

ANNEXE 4 DETERMINATION DES EFFORTS MAXIMA TRANSMIS PAR UNE BARRIERE DE SECURITE SUR UN OUVRAGE D'ART LORS D'UN IMPACT

4.1 INTRODUCTION

Cette annexe décrit les méthodes permettant de déterminer les forces maximales qui peuvent être transmises par une barrière de sécurité en acier sur un ouvrage d'art, à la suite d'un impact par un véhicule tamponneur.

Note : Ces forces peuvent être prises en considération lors de la vérification d'un ouvrage d'art existant ou d'un nouvel ouvrage d'art.

4.2 DEFINITIONS

4.2.1 Tablier de pont

Partie structurale de la plate-forme horizontale de l'ouvrage d'art, à l'exception d'un éventuel renforcement du tablier de pont.

4.2.2 'courbe M/V' ou 'courbe de résistance maximale'

Courbe qui donne les couples 'moment résistant maximum' – 'effort tranchant résistant maximum' d'une section transversale d'acier, en tenant compte de l'interaction « moment – effort tranchant » (réduction du moment résistant engendrée par la présence simultanée d'un effort tranchant).

4.2.3 Structure

Ensemble des éléments structuraux de l'ouvrage d'art, y compris le tablier du pont et son renforcement éventuel (le système d'étanchéité et les parachèvements du pont ne font pas partie de la structure).

4.2.4 Barrière de sécurité ancrée

Barrière de sécurité fixée au tablier de pont ou à la structure de l'ouvrage d'art par des ancrages en acier empêchant le déplacement de la structure lors d'un impact par un véhicule tamponneur.

4.3 CHARGE MAXIMUM LORS D'UN IMPACT

Les forces maximales transmises par des barrières de sécurité en acier ancrées sont les forces correspondant à la rupture de l'élément le plus faible des barrières. Ces forces transmises consistent en une force transversale (effort tranchant) et un moment de flexion.

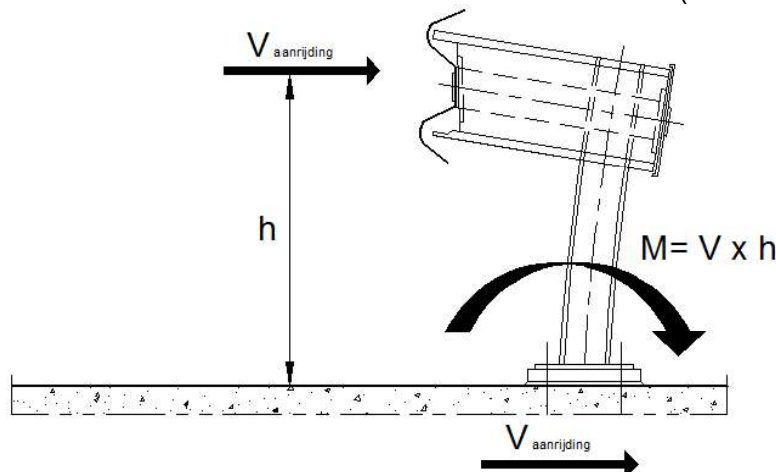


Figure 1 – Forces qui agissent sur une barrière de sécurité en acier

La détermination des forces qui sont transmises par une barrière de sécurité en acier sur le tablier de pont peut se faire à l'aide d'essais ou par une méthode analytique. Ces méthodes sont expliquées ci-après.

4.4 METHODES

4.4.1 METHODE 1 : LA DETERMINATION DES FORCES A L'AIDE D'ESSAIS

Avec cette méthode, les barrières de sécurité en acier sont testées dans un laboratoire, où l'on charge le montant jusqu'à ce qu'une rupture se produise.

Ceci se fait soit par le chargement progressif du montant avec un vérin, soit par le chargement instantané et dynamique du montant en laissant tomber une masse sur celui-ci à l'aide d'un pendule.

Les exigences suivantes s'appliquent :

- a. Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés lors de la fabrication des échantillons doivent être déterminées ;
- b. Lors de l'essai de la barrière de sécurité en acier la rupture du béton (l'arrachement d'un cône de béton) ne peut pas être déterminante. C'est le montant ou les tiges d'ancrage qui doivent rompre ;
- c. L'essai se fait au moins sur six échantillons :
 - Les échantillons sont choisis parmi différents lots ;
 - Les échantillons sont testés selon l'axe fort ;
 - Lors d'au moins trois essais, le vérin ou le pendule s'applique au niveau le plus critique du montant, c'est-à-dire celui pour lequel le moment de flexion généré à la base du montant est le plus élevé possible ; ce niveau est déterminé par le laboratoire qui effectue les essais (cfr. position 1 dans la Figure 2 ci-dessous) ;
 - Lors d'au moins trois essais, le vérin ou le pendule s'applique à 25 cm au-dessus de la base du montant (cfr. position 2 dans la Figure 3 ci-dessous).

