

Ouvrages en béton armé du dimensionnement au chantier

Tome

2

Sébastien Semelaigne

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR



SOCOTEC

Sommaire

	Avant-propos.....	6
	Principales notations	7
CHAPITRE 10	Voiles	11
CHAPITRE 11	Fondations et semelles superficielles	99
CHAPITRE 12	Fondations profondes	141
CHAPITRE 13	Bielles-tirants.....	195
CHAPITRE 14	Tirants.....	231
CHAPITRE 15	Dallages	245
CHAPITRE 16	Radiers.....	277
CHAPITRE 17	Parois de soutènement spéciales.....	347
CHAPITRE 18	Poutres-voiles	419
CHAPITRE 19	Consoles-voiles et corbeaux.....	449
CHAPITRE 20	Réservoirs	485
CHAPITRE 21	Assemblages et liaisons entre les différents éléments.....	539
CHAPITRE 22	Escaliers	587
CHAPITRE 23	Éléments particuliers.....	609
CHAPITRE 24	Murs de soutènement en L	669
	Index	703
	Table des matières.....	711

10.3.2 Aciers longitudinaux et verticaux de chaînage

10.3.2.1 Sans exigence de tenue au séisme

Hors exigence sismique, les ferraillements minimaux de chaînage sont donnés dans le FD P 18-717 § 9.6.2, qui exige des chaînages minimaux verticaux et horizontaux :

- aux extrémités de voiles ;
- au droit des ouvertures.

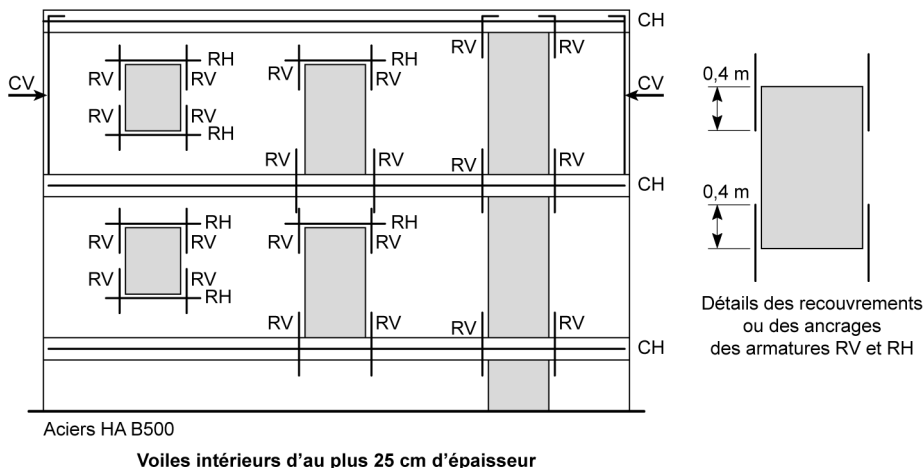


Figure 10.19. Synthèse des nécessités de chaînages – Raidisseurs verticaux RV – Raidisseurs horizontaux RH – Chaînages horizontaux et verticaux, respectivement CH et CV

Les sections données doivent être majorées au *prorata* de l'épaisseur dans le cas de voiles d'épaisseur supérieure à 25 cm. Sur la figure 10.19, on note que l'exigence de chaînage vertical existe seulement sous le niveau de la terrasse. La figure 10.20, propre aux voiles de façade, est analogue à la figure 10.19. On y constate que les aciers de parement sont exigés sur les voiles de façade mais pas sur les voiles intérieurs.

10.3.2.2 Avec exigence de tenue au séisme

En cas d'exigence sismique, plusieurs cas sont à distinguer :

- soit les structures entrent dans le domaine d'application des CPMI (Guide pour maisons individuelles paru en août 2021) ;
- soit les structures entrent dans le domaine de l'Eurocode 8, avec deux conceptions possibles : DCL (faiblement dissipative) ou DCM (ductilité moyenne).

Si l'on applique une conception DCL, les exigences pour les voiles sont celles de l'Eurocode 2 en prenant comme sollicitation les torseurs venant des combinaisons sismiques (Eurocode 8). Si l'on applique une conception DCM, on met en place :

- soit un système par voiles MGPa avec 4HA10 en zone courante, 4HA10 au droit des ouvertures et 4HA12 en zone critique, c'est-à-dire au niveau le plus bas ; ces aciers sont entourés par des cadres HA6 espacés au plus tous les 10 cm ;
- soit un système par voiles ductiles avec des armatures verticales dans les zones critiques et éventuellement des aciers de confinement dans les zones critiques définies dans l'Eurocode 8.

