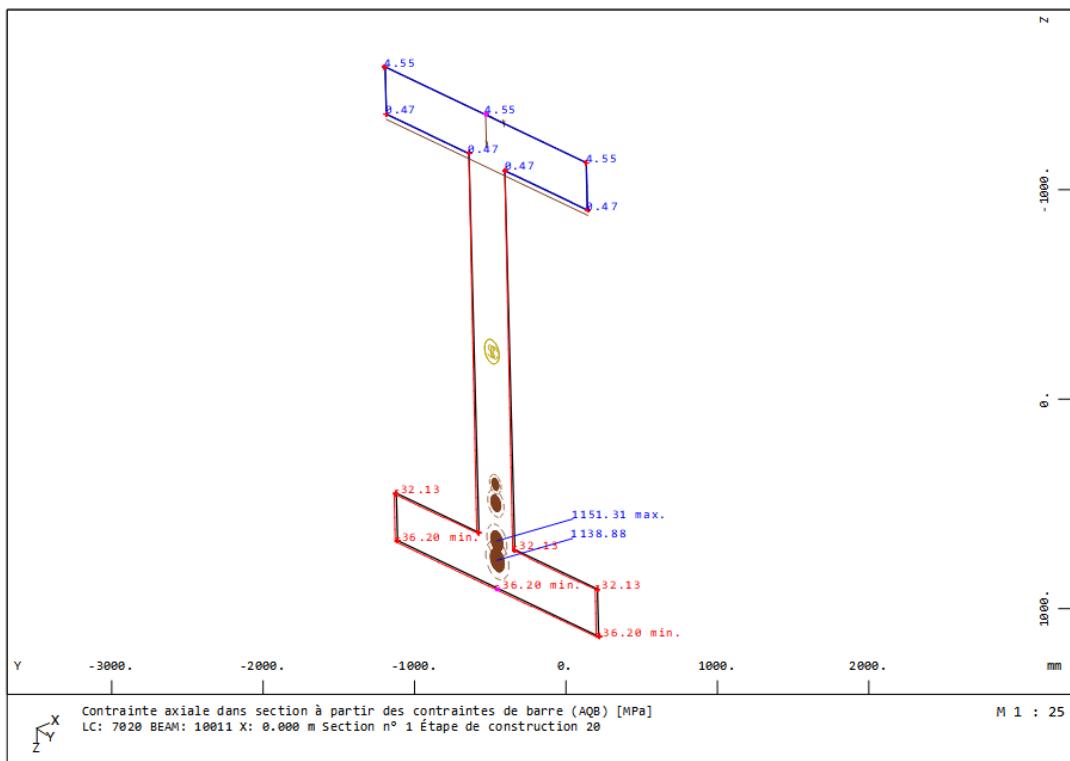
3.6 Contrainte câble n°4 (le plus haut)

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°4 (le plus haut) le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.

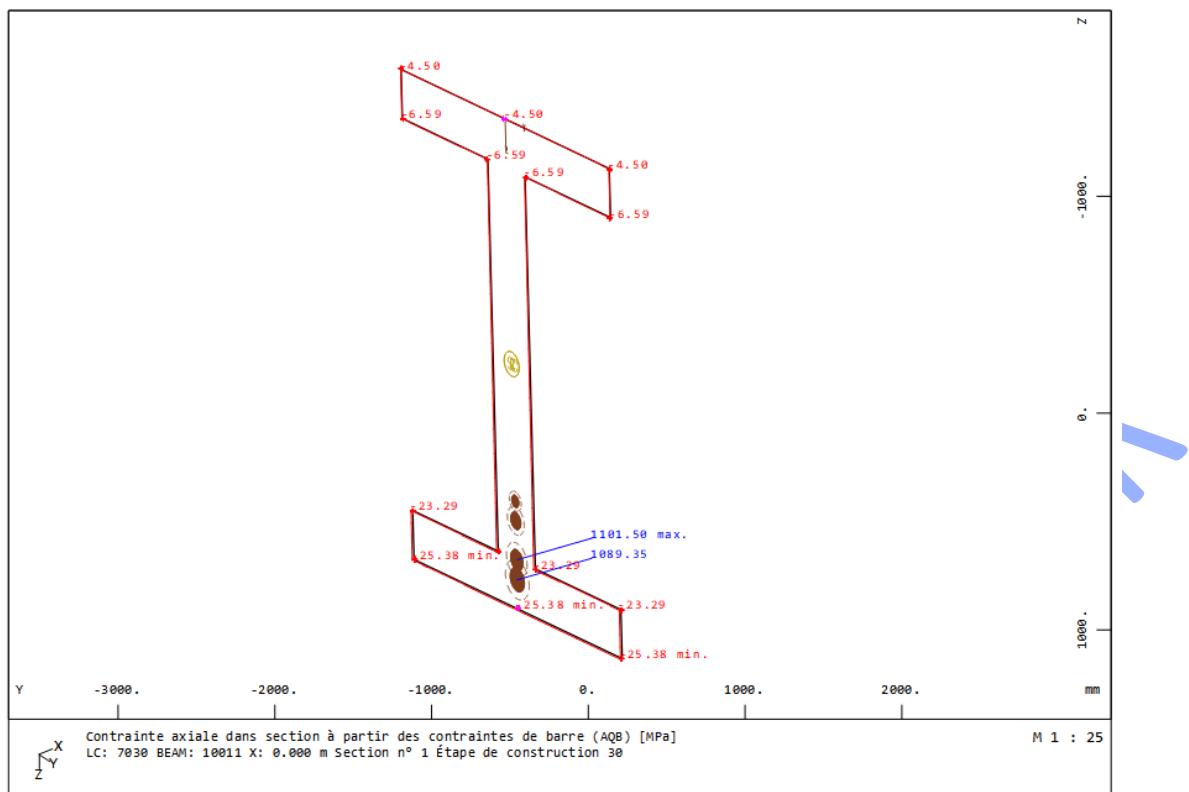


3.7 Diagramme des contraintes (béton et câbles) au niveau de la section médiane

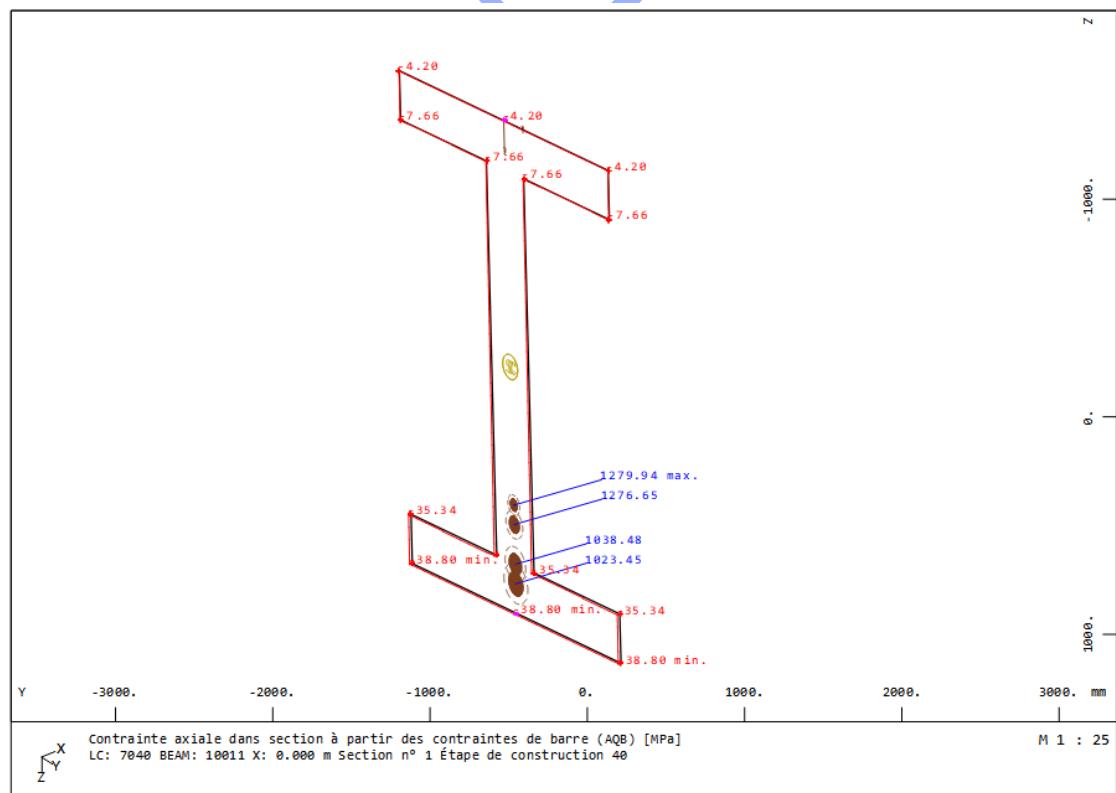
LC 7020 :



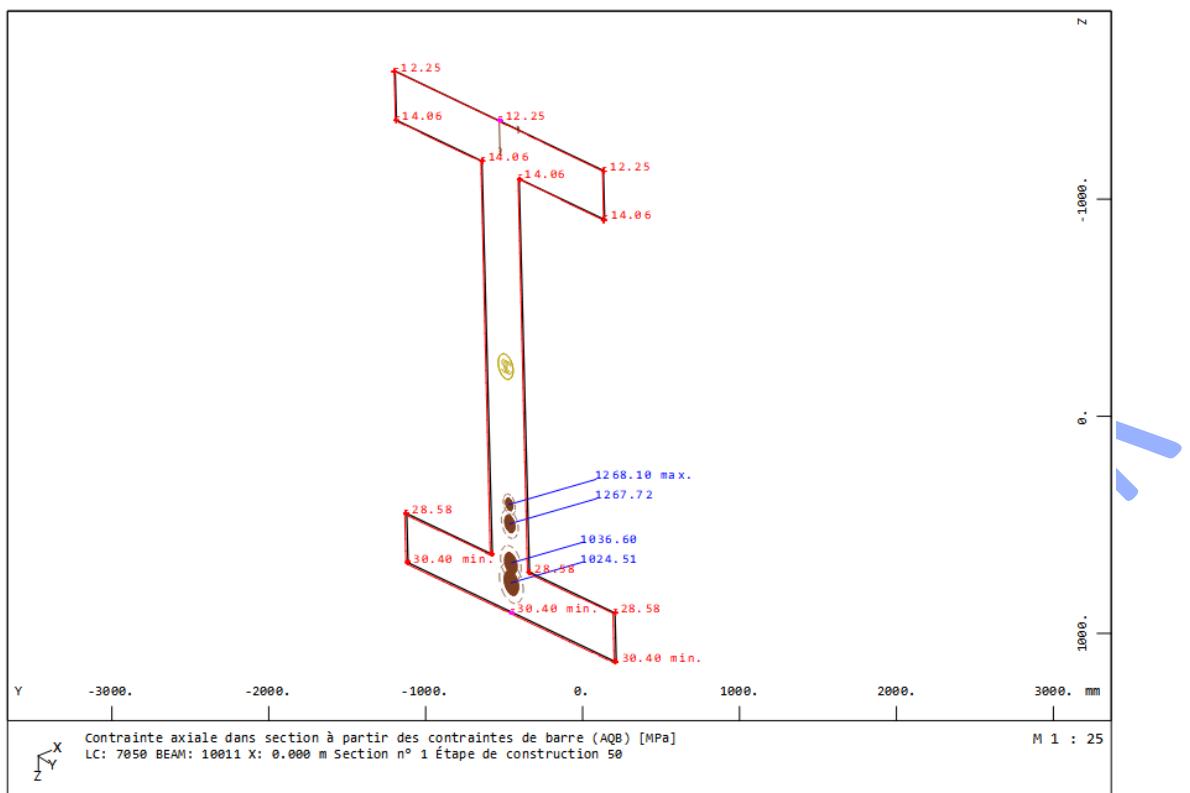
LC 7030 :



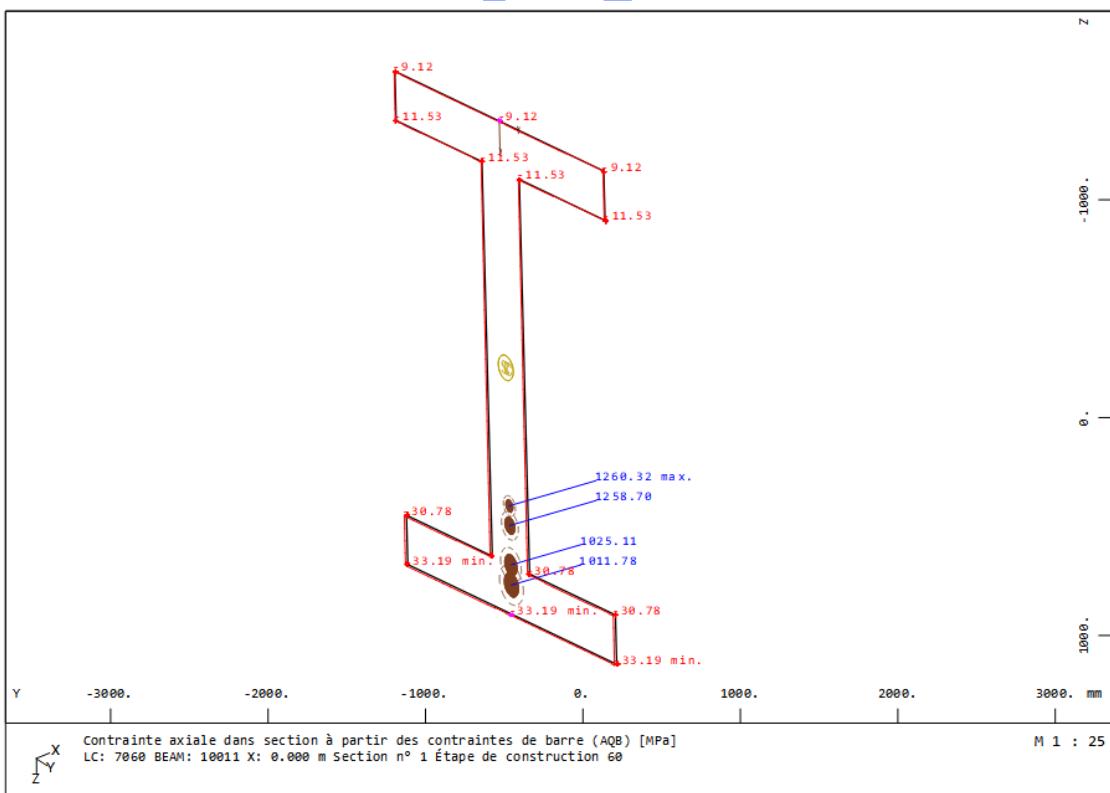
LC 7040 :



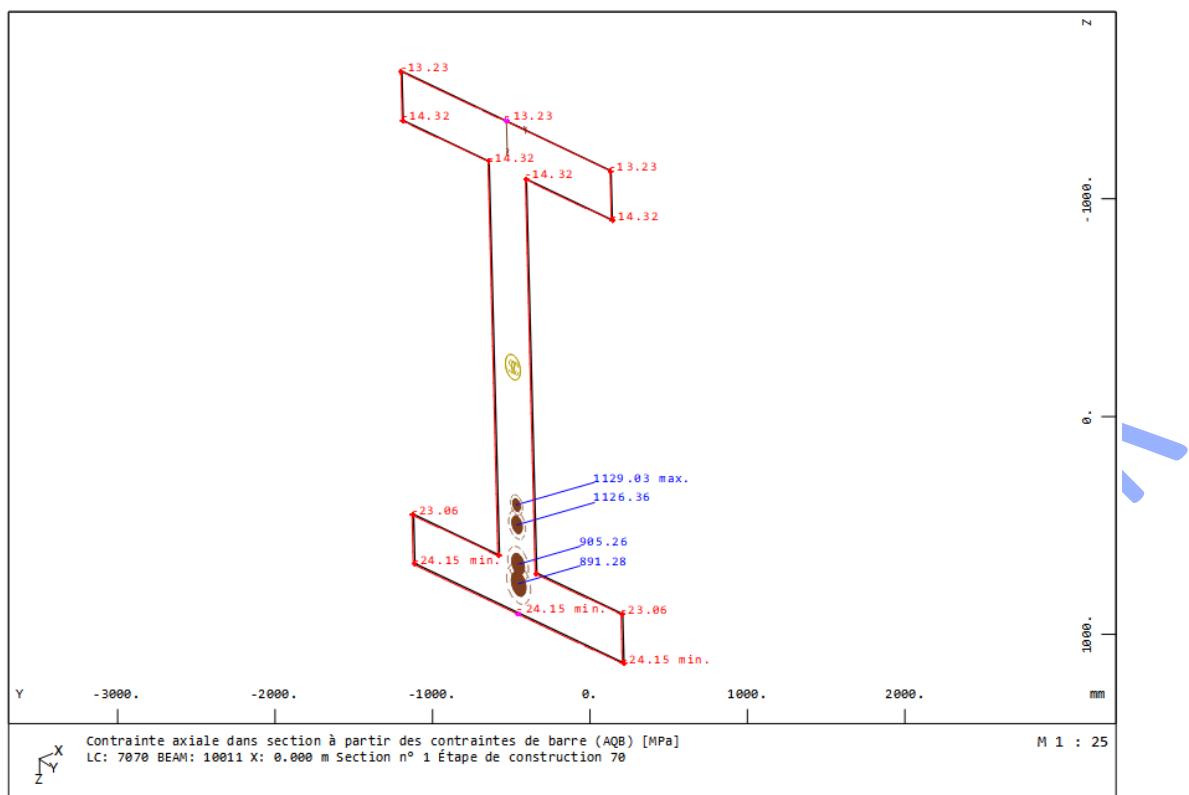
LC 7050 :



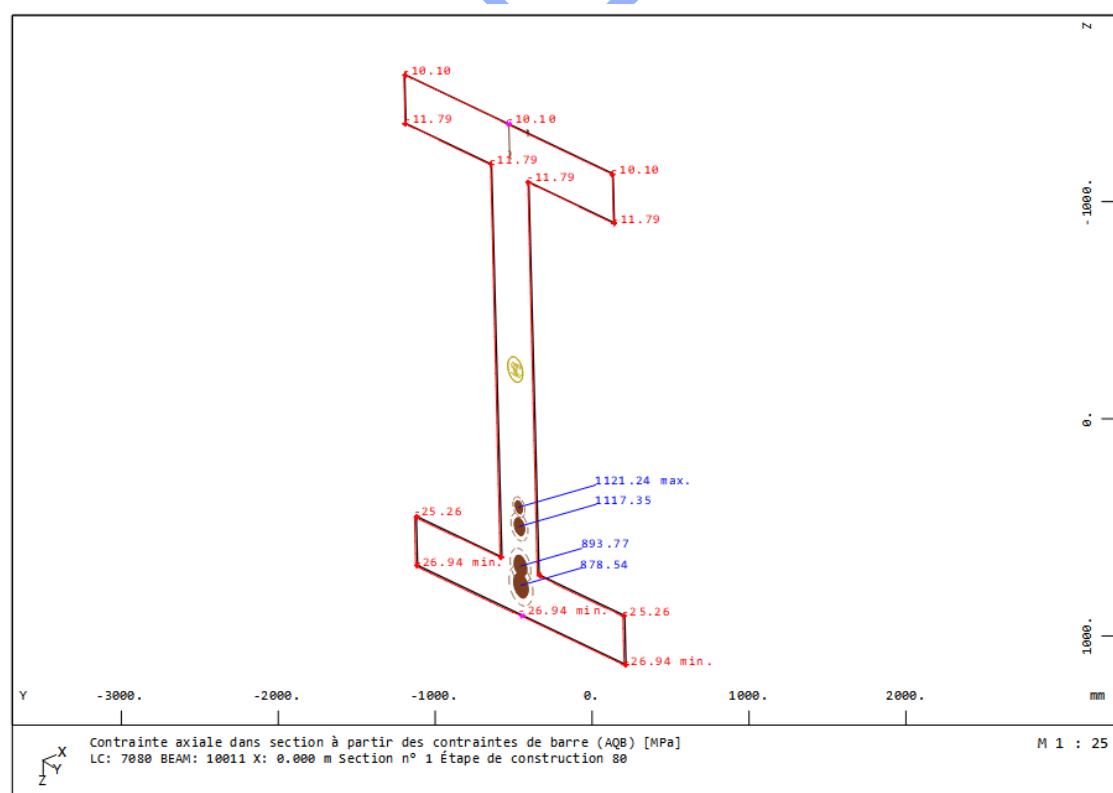
LC 7060 :



LC 7070 :



LC 7080 :



3.8 Conclusion

Le tableau suivant présente un récapitulatif des contraintes en fibre inférieure et supérieure sous chaque phase de calcul au niveau de la section médiane :

Convention de signe :

- : contrainte de compression
- + : contrainte de traction

Phase	Contrainte fibre supérieure (MPa)	Contrainte fibre inférieure (MPa)
7020	4,55	-36,2
7030	-4,5	-25,38
7040	-4,2	-38,8
7050	-12,25	-30,4
7060	-9,12	-33,19
7070	-13,23	-24,15
7080	-10,1	-26,94

Contraintes limites considérées :

- **Phase 7020** (mise en tension des câbles de la première famille) :
 - Traction : $0,7 \text{ fctm} = 2,85 \text{ MPa}$
 - Compression : $0,6 \text{ fck} = 30 \text{ MPa}$
- **Phases 7030 et 7040** (ELS quasi permanent) :
 - Traction : 0 MPa
 - Compression : $0,45 \text{ fck} = 22,5 \text{ MPa}$
- **Phases 7050 et 7070** (ELS fréquent) :
 - Traction : 0 MPa
 - Compression : $0,6 \text{ fck} = 30 \text{ MPa}$
- **Phases 7060 et 7080** (ELS caractéristique) :
 - Traction : $\text{fctm} = 4,07 \text{ MPa}$
 - Compression : $0,6 \text{ fck} = 30 \text{ MPa}$

Vérifications :

- **Phase 7020 – Mise en tension 1ère famille**
 - **Non conforme en traction** en fibre supérieure : $4,55 \text{ MPa} > 2,85 \text{ MPa}$.
 - **Non conforme en compression** en fibre inférieure : $|-36,20| = 36,20 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$.
- **Phases 7030 & 7040 – ELS quasi permanent** (traction admise = 0 ; compression $\leq 22,5 \text{ MPa}$)
 - Fibres supérieures : **conformes** (compressions modérées, pas de traction).
 - Fibres inférieures : **non conformes** ($|-25,38| = 25,38 \text{ MPa} > 22,5$; $|-38,80| = 38,80 \text{ MPa} > 22,5$).
- **Phase 7050 – ELS fréquent** (traction admise = 0 ; compression $\leq 30 \text{ MPa}$)
 - Fibre supérieure : **conforme**.
 - Fibre inférieure : **non conforme** ($|-30,40| = 30,40 \text{ MPa} > 30$).
- **Phase 7060 – ELS caractéristique** (traction $\leq 4,07 \text{ MPa}$; compression $\leq 30 \text{ MPa}$)
 - Fibre supérieure : **conforme** (compression).
 - Fibre inférieure : **non conforme** ($|-33,19| = 33,19 \text{ MPa} > 30$).
- **Phase 7070 – ELS fréquent**
 - **Conforme** aux deux fibres (aucune traction ; $|\sigma| \leq 30 \text{ MPa}$).
- **Phase 7080 – ELS caractéristique**
 - **Conforme** aux deux fibres (aucune traction ; $|\sigma| \leq 30 \text{ MPa}$).

Synthèse. Les dépassements portent principalement sur la **compression en fibre inférieure** (7020, 7030, 7040, 7050, 7060) et sur la **traction en fibre supérieure** à la phase 7020. Les phases **7070** et **7080** sont **conformes**. Ces écarts suggèrent d'**ajuster le niveau et/ou l'excentricité de la précontrainte**, et/ou de **revoir la répartition des charges et le phasage**, voire d'**optimiser la section** ou les **armatures passives** en zones critiques, afin de ramener $|\sigma|$ sous les limites réglementaires à chaque phase.

4. RESULTATS DES CALCULS : DEUXIEME ITERATION

Mesure adoptée : réduction du nombre de torons (12 → 8)

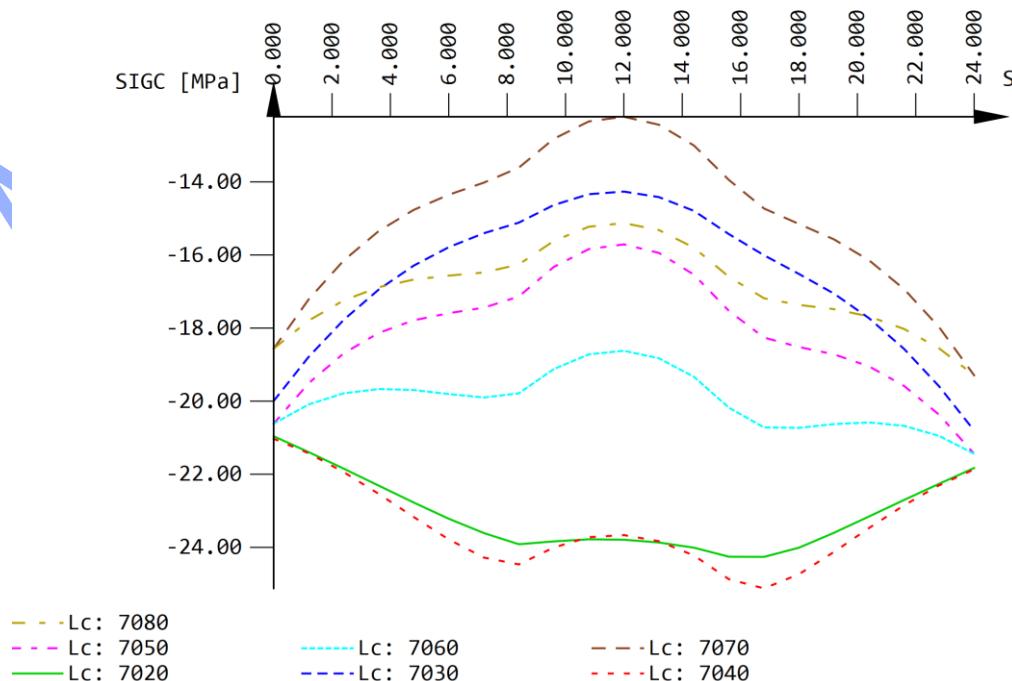
Pour corriger les dépassements de contraintes observés sur certaines phases, la solution retenue consiste à réduire le nombre de torons de précontrainte : passer de 12 torons à 8 torons identiques. Cette modification permet de diminuer le niveau total de précontrainte appliquée tout en conservant la géométrie et le tracé des câbles déjà définis.

Justification et effets attendus :

- En diminuant la surface totale d'acier active, la force totale de précontrainte initiale PPP est réduite approximativement dans le même rapport $8/12=0,667$ (si la tension unitaire par toron reste identique).
- À première approximation (comportement linéaire), les effets de flexion et les contraintes en fibre imputables à la précontrainte diminuent proportionnellement à la réduction de la force P . Par conséquent, les valeurs absolues des contraintes en compression et en traction observées dans les phases critiques doivent s'atténuer, ce qui devrait permettre de ramener $|\sigma|$ sous les limites prescrites dans plusieurs cas constatés.
- Cette solution est simple à mettre en place au niveau du modèle numérique (modification de l'aire d'acier totale des câbles) et évite d'emblée des changements géométriques (excentricités, tracés) plus complexes.

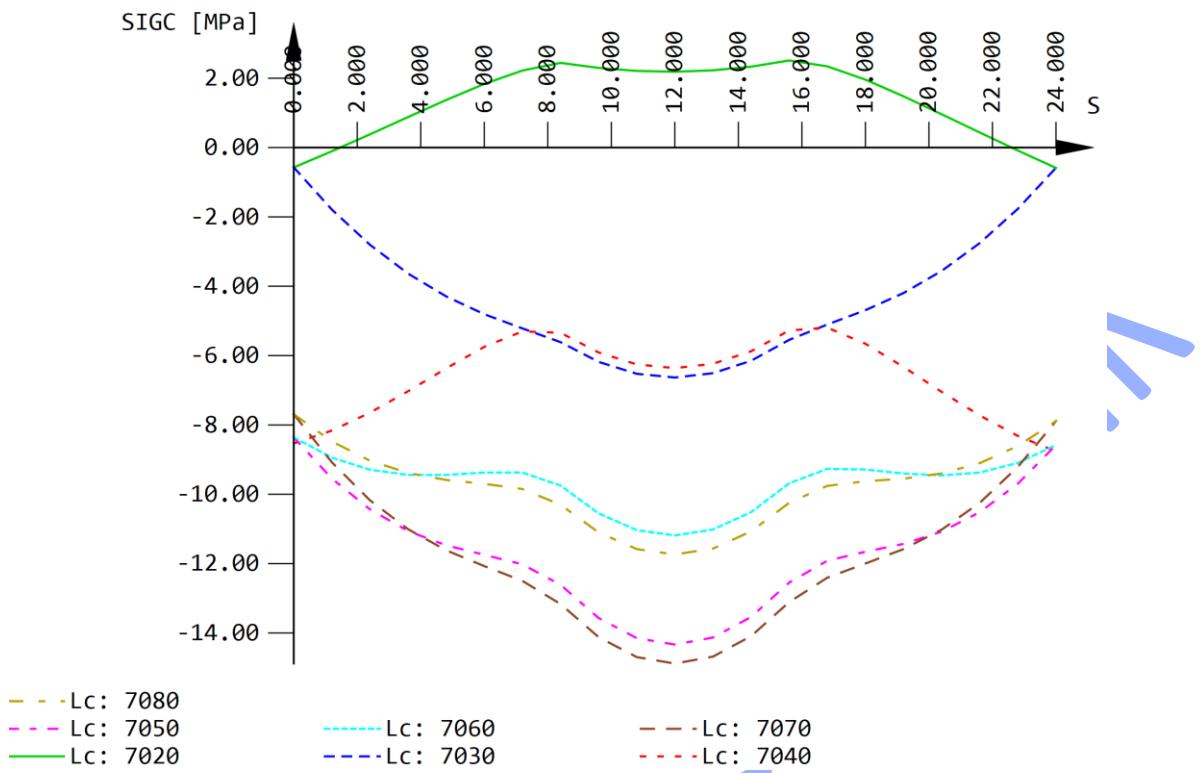
4.1 Contrainte fibre inférieure

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes en fibre inférieure le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



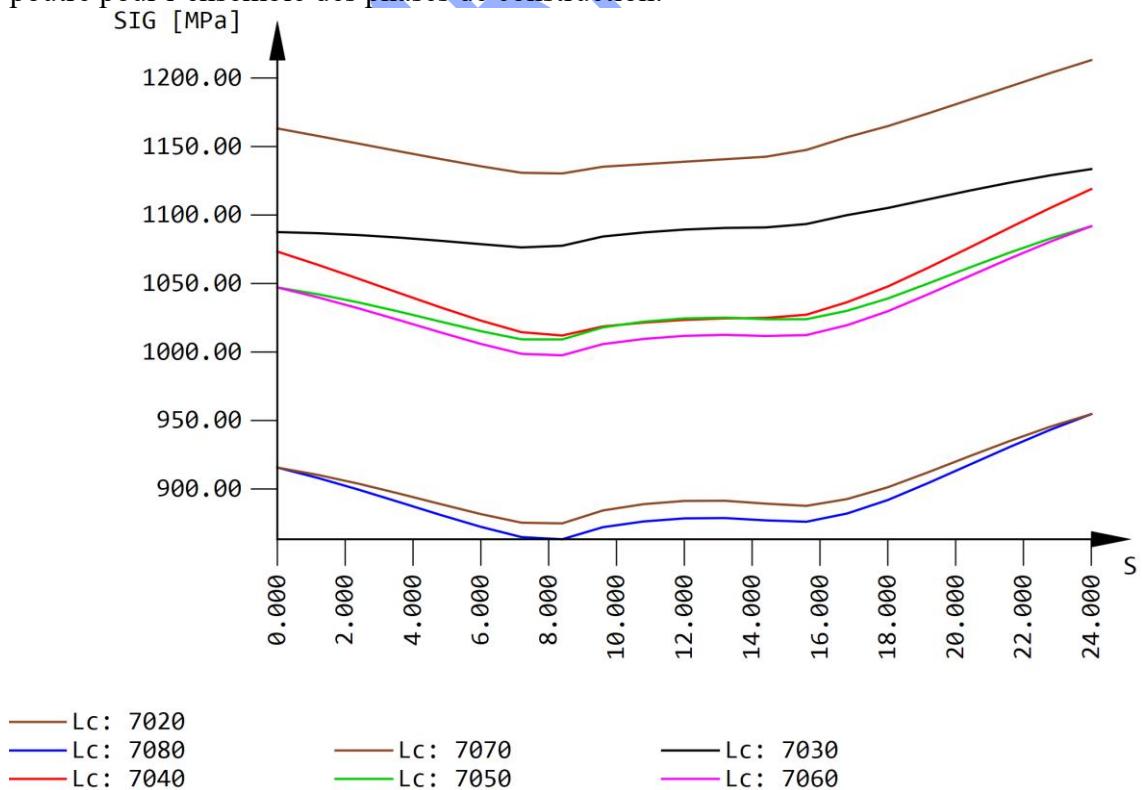
4.2 Contrainte fibre supérieure

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes en fibre supérieure le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



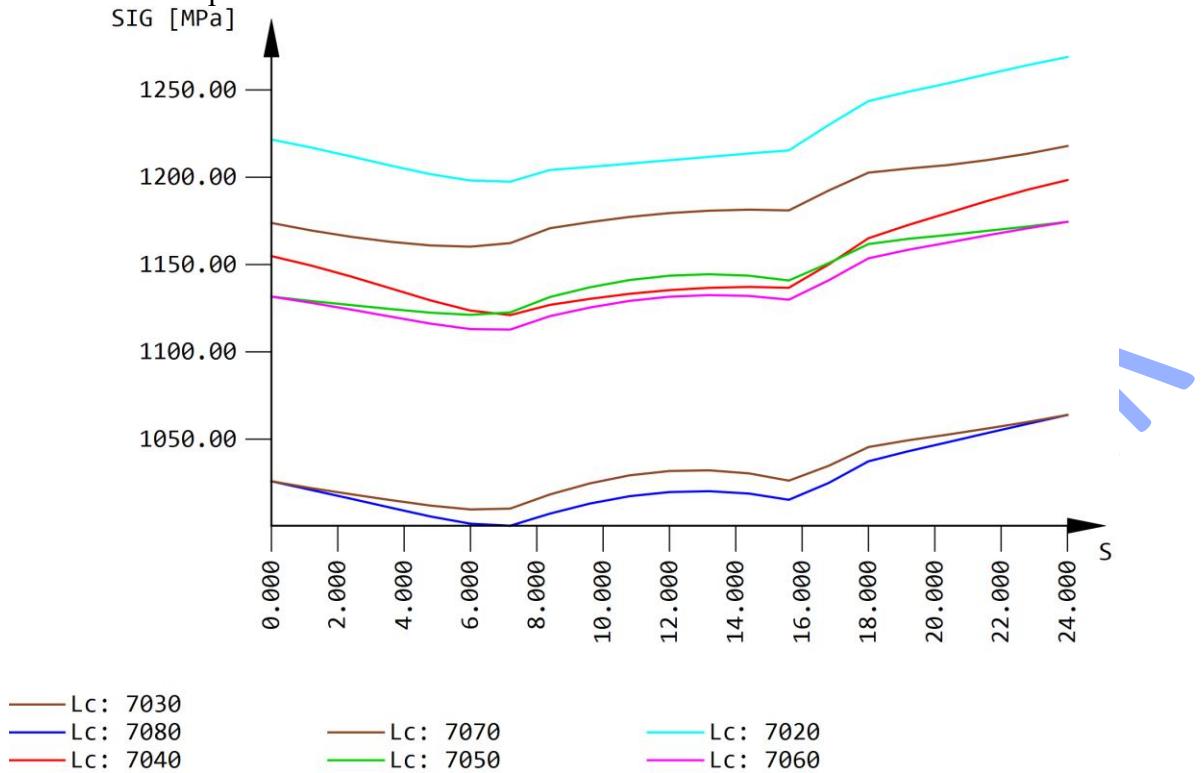
4.3 Contrainte câble n°1 (le plus bas)

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°1 (le plus bas) le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



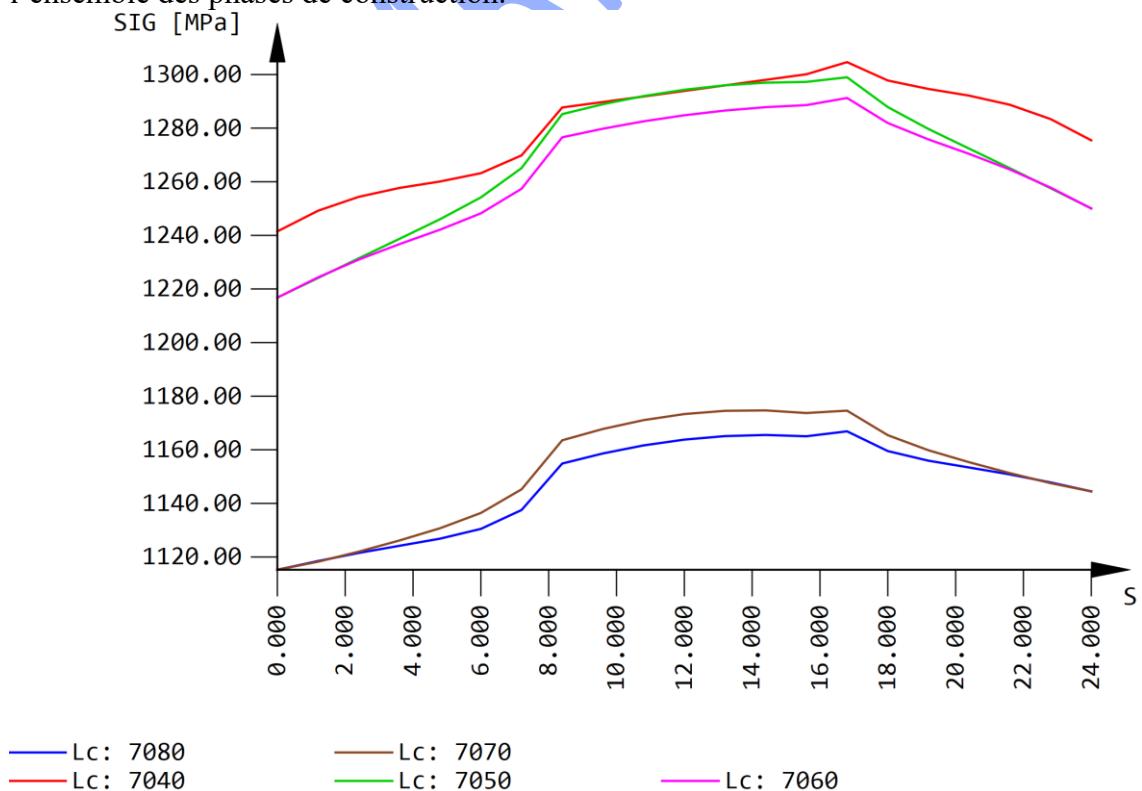
4.4 Contrainte câble n°2

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°2 le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



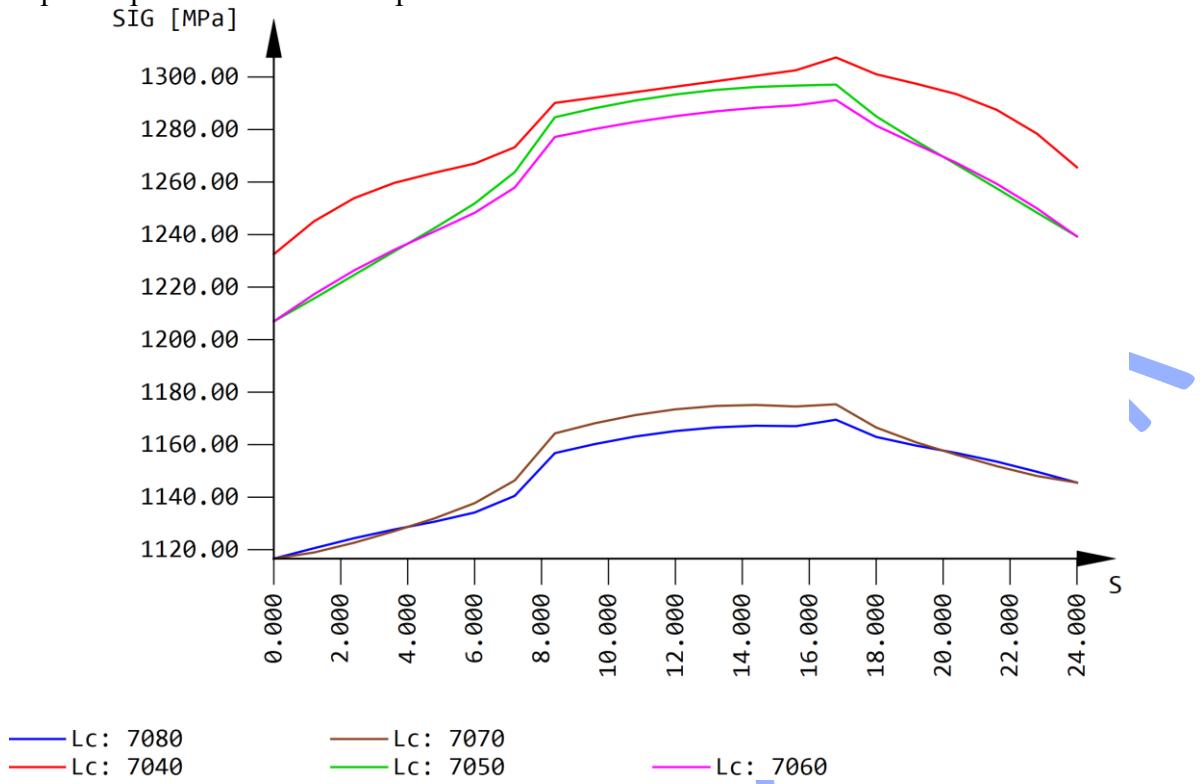
4.5 Contrainte câble n°3

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°3 le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.



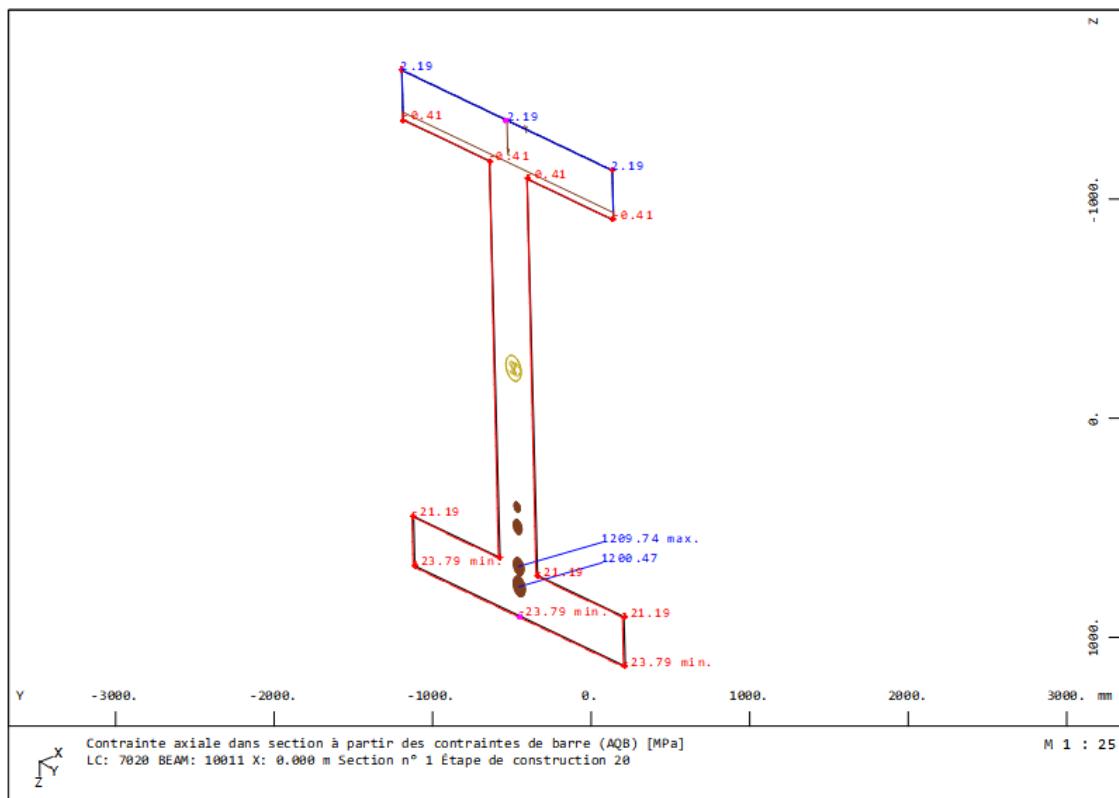
4.6 Contrainte câble n°4 (le plus haut)

Le diagramme suivant présente l'évolution des contraintes dans le câble n°4 (le plus haut) le long de la poutre pour l'ensemble des phases de construction.

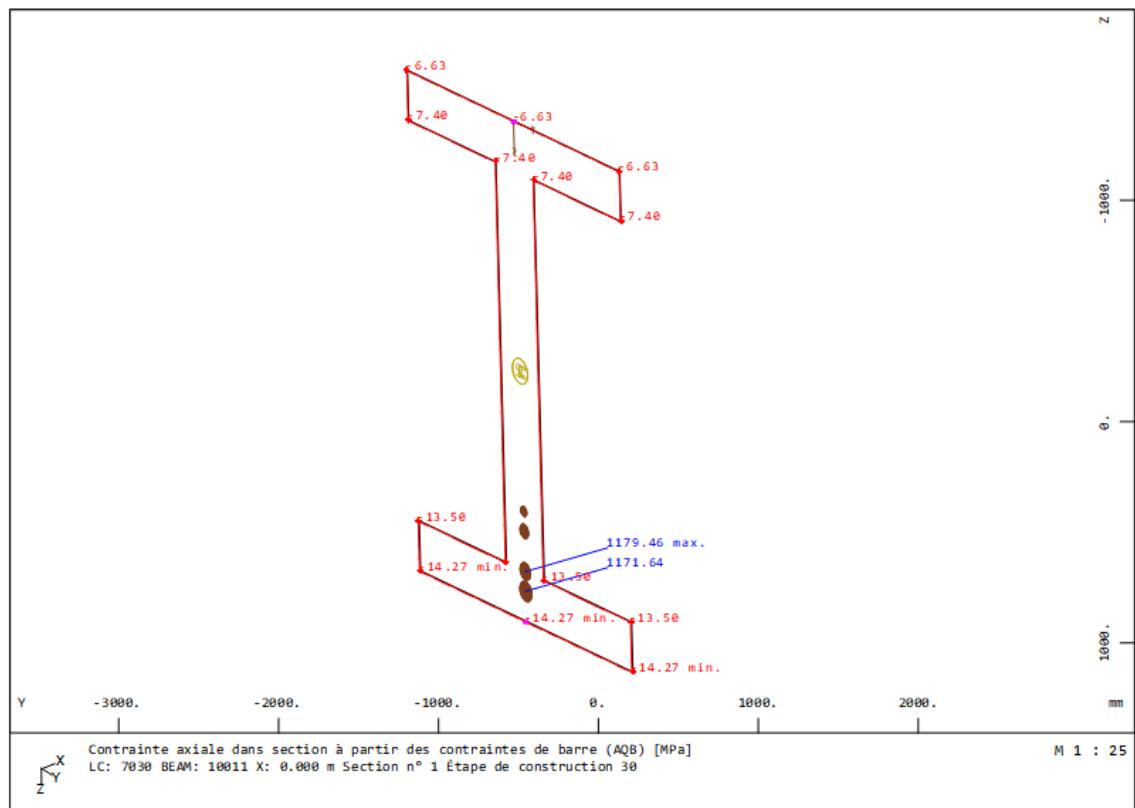


4.7 Diagramme des contraintes (béton et câbles) au niveau de la section médiane

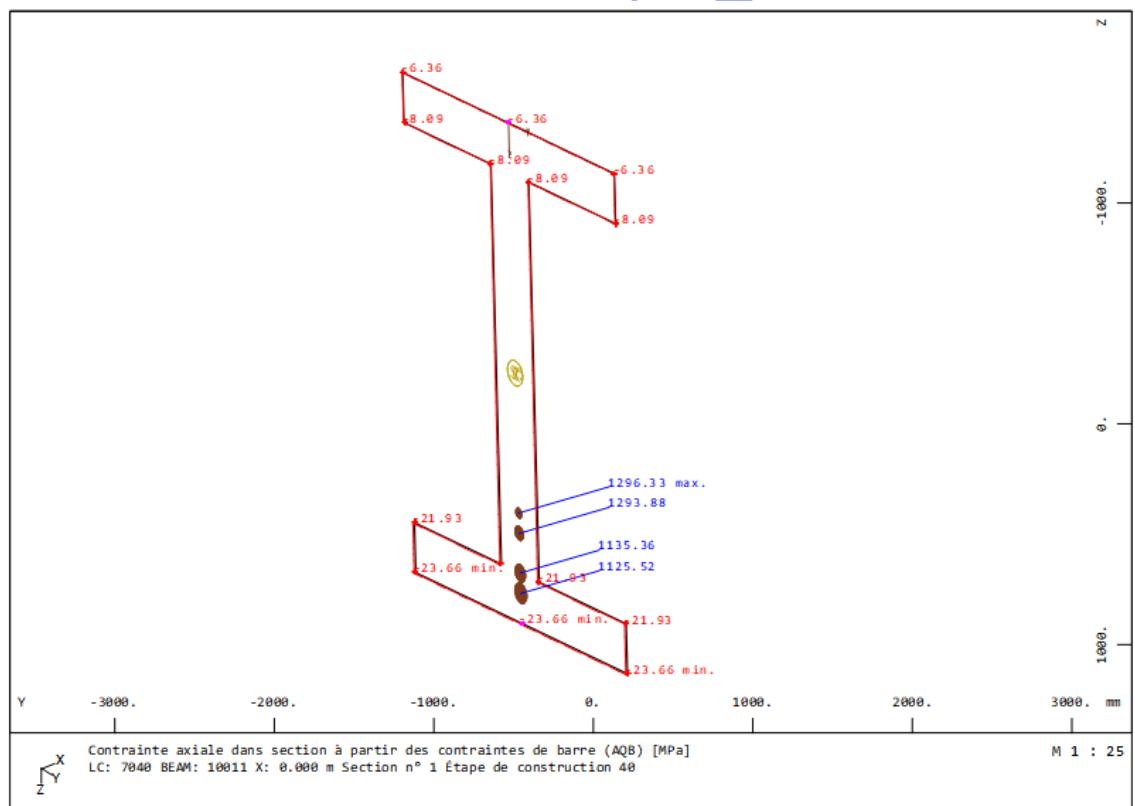
LC 7020 :



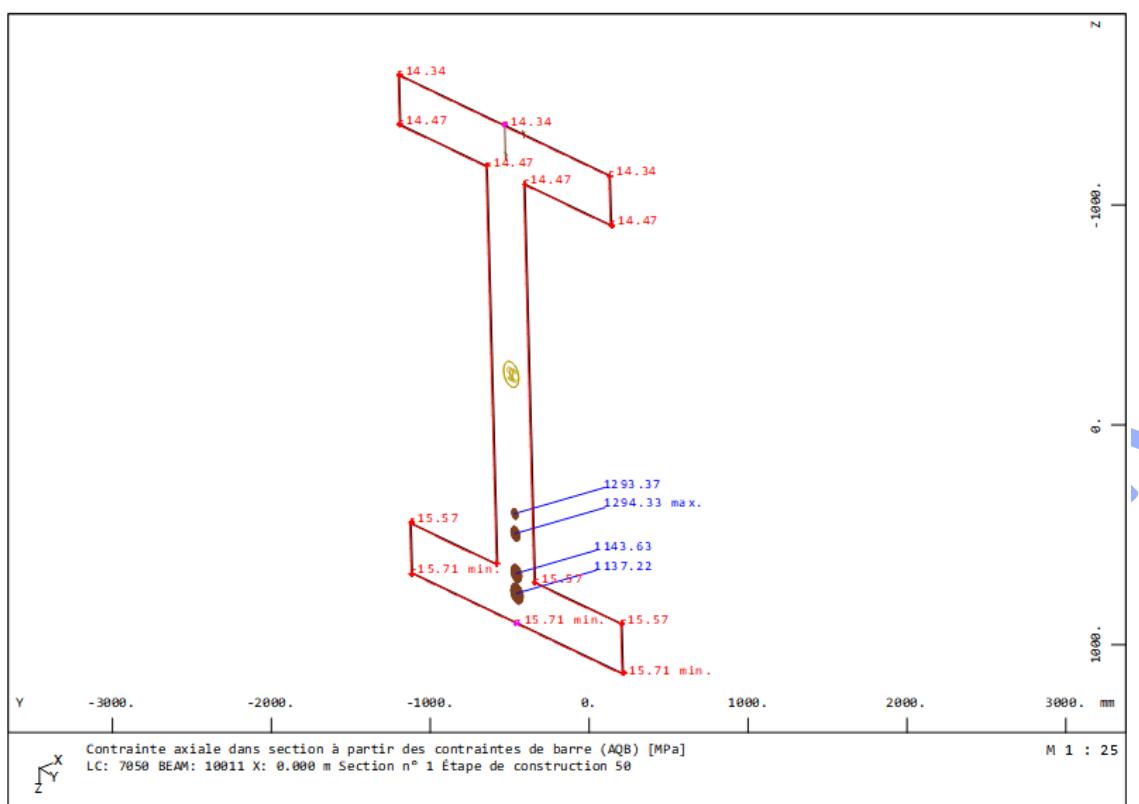
LC 7030 :



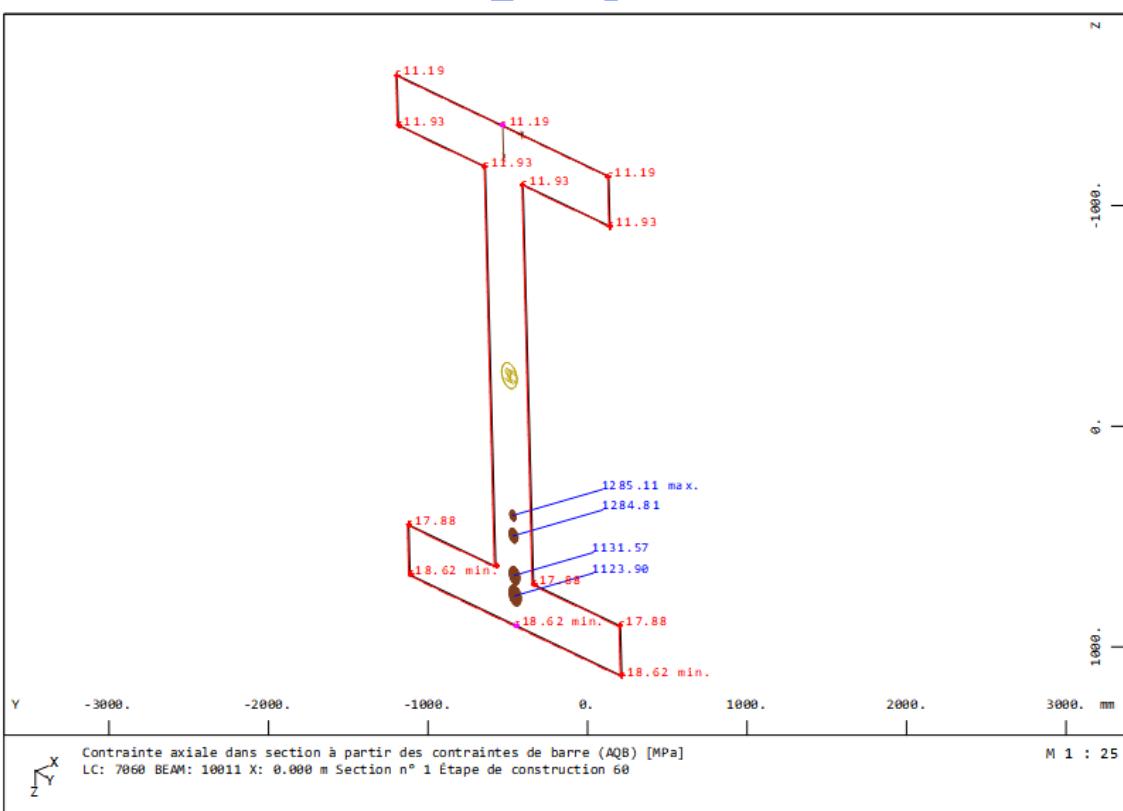
LC 7040 :



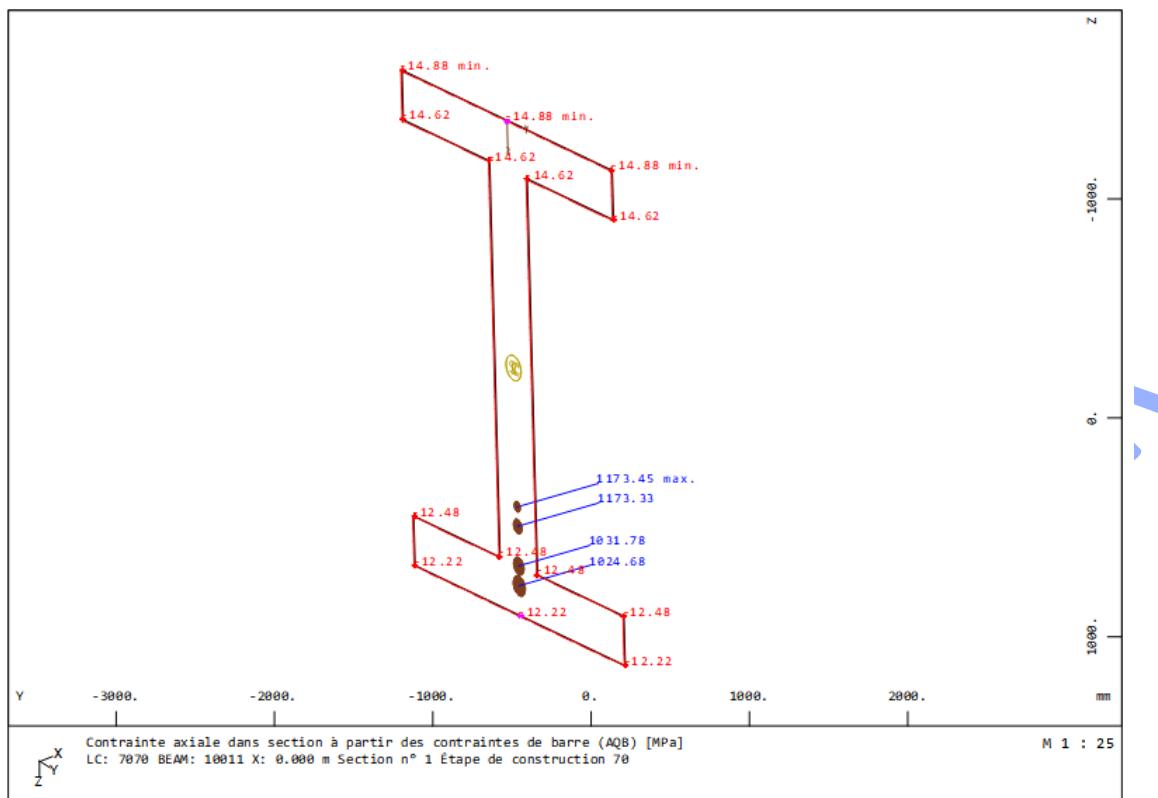
LC 7050 :



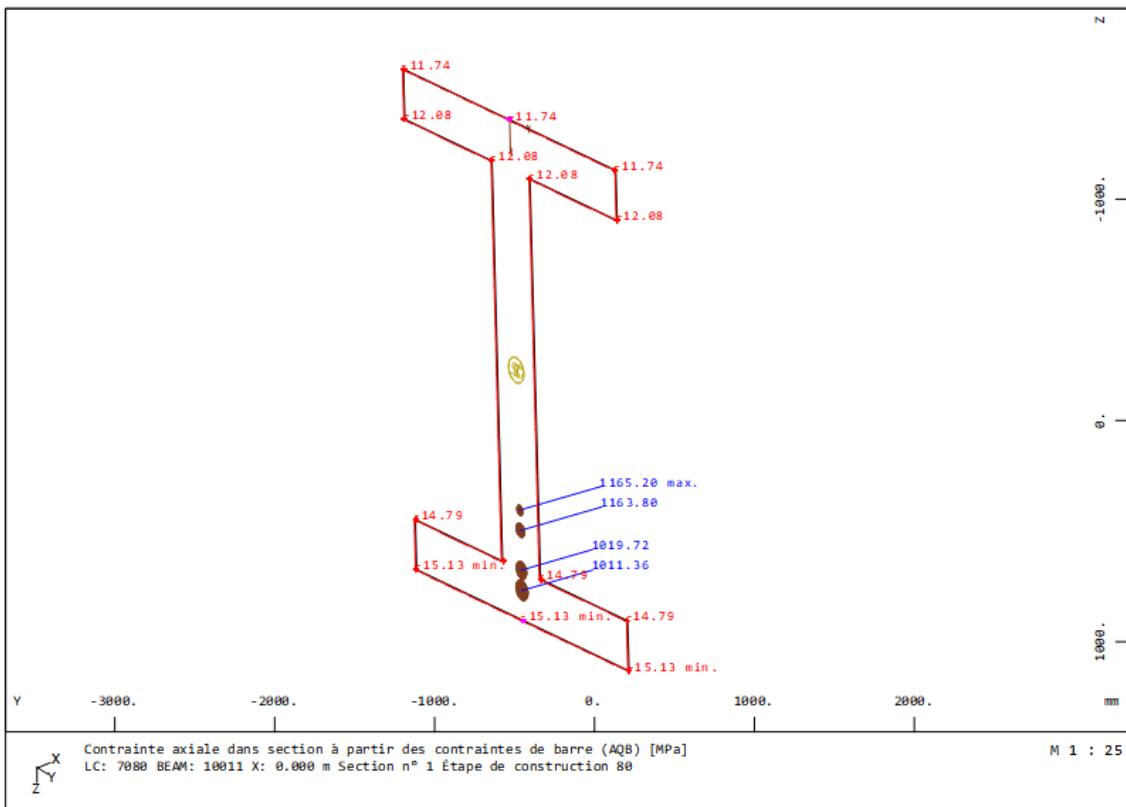
LC 7060 :



LC 7070 :



LC 7080 :



4.8 Conclusion

Le tableau suivant présente un récapitulatif des contraintes en fibre inférieure et supérieure sous chaque phase de calcul au niveau de la section médiane :

Convention de signe :

- : contrainte de compression

+ : contrainte de traction

Phase	Contrainte fibre supérieure (MPa)	Contrainte fibre inférieure (MPa)
7020	2,19	-23,79
7030	-6,63	-14,27
7040	-6,36	-23,66
7050	-14,34	-15,71
7060	-11,19	-18,62
7070	-14,88	-12,22
7080	-11,74	-15,13

Vérification — conformité ($|\sigma| \leq$ limite)

Rappels des limites utilisées :

- **7020** : traction $\leq 2,85$ MPa, compression ≤ 30 MPa
- **7030 / 7040** : traction ≤ 0 MPa, compression $\leq 22,5$ MPa
- **7050 / 7070** : traction ≤ 0 MPa, compression ≤ 30 MPa
- **7060 / 7080** : traction $\leq 4,07$ MPa, compression ≤ 30 MPa

Tableau récapitulatif (valeurs absolues comparées) :

- **7020** — sup = +2,19 MPa (traction) $\checkmark \leq 2,85$; inf = -23,79 MPa $\rightarrow |23,79| \checkmark \leq 30$
- **7030** — sup = -6,63 MPa (compression) $\checkmark \leq 22,5$; inf = -14,27 MPa $\checkmark \leq 22,5$
- **7040** — sup = -6,36 MPa $\checkmark \leq 22,5$; inf = -23,66 MPa $\rightarrow |23,66| > 22,5 \times$ (non conforme)
- **7050** — sup = -14,34 MPa $\checkmark \leq 30$; inf = -15,71 MPa $\checkmark \leq 30$
- **7060** — sup = -11,19 MPa $\checkmark \leq 30$; inf = -18,62 MPa $\checkmark \leq 30$
- **7070** — sup = -14,88 MPa $\checkmark \leq 30$; inf = -12,22 MPa $\checkmark \leq 30$
- **7080** — sup = -11,74 MPa $\checkmark \leq 30$; inf = -15,13 MPa $\checkmark \leq 30$

Bilan : toutes les phases sont conformes sauf **la phase 7040** où la contrainte en **fibre inférieure** dépasse légèrement la limite ELS quasi-permanent ($|23,66| > 22,5$ MPa).

Écart : $23,66 - 22,50 = 1,16$ MPa (~5,1 % au-dessus de la limite).

Interprétation

- L'excès est **faible** ($\approx 5\%$) et localisé à **7040 (fibre inférieure)** : cela signifie que la réduction à 8 torons a presque résolu les dépassements observés précédemment, mais un ajustement mineur reste nécessaire pour respecter strictement la contrainte admissible en ELS quasi-permanent.
- Les autres phases (y compris la mise en tension 7020) sont **conformes** avec la configuration à 8 torons.

5. CONCLUSION GENERALE

L'analyse de l'état de contrainte dans la poutre, réalisée sur l'ensemble des phases de construction (LC 7020 à 7080), a permis de vérifier la conformité des sollicitations vis-à-vis des critères admissibles en service.

Une première configuration avec **12 torons** a conduit à des dépassements significatifs des contraintes limites, en particulier en compression (jusqu'à 36 MPa). Afin de corriger cette non-conformité, une solution optimisée a été adoptée consistant à réduire le nombre de torons à **8 unités**.

Les nouveaux résultats montrent une nette amélioration de l'équilibre des contraintes : la quasi-totalité des phases respecte les valeurs admissibles en traction et compression. Seule la phase **7040** présente un léger dépassement en fibre inférieure (23,66 MPa contre une limite de 22,5 MPa), soit un écart limité d'environ **5 %**, qui ne remet pas en cause la sécurité globale de la section mais nécessite un ajustement complémentaire.

En conclusion, la configuration à **8 torons** constitue une solution **satisfaisante** pour assurer l'équilibre structurel et le respect des contraintes de service, sous réserve d'une optimisation fine de la tension de précontrainte (réduction de l'ordre de 5 %) ou d'un renforcement passif localisé. Cette approche garantit la conformité aux exigences normatives, tout en optimisant l'utilisation de la précontrainte.