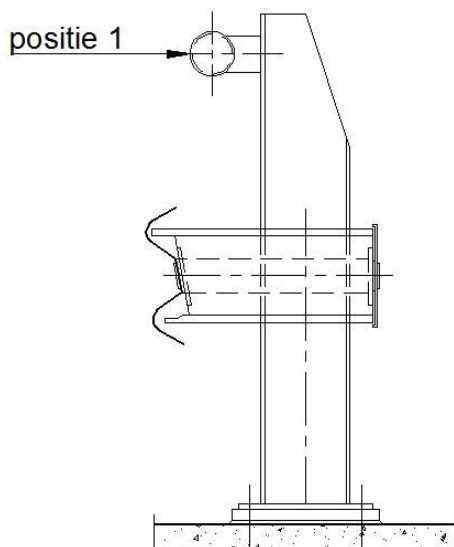


Figure 2 – Position 1 du vérin ou du pendule pour déterminer le moment de flexion maximum

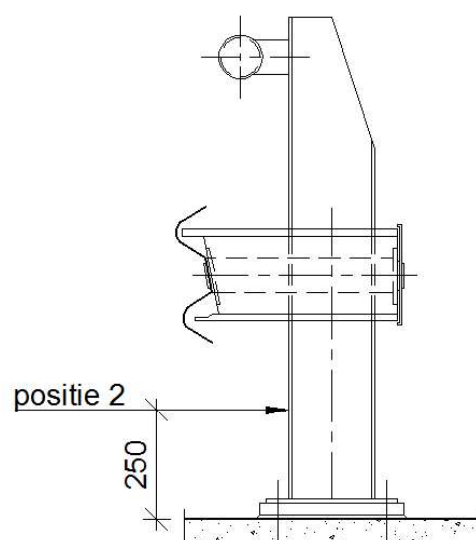


Figure 3 – Position 2 du vérin ou du pendule pour déterminer la force transversale maximale

Si, lors de l'essai, le montant cède d'abord, les résultats individuels sont multipliés par $f_{u,max}/f_{u,mesuré}$, où :

- $f_{u,max}$: la limite supérieure de la résistance à la traction de la nuance d'acier utilisée, telle que déterminée dans la norme NBN EN 10025-2:2005 (p.ex. : pour la nuance d'acier S235, $f_{u,max}$ vaut 510 N/mm²) ;
- $f_{u,mesuré}$: la résistance à la traction mesurée de l'acier de l'échantillon.

Si, lors de l'essai, la tige d'ancrage cède d'abord, les résultats individuels sont multipliés par $f_{u,tige,max}/f_{u,tigemesurée}$, où :

- $f_{u,tige,max}$: la limite supérieure garantie pour la résistance à la traction des tiges d'ancrage ;
- $f_{u,tige}$ mesurée : la résistance à la traction mesurée des tiges d'ancrage utilisées durant les tests.

Après le test, une valeur caractéristique (95 % fractile) est déterminée par série sur base de la valeur moyenne et de l'écart type du moment de flexion et de la force transversale générés au niveau de la plaque de base.

On suppose que les résultats d'essai sont distribués selon une répartition normale ou gaussienne.

Cette valeur caractéristique est multipliée par un facteur $\gamma = 1,20$. Il en résulte la force d'impact de dimensionnement.

(Ce facteur s'ajoute au facteur $\gamma = 1,25$ défini dans la NBN EN 1991-2, 4.7.3.3 et par lequel la charge d'impact doit être multipliée).

Exemple pour la détermination de la valeur caractéristique :

Les trois résultats d'essai suivants sont disponibles pour un montant en ce qui concerne le moment de flexion maximum transmis : M1 = 50 kNm, M2 = 52 kNm, M3 = 48 kNm.

Par conséquent, $M_{moy} = 50$ kNm.

La détermination de l'écart quadratique se fait à l'aide de la formule suivante :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{moy})^2$$

Dans l'exemple, $s^2 = 1/(3-1)*((50-50)^2+(50-52)^2+(50-48)^2)=4$; $s=2$

La valeur caractéristique (fractile 95 %) est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$f_k = f_{moy} + \alpha * s, \text{ avec } \alpha = 1,64$$

Dans l'exemple, $f_k = 50+1,64*2 = 53,28$ kNm.