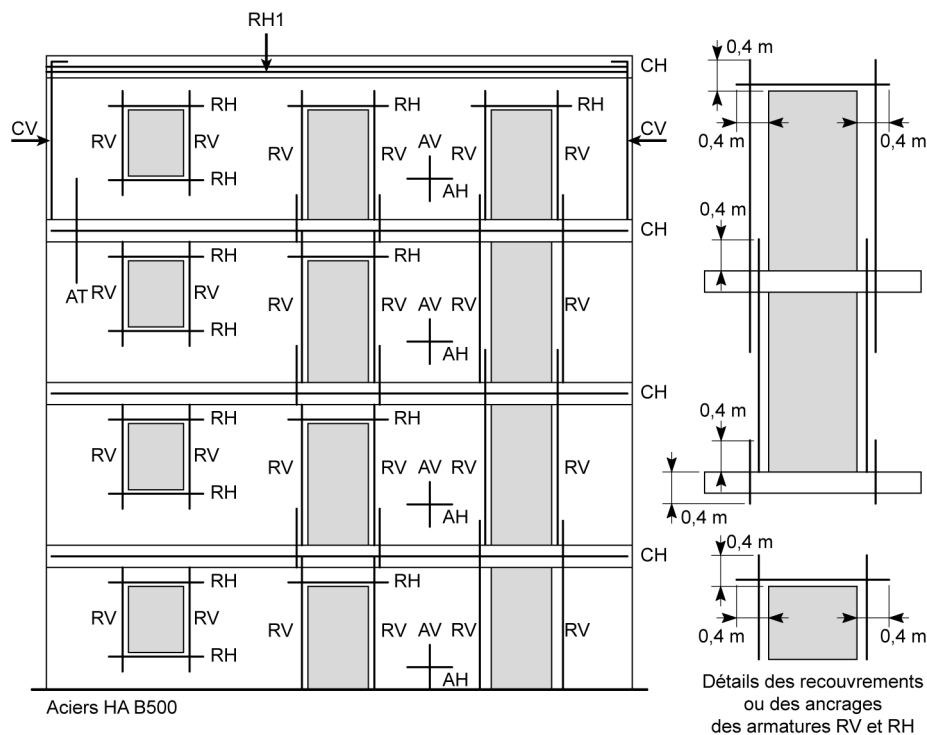


Figure 10.20. Synthèse des nécessités de chaînages sur l'ensemble d'une façade

Tableau 10.1 Synthèse des sections

Repère	Désignation des armatures	Disposition constructive minimale
AH	Armatures horizontales de surface continues et réparties	0,96 cm ² /m ; espacement maximal de 33 cm
AV	Armatures verticales de surface continues et réparties	0,48 cm ² /m ; espacement maximal de 50 cm
AT	Armatures en attente	0,32 cm ² /m ; espacement maximal de 50 cm
CH	Chaînage horizontal au croisement de chaque plancher	1,20 cm ²
CV	Chaînage vertical d'about de voile sous terrasse	1,20 cm ²
RH	Renfort horizontal des baies ou de linteau	0,80 cm ²
RV	Renfort vertical des baies et ouvertures	0,68 cm ²
RH1	Renfort horizontal complémentaire sous terrasse	1,88 cm ² dans 50 cm en haut



Photo 10.5. Attente de voiles de reprise d'étage et chaînage



Photo 10.6. Chaînage vertical d'extrémité



Photo 10.7. Aciers de parement



Photo 10.8. Chaînages verticaux et horizontaux autour d'une ouverture

Un autre chaînage horizontal est nécessaire pour fermer le cadre.

On en déduit les expressions des pressions des moments fléchissant et tranchant :

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot l_e} \cdot (\operatorname{ch} \alpha \cdot \cos \alpha + \operatorname{ch} \alpha \cdot \sin \alpha - \operatorname{sh} \alpha \cdot \cos \alpha - \operatorname{sh} \alpha \cdot \sin \alpha)$$

$$M = \frac{Q_1 \cdot l_e}{4} \cdot \frac{(+\sin \alpha - \cos \alpha)}{e^\alpha}$$

$$T = \frac{Q_1}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{e^\alpha}$$

On considère maintenant l'exemple d'une poutre élastique de longueur infinie supportant une infinité de charges. Une poutre sur un sol élastique recevant une charge répartie peut être assimilée à une poutre recevant une série de charges concentrées (figure 16.3).

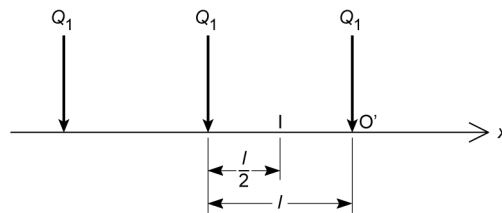


Figure 16.3. Poutre élastique recevant une série de charges concentrées

On établit les conditions aux limites :

– au point O d'abscisse $x = 0$, selon la figure 16.3, la déformée possède une tangente horizontale :

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

L'effort tranchant immédiatement à droite du point vaut :

$$T = \frac{Q_1}{2}$$

– au point I d'abscisse $x = l/2$, toujours selon la figure 16.3 :

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$T = 0$$

On peut déterminer les constantes d'intégration.

– conditions aux limites en O :

$$C_2 = -C_3 = \frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot k \cdot l_e}$$

– conditions aux limites en I :

$$\frac{x}{l_e} = \frac{l}{2 \cdot l_0} = \alpha_0$$

Sachant que $C_2 + C_3 = 0$, on a donc :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{l}{l_e} \cdot [(C_1 + C_4) \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 - (C_1 - C_4) \cdot \operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0 + (C_2 - C_3) \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0] = 0$$

Sachant que $T = 0$ au point I, on a :

$$(C_1 + C_4) \cdot \operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0 + (C_1 - C_4) \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 = \frac{Q_1}{b \cdot k \cdot l_e} \cdot \operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0$$

En effectuant des transformations, on trouve les expressions des constantes :

$$C_1 = \frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot k \cdot l_e} \cdot \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0}$$

$$C_4 = -\frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot k \cdot l_e} \cdot \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 - \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0}$$

Ainsi, les valeurs de constantes ont été déterminées et l'on peut connaître les valeurs de pression, moment et effort tranchant en fonction de l'abscisse.

– évaluation de la pression q_0 et moment M_0 au point O ($x = 0$ impliquant $\alpha = 0$) :

$$q = k \cdot y = (C_1 \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot \cos \alpha + C_2 \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot \sin \alpha + C_3 \cdot \operatorname{sh} \alpha \cdot \cos \alpha + C_4 \cdot \operatorname{sh} \alpha \cdot \sin \alpha) \\ q_0 + k \cdot C_1$$

$$q_0 = \frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot l_e} \cdot \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0}$$

$$q_0 = \frac{Q_1}{2 \cdot b \cdot l_e} \cdot f_{p_e}(\alpha_0)$$

$$\text{Avec } f_{p_e}(\alpha_0) = \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0}$$

$$M_0 = \frac{b \cdot k \cdot l_e^2}{2} \cdot C_4 \text{ quand } \alpha = 0$$

$$M_0 = \frac{Q_1 \cdot l_e}{4} \cdot \frac{-\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0} \text{ quand } \alpha = 0$$

Soit :

$$M_0 = \frac{Q_1 \cdot l_e}{4} \cdot f_{M_e}(\alpha_0)$$

avec :

$$f_{M_e}(\alpha_0) = \frac{-\operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \operatorname{sh}^2 \alpha_0 \cdot \cos^2 \alpha_0}$$

– évaluation de la pression q_I et moment M_I au point I ($x = L/2$ $\alpha_0 = \frac{x}{l_e} = \frac{l}{2 \cdot l_e}$).

La valeur de la pression q_I au point I est :

$$q_I = k \cdot (C_1 \cdot \operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 + C_2 \cdot \operatorname{ch} \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0 + C_3 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 + C_4 \cdot \operatorname{sh} \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0)$$

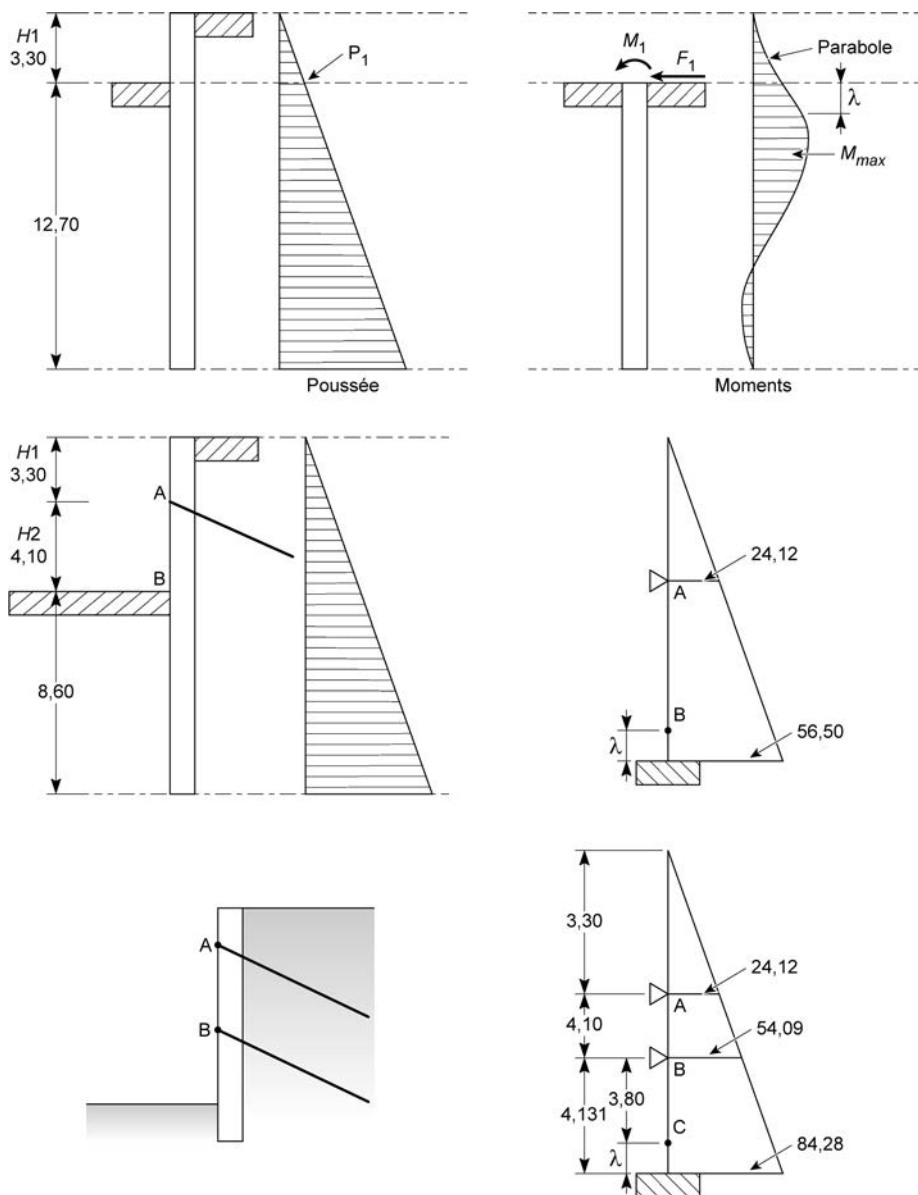


Figure 17.1. Phases d'excavation et modèles de calcul

- a) Première phase d'excavation ; b) première phase d'excavation – modèle de calcul ;
- c) deuxième phase d'excavation ; d) deuxième phase d'excavation – modèle de calcul ;
- e) troisième phase d'excavation ; f) troisième phase d'excavation – modèle de calcul

Plus la hauteur d'excavation est importante, plus on a d'appuis de butonnage ou de tirant, et plus il y a de phases. On voit que la configuration de la paroi pour la phase 1 correspond à une poutre élastique soumise à un moment et à un effort tranchant en tête. On peut rapprocher l'allure de la courbe des moments avec celle d'une poutre encastree soumise à une charge triangulaire dont on va trouver la longueur fictive correspondante pour retrouver le moment maximum de la poutre élastique (figure 17.2).

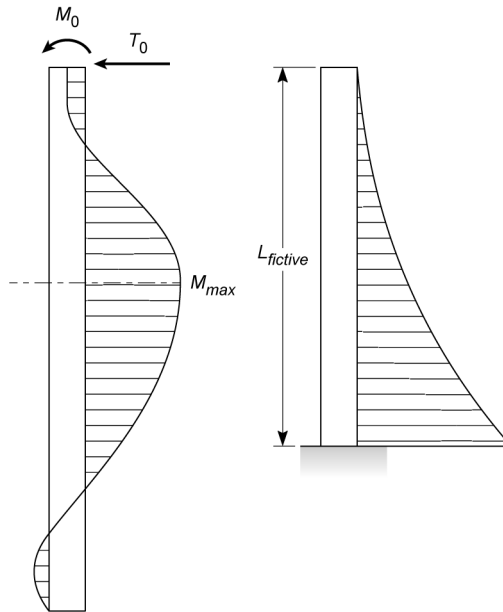


Figure 17.2. Équivalence du modèle de calcul

On calcule $M_{maxfictif} = \frac{K \cdot \gamma \cdot L_{fictive}^3}{6}$ et on trouve $L_{fictive}$ telle que $M_{max} = M_{maxfictif}$.

En assimilant le système étudié à ce modèle équivalent, on calcule les différents efforts présents à chaque phase. On regarde la différence entre la hauteur de poussée réelle et la longueur de console fictive, correspondant à une longueur d'encastrement. On calcule les autres phases en prenant en compte cette longueur d'encastrement. La norme NF P 94-282 propose deux méthodes d'évaluation.

Méthode ISS (interaction sol-structure aux coefficients de réaction – Miss-K)

Cette méthode assimile le modèle à une poutre élastique dont les appuis ont des raideurs différentes selon la lithologie du sol (figure 17.3). Ce calcul est à faire sur des logiciels spécifiques du type Rido, Krea, Plaxis ou équivalent.

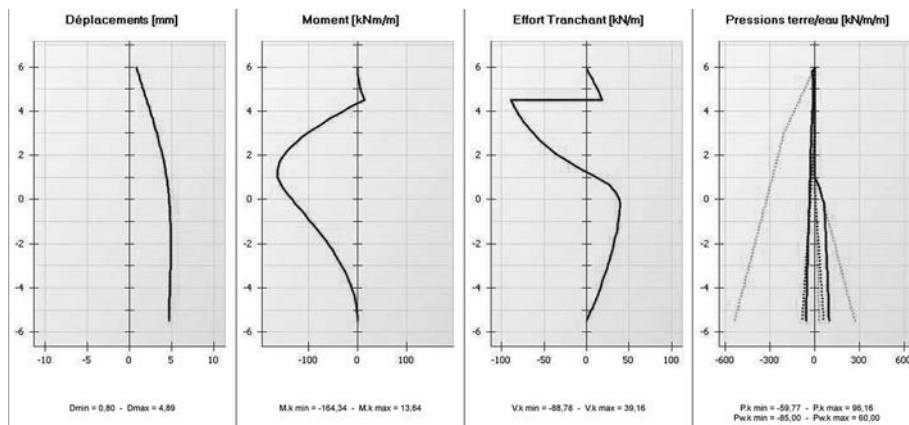


Figure 17.33. Calculs par le logiciel géotechnique

Le détail des pressions et résultats est donné dans le tableau 17.15.

Tableau 17.15. Résultats de la phase 4 – calcul avec logiciel spécifique géotechnique

Niveau	Rotation	Déplacement	Moment		Tranchant		État du sol		Pression des terres		Pression d'eau		Poussée mobilisable		Butée mobilisable		Pression diff
En m	En 0,001 rad	En mm	M.k kN.m/m	M.d kN.m/m	V.k kN/m	V.d kN/m	gauche	droite	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	P.k kN/m/m
6	0,8158	0,8	0	–	0	–	butée	excav	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,81	0,8158	0,95	0,08	–	1,21	–	butée	excav	14,33	0	0	0	1,44	0	12,94	0	14,33
5,81	0,8158	0,95	0,08	–	1,21	–	élas	excav	15,72	0	0	0	1,44	0	12,94	0	15,72
5,06	0,8175	1,57	5,11	–	11,83	–	élas	excav	12,6	0	0	0	7,18	0	64,69	0	12,6
4,69	0,8189	1,87	10,40	–	16,26	–	poussée	excav	10,54	0	0	0	10,05	0	90,56	0	10,54
3,5	0,7900	2,84	68,12	–	73,46	–	poussée	excav	19,15	0	0	0	19,15	0	172,5	0	19,15
2,63	0,69	3,49	124,16	–	53,31	–	poussée	excav	24,6	0	3,75	0	24,6	0	221,63	0	28,35
1,5	0,4958	4,17	162,79	–	12,34	–	poussée	excav	29,47	0	15	0	29,47	0	265,5	0	44,47
1	0,3997	4,39	163,10	–	11,68	–	poussée	butée	31,67	0	20	0	31,64	0	285	0	51,64
0	0,222	4,7	134,3	–	38,48	–	Poussée	butée	35,96	54	30	5	35,96	5,99	324	54	6,96
0,17	0,1973	4,73	127,81	–	39,16	–	poussée	élas	36,69	61,44	31,67	6,67	36,69	6,72	330,5	60,50	0,24
2,1	0,010	4,89	57,8	–	31,38	–	poussée	élas	45,05	76,67	51	26	45,05	15,08	405,9	135,9	6,61
3,1	0,060	4,85	30,05	–	23,84	–	poussée	élas	49,38	82,75	61	36	49,8	19,41	444,9	174,9	8,36
4,1	0,0837	4,78	10,62	–	14,78	–	poussée	élas	53,71	88,43	71	46	53,71	23,74	483,9	213,9	9,71
5,5	0,089	4,65	0	–	0	–	poussée	élas	59,77	96,16	85	60	59,77	29,80	538,50	268,5	11,39

Pour la phase 6, le déplacement en pied au droit de la butée est de 6,68 mm. Le moment maximal en ventre côté fouille est de 125 kN.m et au niveau du bouton côté terre de 13,91 kN.m. L'effort tranchant maximal est situé au niveau du bouton situé à +1,5, il a une valeur de 94 kN. La poussée est triangulaire de 0 kN/m² au niveau +6 et augmente linéairement jusqu'à +3 jusqu'à 34,5 kN/m², elle augmente de nouveau linéairement depuis ce niveau jusqu'à -5,5 où elle atteint 85 kN/m². La butée mobilisable est évaluée à 668 kN et la butée mobilisée de 443 kN, soit un rapport $668/443 = 1,5$, le critère est satisfait.

Le détail des pressions et résultats est donné dans le tableau 17.16.

Tableau 17.16. Résultats de la phase 6 – calcul avec logiciel spécifique géotechnique

Niveau	Rotation	Déplacement	Moment		Tranchant		État du sol		Pression des terres		Pression d'eau		Poussée mobilisable		Butée mobilisable		Pression diff
En m	En 0,001 rad	En mm	M.k kN.m/m	M.d kN.m/m	V.k kN/m	V.d kN/m	gauche	droite	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	Gauche kN/m/m	Droite kN/m/m	P.k kN/m/m
6	0,8016	0,78	0	–	0	–	butée	excav	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,81	0,8016	0,93	0,08	–	1,21	–	butée	excav	14,45	0	0	0	1,44	0	12,94	0	14,45
5,81	0,8016	0,93	0,08	–	1,21	–	élas	excav	15,97	0	0	0	1,44	0	12,94	0	15,97
5,06	0,80334	1,53	5,20	–	12,07	–	élas	excav	12,97	0	0	0	7,18	0	64,69	0	12,97
4,69	0,8067	1,84	10,6	–	16,65	–	élas	excav	10,97	0	0	0	10,05	0	90,56	0	10,97
3,5	0,7996	2,8	27,92	–	33,27	–	élas	excav	19,67	0	0	0	19,15	0	172,50	0	19,67
2,63	0,7589	3,48	48,62	–	12,77	–	élas	excav	24,77	0	3,75	0	24,60	0	221,63	0	28,52
2,44	0,7480	3,62	50,49	–	7,18	–	poussée	excav	25,42	0	5,62	0	25,41	0	228,94	0	31,04
1,5	0,6943	4,3	41,62	–	28,21	–	poussée	excav	29,47	0	15	0	29,47	0	265,5	0	44,47
1	0,6573	4,63	82,91	–	70,26	–	poussée	excav	31,64	0	20	0	31,64	0	285	0	51,64
0	0,5297	5,23	124,96	–	11,46	–	poussée	butée	35,96	0	30	0	35,96	0	324	0	65,96
1,1	0,3739	5,73	109,06	–	31,63	–	poussée	butée	40,73	57,90	41	6	40,73	6,43	366,90	57,90	17,83
1,7	0,3044	5,93	88,13	–	35,82	–	poussée	élas	43,32	80,18	47	12	43,32	9,02	390,30	81,30	1,86
2,1	0,2665	6,04	73,81	–	35,35	–	Poussée	élas	45,05	82,93	51	16	45,05	10,76	405,90	96,9	2,87
3,1	0,199	6,27	40,71	–	30,06	–	poussée	élas	49,38	91,97	61	26	49,38	15,08	444,90	135,90	7,58
4,1	0,1681	6,46	15,16	–	20,36	–	poussée	élas	53,71	100,47	71	36	53,71	16,41	483,90	174,9	11,76
5,5	0,1595	6,68	0	–	0	–	poussée	élas	59,77	112,08	85	50	59,77	25,47	538,5	229,5	17,30

Pour la phase 9, le déplacement en pied au droit de la butée est de 6,51 mm. Le moment maximal en ventre côté fouille est de 125,96 kN.m et il n'y a pas de moment notable côté terre. L'effort tranchant maximal est situé au niveau de la dalle située à +3, il a une valeur de 67,4 kN. La poussée est triangulaire de 0 kN/m² au niveau +6 et augmente linéairement jusqu'à +3 jusqu'à 34,5 kN/m², elle augmente de nouveau linéairement depuis ce niveau

Ouvrages en béton armé du dimensionnement au chantier

Tome

2

La construction d'un ouvrage en béton armé, depuis les premières esquisses jusqu'à la réception, résulte du travail concomitant ou consécutif du **concepteur, de l'ingénieur et du technicien du bureau d'études** puis des **techniciens sur chantier**, chacun ne connaissant pas forcément ce que doit faire un autre, ce dernier n'ayant pas non plus les mêmes connaissances techniques que les précédents.

Ainsi cet ouvrage, en deux tomes, propose la **synthèse** des connaissances théoriques et techniques nécessaires à la construction en béton, de la **définition du rôle de chaque élément à leur mise en œuvre sur le chantier**.

Ce tome 2 complète l'**analyse des éléments structuraux fondamentaux** (voile, fondation superficielle, fondation profonde), puis présente **des éléments structuraux plus spécifiques** (tirant, dallage, radier, paroi de soutènement, etc.).

Chaque chapitre traite successivement :

- du **rôle** de l'élément dans une structure ;
- des **dispositions constructives normatives** selon les différents types d'armatures ;
- des **points forts** de l'élément étudié dans une structure ;
- des **points sensibles** à surveiller sur site et en conception ainsi que des paramètres importants à prendre en compte ;
- d'un **exemple** de dimensionnement ;
- des **erreurs commises fréquemment** et de leurs conséquences sur l'ouvrage (issues de l'expérience de terrain de l'auteur).

Enfin, chaque chapitre se termine par une synthèse.

Chaque élément étudié présente de **nombreux schémas explicatifs et des photographies** illustrant, avec des cas réels, le **passage des plans à la mise en œuvre sur chantier**, en mettant en avant les désordres éventuels dus à de mauvais calculs ou des erreurs de construction.

Cet ouvrage est destiné aux ingénieurs, techniciens, projeteurs de bureaux d'études mais aussi aux chargés d'affaires des bureaux de contrôles, mais aussi aux maîtres d'œuvre ou maîtres d'ouvrage, qui l'utiliseront comme un aide-mémoire pour dimensionner des éléments ou vérifier un point sensible, etc. Il permet aux étudiants de faire un lien pragmatique entre la théorie et la pratique.

Sébastien Semelaigne est expert national béton et parasismique au sein de la direction technique de Socotec. Diplômé de l'ESTP, il enseigne au CNAM, aux Mines de Douai et à Polytech Sophia. Il est membre de la commission BNTRA / CN EC2 – Calcul des structures en béton, et de la commission de normalisation CN/PS EC8 – Règles de construction parasismique.

Sommaire

► Dans le tome 2

Partie 2 – Dispositions constructives et dimensionnement (suite)

– Voiles – Fondations superficielles – Fondations profondes – Bielles-tirants – