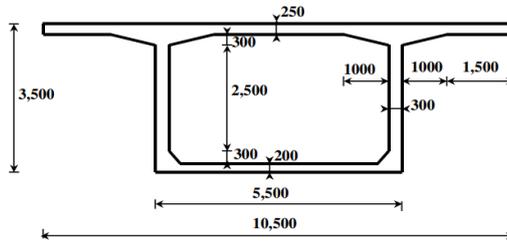


CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

Caisson - Dimensions

| Point | [m] | Contour extérieur | | Contour intérieur | |
|----------|-------------------|-------------------|------|-------------------|------|
| | | -5.25 | 3.50 | -2.45 | 2.95 |
| Point 1 | [m] | 5.25 | 3.50 | -1.45 | 3.25 |
| Point 2 | [m] | 5.25 | 3.25 | 1.45 | 3.25 |
| Point 3 | [m] | 3.75 | 3.25 | 2.45 | 2.95 |
| Point 4 | [m] | 2.75 | 2.95 | 2.45 | 0.5 |
| Point 5 | [m] | 2.75 | 0.00 | 2.15 | 0.2 |
| Point 6 | [m] | -2.75 | 0.00 | -2.15 | 0.2 |
| Point 7 | [m] | -2.75 | 2.95 | -2.45 | 0.50 |
| Point 8 | [m] | -3.75 | 3.25 | -2.45 | 2.95 |
| Point 9 | [m] | -5.25 | 3.25 | | |
| Point 10 | [m] | -5.25 | 3.50 | | |
| Point 11 | [m ²] | -5.25 | 3.50 | | |



| | | | | |
|----------|-----|-------|-------|-------|
| L_poutre | [m] | 40.00 | 70.00 | 40.00 |
|----------|-----|-------|-------|-------|

| | | |
|-----------|-------------------|------|
| A_section | [m ²] | 6.15 |
| h_cdg | [m] | 2.24 |
| v | [m] | 1.27 |
| v' | [m] | 2.24 |

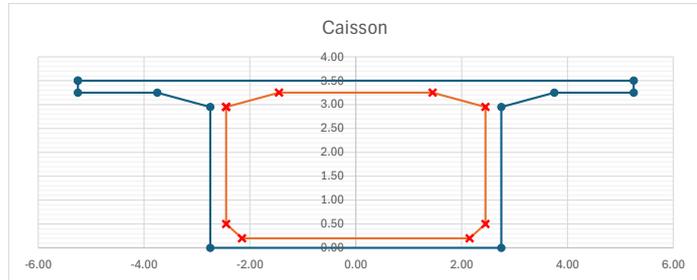
$$Y_G = \frac{\sum (S_i \cdot Y_{G_i})}{S}$$

| | | |
|---------------|-------------------|--------|
| I_section/cdg | [m ⁴] | 11.110 |
|---------------|-------------------|--------|

| | | |
|-----|-------------------|-------|
| I/v | [m ³] | 8.783 |
|-----|-------------------|-------|

| | | |
|------|-------------------|-------|
| I/v' | [m ³] | 4.971 |
|------|-------------------|-------|

| | | | |
|--------|-----|-------|-------------------------------------------------------------------|
| ρ | [-] | 0.639 | $\rho = \frac{I_c}{A_c \cdot v \cdot v'}$ (Rendement géométrique) |
|--------|-----|-------|-------------------------------------------------------------------|



BETON

Caractéristiques matériaux

| | | |
|----------------------------|-------|---------|
| Béton | | |
| f _{ck} | [MPa] | 35.00 |
| f _{ctm} | [MPa] | 3.21 |
| E _{ct} | [MPa] | 34 077 |
| Armatures passives | | |
| f _{yk} | [MPa] | 500 |
| Armatures de précontrainte | | |
| f _{pk} | [MPa] | 1 860 |
| f _{p0,1k} | [MPa] | 1 640 |
| E _{pr} | [MPa] | 195 000 |