4.4.2 METHODE 2 : LA DETERMINATION DES FORCES A L'AIDE D'UNE METHODE ANALYTIQUE

Ici, la courbe M/V 'moment résistant maximum' – 'effort tranchant résistant maximum' de la barrière de sécurité en acier ancrée est déterminée de façon analytique.

Cette courbe correspond à l'élément le plus faible de la configuration, qui peut être aussi bien le montant ou l'ancrage dans le béton.

4.4.2.1 Contrôle de la courbe M/V du montant

4.4.2.1 a) Montant de section transversale uniforme

La courbe M/V du montant est calculée :

- selon l'axe fort ;
- sans tenir compte des phénomènes éventuels d'instabilité du (des éléments du) montant.

La détermination de la résistance maximale du montant se fait d'après les principes du § 6.2.8 de la norme NBN EN 1993-1-1: 2005 :

- $M_u = W_{pl} * f_u$ avec W_{pl} le module plastique de la section considérée ;
- $V_u = \frac{A_v * f_u}{\sqrt{3}}$ avec A_v l'aire de cisaillement.

f_u : la limite supérieure de la résistance à la traction de la nuance d'acier utilisée, telle que déterminée dans la norme NBN EN 10025-2: 2005.

La courbe M/V est alors dessinée comme suit :

- Pour $V \leq \frac{V_u}{2}$, $M = M_u$
- Pour $V > \frac{V_u}{2}$ M est calculé selon NBN EN 1993-1 §6.2.8 (3) (sur l'aire de cisaillement on calcule avec une limite élastique réduite)

$$f_y * (1 - \rho) \text{ avec } \rho = \left(\frac{2V}{V_u} - 1\right)^2$$

La zone de la courbe à prendre en compte est délimitée par :

- $M/V = 0.25$ m : physiquement aucun impact n'est possible à une hauteur inférieure à 25 cm. Les points de la courbe où $M/V < 0.25$ m ne sont pas pris en compte.
- $M/V =$ hauteur réelle du montant : physiquement aucun impact n'est possible plus haut que la hauteur réelle du montant. Les points où $M/V >$ hauteur réelle du montant ne sont pas pris en compte.

Calcul analytique courbe-M/V montant

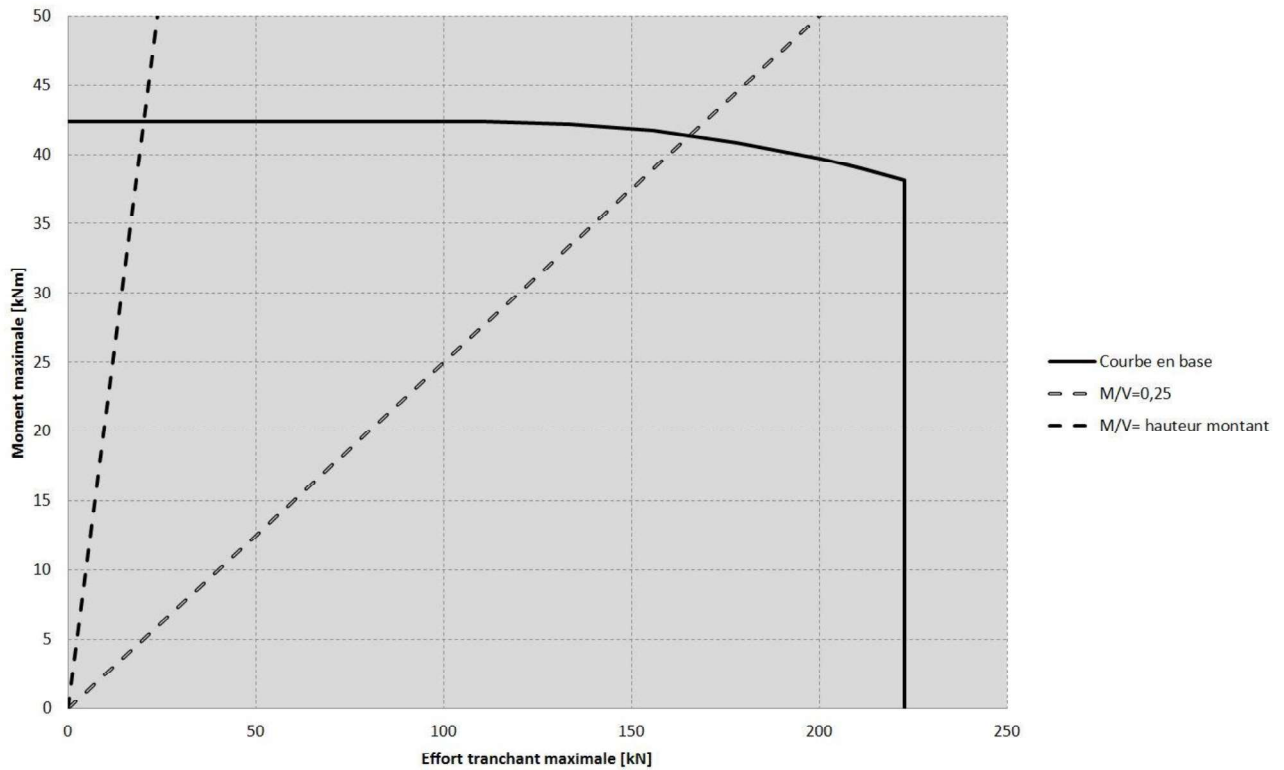


Figure 4 – Exemple courbe M/V pour montant avec section uniforme

4.4.2.1 b) Montant avec renfort à la base.

Le renfort à la base du montant augmente les forces maximales transmises, puisque :
Soit :

- le point de rupture du montant se trouve géométriquement plus haut (le point critique ne se trouve plus directement au-dessus de la plaque de base, mais directement au-dessus du renfort).

Soit :

- le point de rupture se trouve dans la zone renforcée (le renfort engendre une courbe de résistance plus élevée).

En présence d'un renfort à la base d'un montant, on procède comme suit :

- a. La courbe M/V du montant est d'abord calculée comme s'il n'y avait aucun renfort. Ensuite, chaque point de la courbe est rehaussé de la manière suivante :
 - $V_n = V$
 - $M_n = M + V \cdot h_{\text{renfort}}$
- b. La courbe M/V de la zone renforcée juste au-dessus de la plaque de base est calculée.

c. Les deux courbes M/V sont reportées sur un graphique. On considère la courbe la plus basse ou la combinaison la plus basse des parties des courbes, pour autant que celles-ci correspondent à une combinaison possible de M et V. Cela signifie que l'on ne considère pas les parties suivantes :

- $M/V < 0.25m$: physiquement aucun impact n'est possible à une hauteur inférieure à 25 cm
- $M/V > \text{hauteur réelle du montant}$: physiquement aucun impact n'est possible plus haut que la hauteur réelle du montant

Calcul analytique courbes-M/V du montant renforcé en base

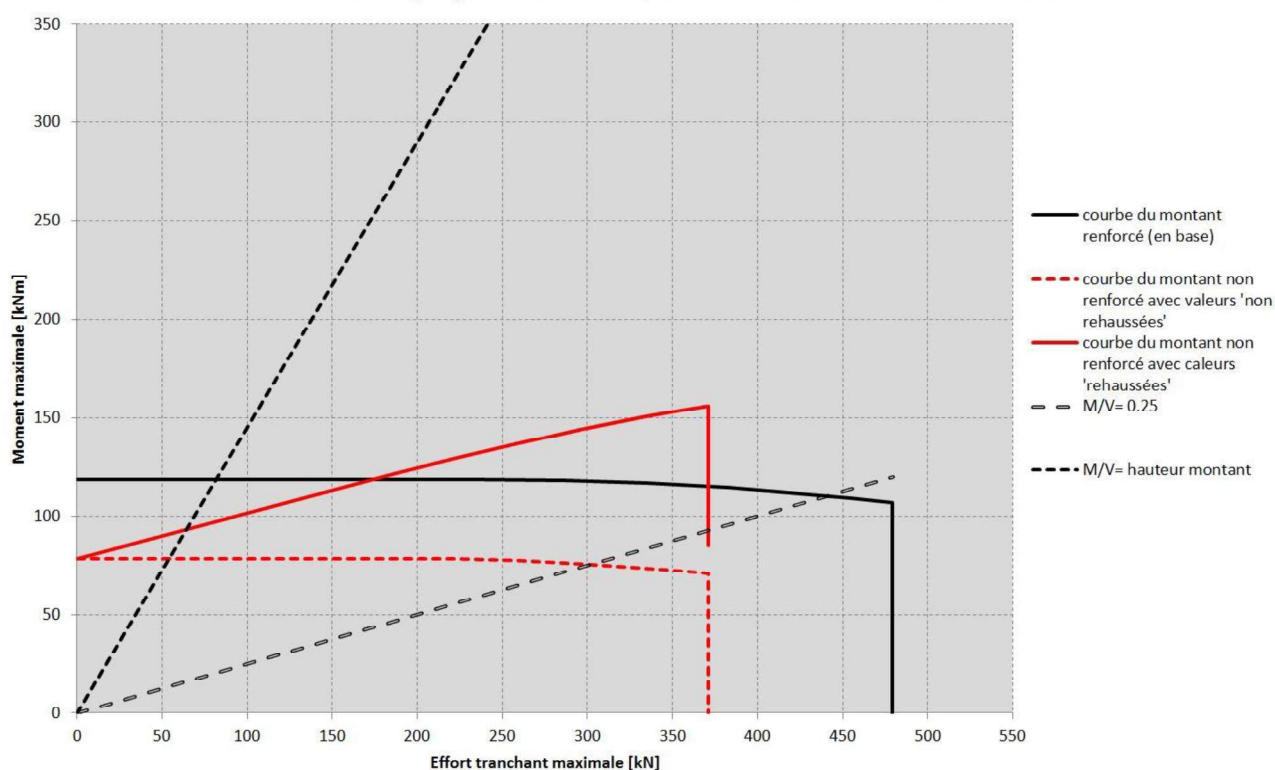


Figure 5 – exemple du montant avec renfort à la base (à 23 cm)

4.4.2.1 c) Montant avec une section transversale variable

En présence d'un montant avec une section transversale variable, on détermine la courbe M/V pour au moins 4 sections différentes.

On procède comme suit :

a. On détermine au moins 4 sections pour lesquelles les courbes M/V sont calculées.

Il s'agit :

- De la section à la base du profil (à la jonction avec la plaque de base) ;
- De la section la plus petite du profil (probablement en haut du profil) ;
- De la(des) section(s) à l'emplacement d'une discontinuité ;
- D'autre(s) section(s) à un(des) emplacement(s) pertinent(s) (= autant que possible répartis sur la hauteur du montant).

- b. La courbe M/V est calculée pour chaque section choisie comme déterminé au §4.4.2.1 a).

Ensuite, chaque point de chaque courbe est rehaussé :

- $V_n = V$
- $M_n = M + V^*_{h_{section}}$

- c. Les courbes M/V sont reportées sur un graphique. On considère la courbe la plus basse ou la combinaison la plus basse des parties des courbes, pour autant que celles-ci correspondent à une combinaison possible de M et V. Cela signifie que l'on ne considère pas les parties suivantes :

- $M/V < 0.25$ m : physiquement aucun impact n'est possible à une hauteur inférieure à 25 cm
- $M/V >$ hauteur réelle du montant : physiquement aucun impact n'est possible plus haut que la hauteur réelle du montant
- $M/V <$ hauteur h de la section du montant pour la courbe en question. Pour cette partie, on NE peut PAS prendre en compte la(es) courbe(s) au-dessus de la hauteur h.

Calcul analytique courbes-M/V pour montant avec section variable

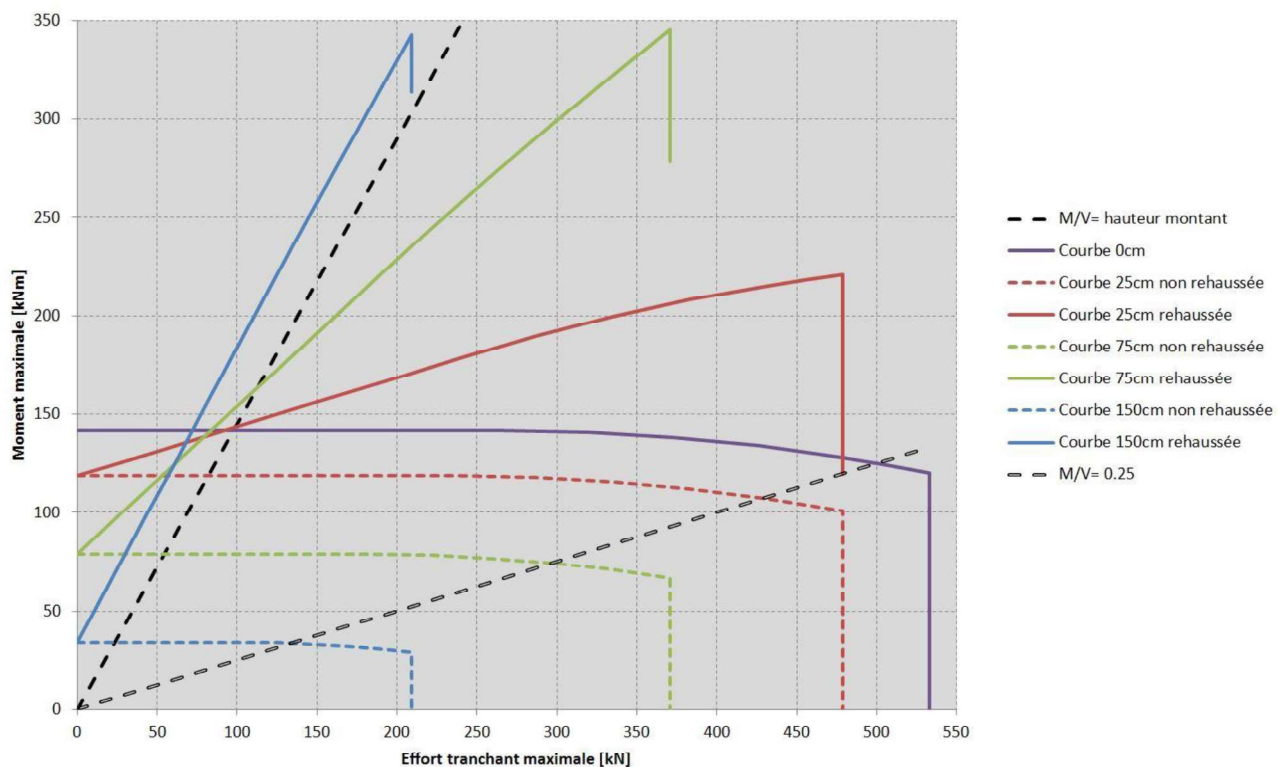


Figure 6 – Exemple courbe M/V pour montant avec section transversale variable, sections à la base, à 25 cm de hauteur, à 75 cm de hauteur et en tête du profil

4.4.2.2 Courbe M/V de la tige d'ancrage

La courbe de résistance maximale d'une tige d'ancrage en acier est calculée comme suit :

$$\left(\frac{M}{M_u}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 = 1 \quad [1]$$

Mu et Vu sont calculés comme suit :

$$M_u = \sum_{i=1}^{nt} A_i \cdot d_i \cdot f_u \quad [2]$$

$$V_u = \sum_{i=1}^n A_i \cdot f_u / \sqrt{3} \quad [3]$$

Où :

- M_u : moment de flexion maximum (en kNm)
- V_u : effort tranchant maximum (en kN)
- n : nombre de tiges d'ancrage avec lesquelles la barrière de sécurité est fixée
- A_i : section transversale de la tige d'ancrage (en mm²)
- d_i : distance entre la tige d'ancrage en traction et l'axe neutre de la zone de béton comprimée sous la plaque du montant. Etant donné que pour la détermination de cette zone comprimée il faut tenir compte d'une limite supérieure de la résistance du béton, qui n'est pas simple à déterminer, on peut par mesure de sécurité considérer que d_i = distance (en m), de l'arrière de la plaque de base à la tige d'ancrage considérée
- f_u : limite supérieure pour la résistance à la traction des tiges d'ancrage (en kN/m²)

4.4.2.3 Courbe M/V de l'ensemble montant et tiges d'ancrage

Les courbes M/V du montant et des tiges d'ancrage sont toujours comparées et combinées selon une des situations ci-dessous. Seule la zone pertinente ($0.25 \text{ m} < M/V < \text{hauteur réelle du montant}$) est considérée.

- Situation 1: une courbe se trouve entièrement sous l'autre/les autres. Cette courbe détermine l'élément faible et donc les forces maximales transmises ;
- Situation 2: les courbes se croisent. Dans ce cas on peut considérer la combinaison la plus faible des parties des courbes ;
- Situation 3: il n'y a qu'une courbe de disponible. Celle-ci est considérée comme déterminante.

4.4.2.4 Courbe M/V de la plaque de base

Dans le cas particulier où la résistance de la barrière de sécurité est atteinte par flexion de la plaque de base et non du montant, ceci peut être pris en compte dans la détermination de la courbe M/V de l'ensemble montant et tiges d'ancrage. Etant donné que de tels systèmes ne sont actuellement pas encore connus, les principes (qui sont similaires à la détermination des courbes M/V ci-dessus) ne sont pas décrits en détail.