Limites de contraintes

| | | | | | | | |
|--------------|----------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Construction | | | $\sigma_{Construction} \leq 0.60 f_{ck}$ | #REF! MPa | avec | $P = r_{sup} \cdot r_c \cdot P_u$ | $r_{constr} = 1.146$ |
| ELS QP | 0.00 MPa | $\leq \sigma_{ELS_QP} \leq 0.45 f_{ck}$ | 15.75 MPa | avec | $r_{inf} \cdot P_l < P < r_{sup} \cdot r_c \cdot P_u$ | P_l défavorable | |
| ELS FREQ | 0.00 MPa | $\leq \sigma_{ELS_FREQ} \leq 0.60 f_{ck}$ | 21.00 MPa | avec | $r_{inf} \cdot P_u < P < r_{sup} \cdot P_u$ | P_u est défavorable | |
| ELS CARA | | $\leq \sigma_{ELS_CARA} \leq 0.60 f_{ck}$ | 21.00 MPa | avec | $r_{inf} \cdot P_u < P < r_{sup} \cdot P_u$ | P_u est défavorable | |

PRECONTRAITE

Câbles de fléau 12T15

$P_u = P_m(\infty) = 1.90$ MN/câble 12T15 à l'infini - Mise en tension au fur et à mesure de la construction de fléau

Précontrainte intérieure 12T15

$P_u = P_m(\infty) = 1.90$ MN/câble 12T15 tendus juste après clavage

Précontrainte extérieure 19T15

$P_u = P_m(\infty) = 3.200$ MN/câble 19T15 extérieurs filants mis en tension sur la structure complète.

CHARGES

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Poids propre (g) | 0.154 MN/ml |
| Superstructure (g') | 0.045 MN/ml |
| TS | 0.510 MN ($\psi = 0.60$) |
| UDL | 0.034 MN/ml |
| Gradient thermique const. | 10 °C |
| Qconstruction | 0.500 MN |
| Gradient thermique const. | 6 °C |

DETERMINATION DU CABLAGE DE FLEAU ET DECOUPAGE EN VOUSOIRS

Construction par encorbellements successifs

- > Il faut faire la vérification de la stabilité de fléau.
- > Il faut généralement étudier le coulage de chaque voussoir, on se concentrera sur le cas dimensionnant.
- > On vérifie le cas dimensionnant : ensemble des voussoirs coulés qui donne le maximum de câbles de fléau

Choix d'un découpage en voussoirs

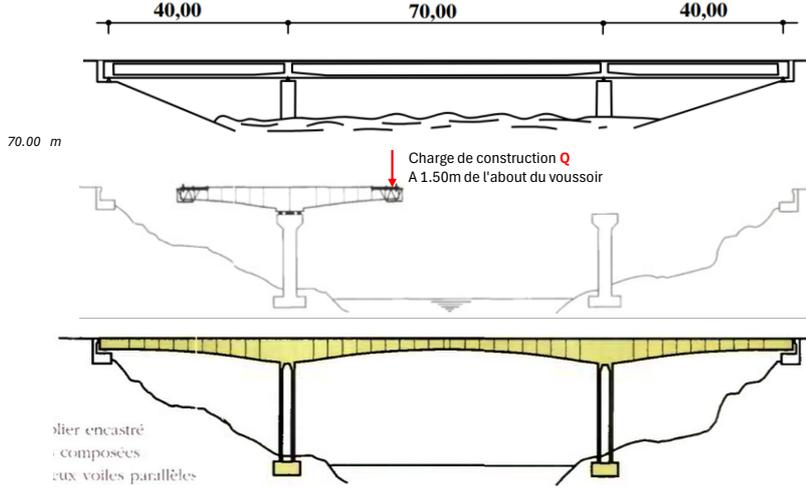
Hypothèses sur les longueurs de voussoirs :

Généralement, longueur des voussoirs courants : 2.50 à 4.00m.

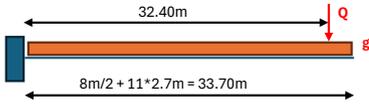
Voussoir sur pile, longueur de 8m pour mettre en position les équipages mobiles pour bétonnage du premier voussoir courant.

Voussoir de clé, de clavage, au moins 2m de longueur pour assurer le recouvrement des armatures passives.

| | Longueur [m] | Nombre | Longueur tot [m] |
|----------------------------|--------------|--------|------------------|
| Voussoir sur pile | 8.00 | 1.00 | 8.00 |
| Voussoir courant | 2.70 | 22.00 | 59.40 |
| Voussoir de clé | 2.60 | 0.00 | 0.00 |
| Fléau sans clé | | | 67.40 |
| Demi-fléau sans clé | | | 33.70 |



Le demi fléau est modélisé par une console encastrée à l'axe de la pile.



Hypothèses simplificatrices considérées :

Prise en compte uniquement des charges permanentes

Non prise en compte des charges de chantier (hors équipage)

Moment calculé à l'axe de la pile

Hypothèse sur "d", il faut itérer sur cette valeur.

Moment sur pile

$M = -g * L^2 / 2 - Q * (L - 1.3)$ avec $L = 33.7$ m

$M [MN.m] = -103.44$

Précontrainte minimale P_{II} (surcritique)

$P_{II} [MN] = (-M' + I/v.\sigma_1) / (\rho.v' + v - d')$

$P_{II} [MN] = 37.37$

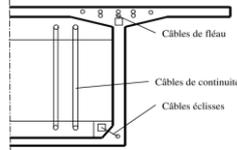
avec $d [m] = 0.160$

$\sigma_1 [Mpa] = -1.00$

Il faut itérer sur d (voir calcul plus bas) :

avec $d [m] = 0.164$ étude variation de d

$P_{II} [MN] = 37.42$ écart 0.1%



Nombre de câbles 12T15S :

19.67

11 paires de 12T15S

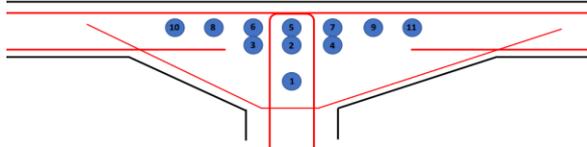
$P_{u,min} [MN] = 39.90$ Ok, $P_{u,min} > P_{II}$

Câbles à mettre en place avant bétonnage du voussoir n.

Généralement, on équipe chaque voussoir d'un paire de câbles de fléau.

Recalcul de d

| Enrobage = | 0.08 | m | | nb câbles | di [m] |
|--------------|------|---|-------|-----------|--------------|
| Diam_gaine = | 0.08 | m | lit 1 | 7 | 0.120 |
| | | | lit 2 | 3 | 0.200 |
| | | | lit 3 | 1 | 0.360 |
| | | | | | 0.164 |

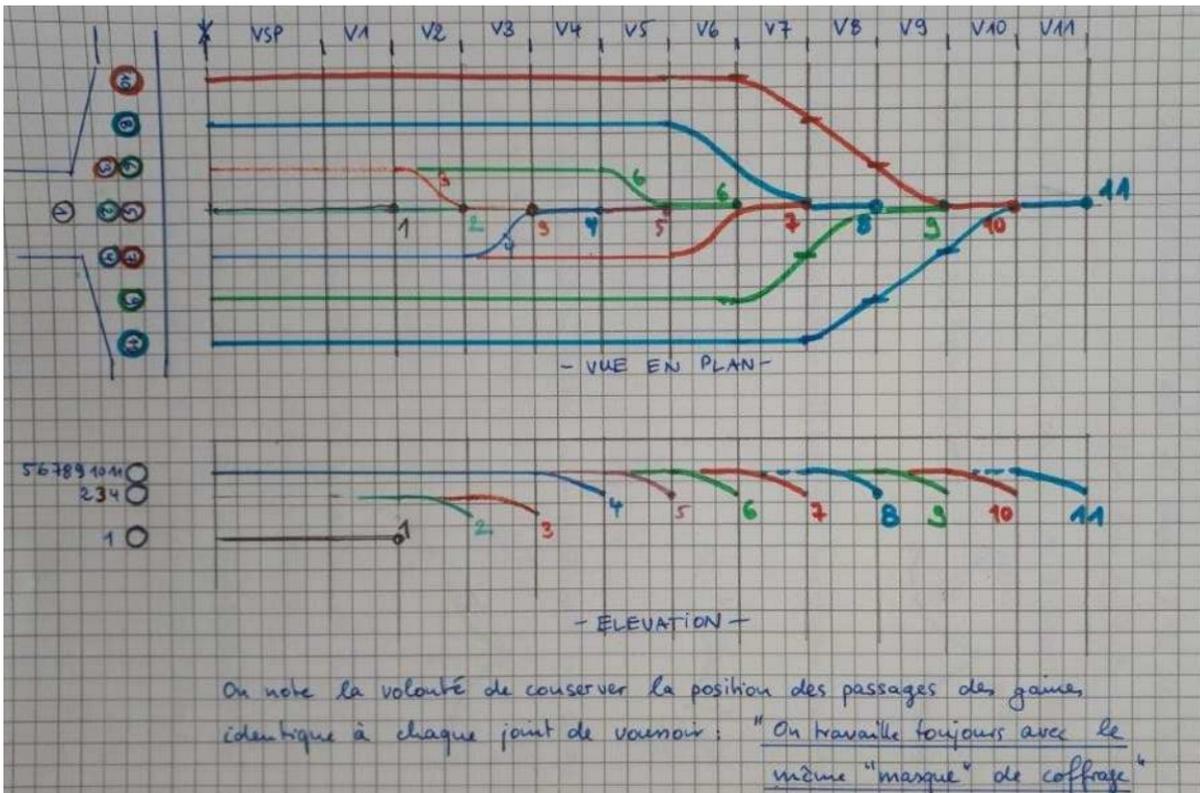


Ordre de mise en tension

Après la mise en tension des câbles, les gaines sont successivement injectées

Il faut assurer l'étanchéité entre joints

On tend les gaines "basses" d'abord pour éviter l'écrasement des gaines sous pression à l'ivde de la précontrainte.

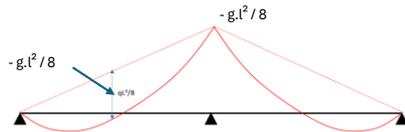


EFFET DU POIDS PROPRE EN FIN DE CONSTRUCTION

Remarque préliminaire : Effet du phasage à la distribution des efforts dans la structure terminée

Cas exemple d'un pont à 2 travées construit de 3 manières différentes

a) Pont coulé sur cintre général



b) Pont à travées entières préfabriquées, puis clavage sur pile



c) Pont construit par encorbellement successifs puis clavage au droit des culées



C'est ce même principe de superposition de phases successives que nous devons appliquer dans notre exemple.

Chaque phase correspond :

Soit à l'application d'une nouvelle charge

Soit au changement de schéma statique :

Nouveau voussoir donc portée modifiée

Clavage donc continuité à tenir compte

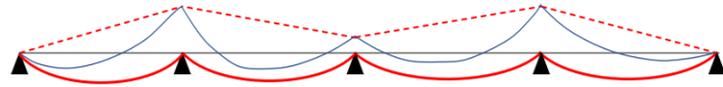
Passage de cale provisoire à l'appareil d'appui donc passage d'encastrement à appui glissant fixe

etc

Le principe de superposition consiste alors à ajouter l'effet de la phase à l'état obtenu à la phase précédente.

En fin de construction, le moment du poids propre obtenu va différer du moment isostatique des travées rendues indépendantes par un moment hyperstatique.

Le moment hyperstatique varie linéairement en travée et est continu sur appui.



En rouge plein : moment isostatique
 En rouge pointillé : moment hyperstatique de continuité
 En bleu : Moment final

Application du principe de superposition à notre exemple

Les 3 phases de l'énoncé sont à considérer

• **La cinématique de construction est la suivante :**

- **Phase 1 :** construction de fléaux symétriques, provisoirement encastres sur leur pile



- **Phase 2 :** clavages de rive, on libère les encastres sur piles



- **Phase 3 :** clavage central



Les phases 2 et 3 doivent être sous-décomposées :

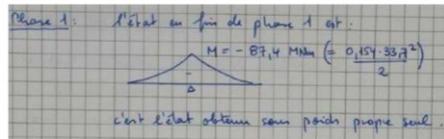
- Phase 2a : coulage du voussoir de clavage en rive : on laisse d'abord durcir le béton du voussoir de clavage, puis on applique son poids en décoffrant
- Phase 2b : relâchement de l'encastrement après prise du béton

- 3a : coulage du voussoir de clavage par application de la charge de poids à l'extrémité des 2 fléaux
- 3b : prise du béton et changement de schéma statique avec création de la continuité en travée centrale
- 3c : déhissage de l'équipage mobile par application d'une charge opposée à la charge de poids de l'équipage mobile

Phase 1 Construction du fléau

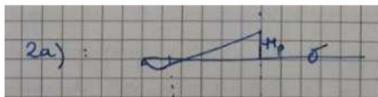


- $G = A \times \gamma = 6.145 \text{ m}^2 \times 0.025 \text{ MN/m}^3 = 0.1536 \text{ MN/ml}$
- $M_{\text{appui}} = -q L^2 / 2$

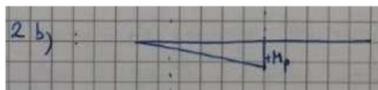


Mappui = $-qL^2/2$
 Mappui = -87.24 kN.m
 avec l = 33.70 m

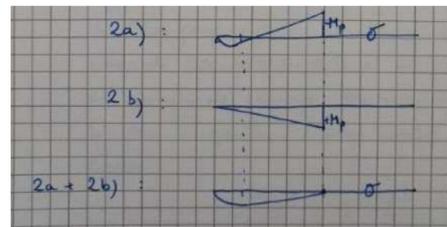
Phase 2a Coulage du voussoir de clavage en rive sur cintre
 Durcissement du béton du voussoir de clavage
 Application du poids au décoffrage et activation de l'inertie du voussoir de clavage en rive



Phase 2b Relâchement de l'encastrement après prise du béton



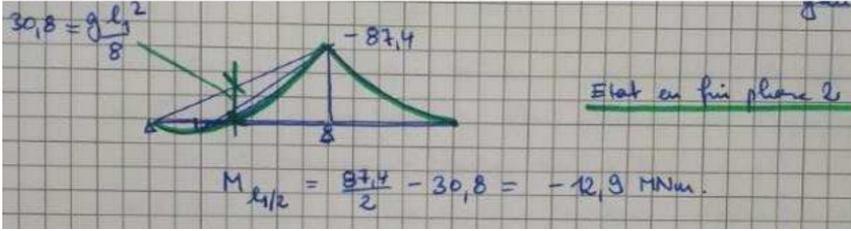
Cumul 2a + 2b



Etat à la fin de la phase 2

On superpose les moments de la phase 1 et du cumul des phases 2a et 2b.

La structure est toujours à ce stade isostatique, il est donc possible de cumuler les moments.



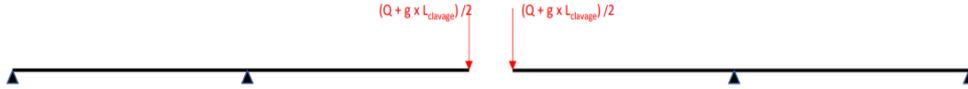
Fleche du moment à mi-travée
 $M = g \cdot L^2 / 8 = 30.73 \text{ MN.m}$
 avec $L = 40.00 \text{ m}$
Moment à mi-travée fin phase 2
 $M_{\text{mi-travée}} = M_{\text{appui}} / 2 - g \cdot L^2 / 8$
 $M_{\text{mi-travée}} = -12.90 \text{ MN.m}$

Phase 3a

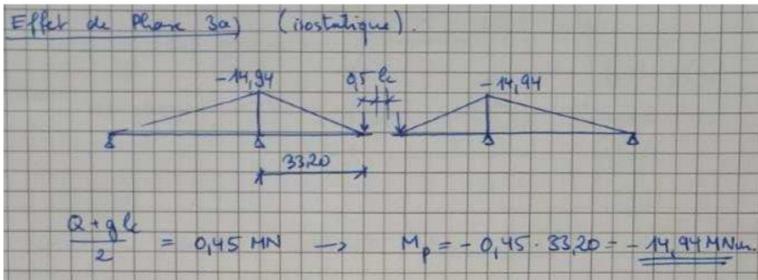
Bétonnage du voussoir de clavage

Application à l'extrémité de chaque fléau, à l'accroche de l'équipage mobile, la charge correspondante au poids de l'équipage mobile et du poids du béton frais du voussoir de clavage.

On reprend la moitié sur le fléau de gauche, l'autre moitié sur le fléau de droite.



A ce stade, la structure est toujours isostatique.



Moment du à l'équipage mobile

Charge en about de fléau
 $(Q + g \cdot l_c) / 2 = 0.450 \text{ MN}$

Moment sur appui

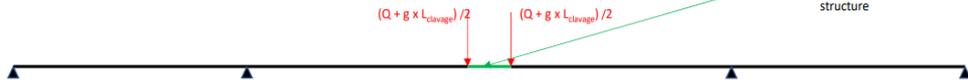
$M = F \cdot L = -14.93 \text{ MN.m}$
 avec $L = 33.20 \text{ m}$ $L_{\text{fléau}} = 0.50 \text{ m}$

Phase 3b

Prise du béton du voussoir de clavage central

Il s'agit d'un changement de schéma statique, la structure devient hyperstatique.

Le poids du voussoir de clavage est déjà pris en compte dans la phase précédente. Il est "enfermé" dans la structure.

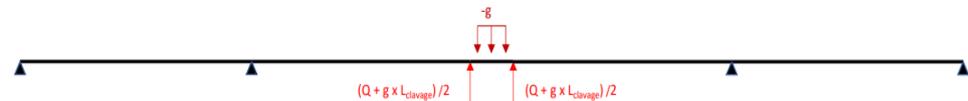


Prise du béton et ajout de la raideur du voussoir de clavage après déformation de la structure

Aucun effet M = 0

Phase 3c

Décoffrage et suppression du poids de l'équipage mobile

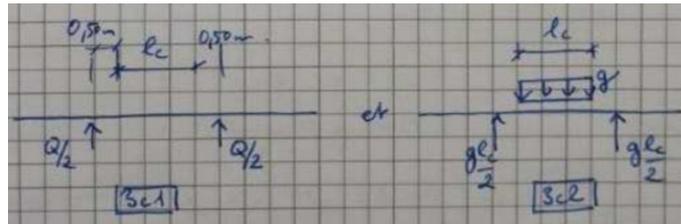


Au moment de l'enlèvement de l'équipage, le voussoir de clavage doit se tenir tout seul :

Application de son poids de manière linéaire

L'enlèvement de l'équipage mobile est représenté par une charge ascendant annulant les réactions de l'équipage (y compris le poids du béton frais)

La phase 3c peut également se décomposer en 2 phases



Phase 3c1

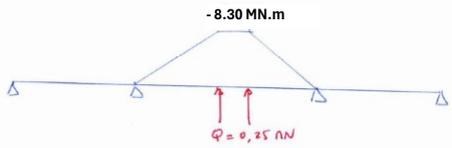
On applique la méthode des 3 moments, on rend la travée centrale isostatique pour calculer les rotations w' et w'' sous chargement.

$Q/2 = 0.25$ MN appliqué à 33.7 m de l'axe de la pile

Moment Iso dus aux charges Q verticales

$M = Q/2 * L = 8.30$ MN.m

avec $L = 33.20$ m

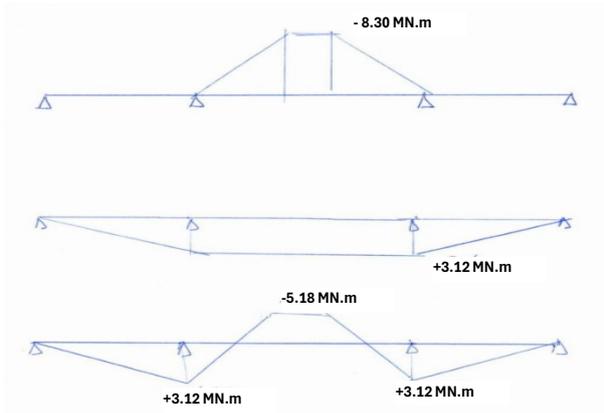


$$El.w'_2 = \int_0^{L_2} M_{iso} \left(1 - \frac{x}{L_2}\right) dx$$

$$El.w'_2 = \frac{1}{2} \left[8.425 * \frac{2.6 + 70}{2} \right]$$

$El.w'^2 = 150.65$ MN.m²

Effet de 3c1



Moment hyperstatique (continuité de la poutre)



Symétrie :

$c_1.M_1 + a_2.M_2 + b_2.M_2 - w'_2 = 0$

$w''_1 = 0$ car travée 1 non chargée
 $M_0 = 0$

$a_2 = L_2 / 3.EI$

$c_1 = L_1 / 3.EI$

$b_2 = L_2 / 6.EI$

$M_1 = M_2$ par symétrie

$(L_1 / 3 + L_2 / 2).M_1 = El.w'_2$

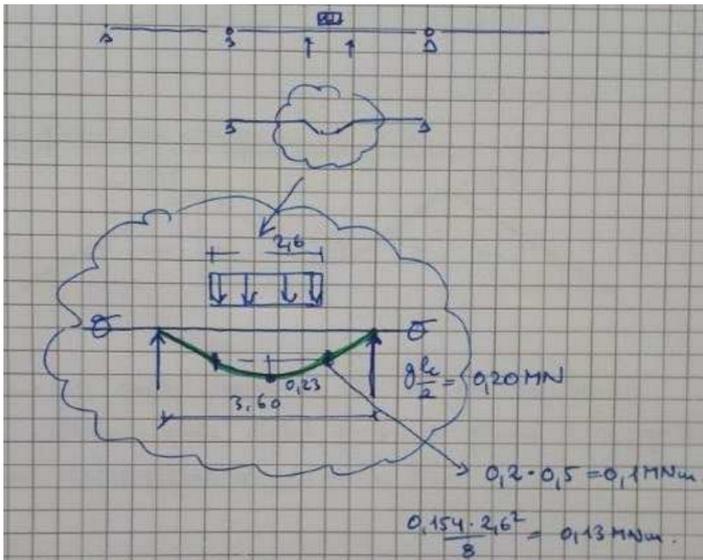
$M_1 = El.w'_2 / (L_1 / 3 + L_2 / 2)$

$M_1 = 3.12$ MN.m

Phase 3c2

Charge c2

Le moment iso est nul à l'extérieur des appuis de l'équipage mobile



Rotations iso

$El.w'_2 = -El.w''_2 = 1/2 * \text{aire } M_{iso}$

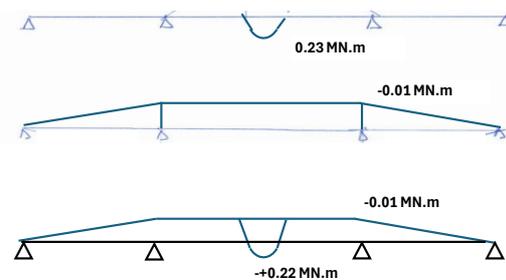
$El.w''_2 = -1/2 * [0.1 * (3.6 + 2.6)/2 + 2/3 * 0.13 * 2.6]$

$El.w''_2 = -0.27$ MN.m²

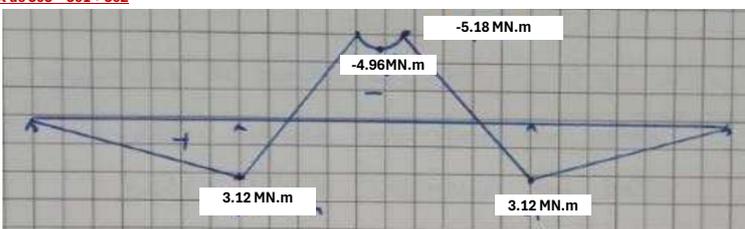
$M_{hyper} = M_1 = M_2 = El.w'_2 / (L_1 / 3 + L_2 / 2)$

$M_{hyper} = -0.01$ MN.m

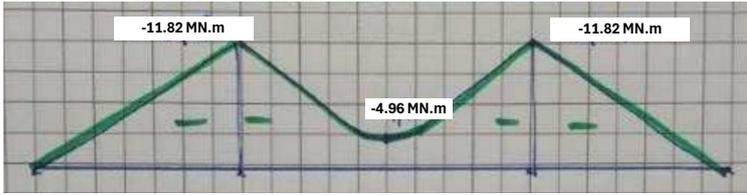
Effet de 3c2



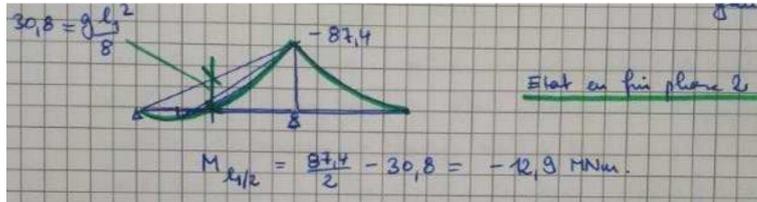
Effet de 3c3 = 3c1 + 3c2



Effet Global 3a+3c

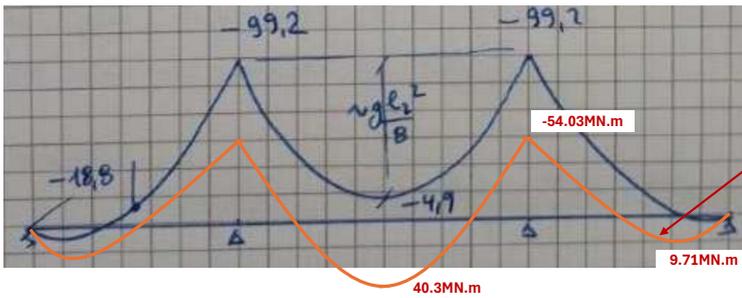


Rappel moment en fin de phase 2:



Moment du poids propre en fin de construction

On additionne donc l'état en fin de phase 2 avec l'effet global de la phase 3



Au milieu de la première travée
 $M = -12,90 - 11,82/2 = -18,80 \text{ MN.m}$

Moment poids propre activé
en une seule fois.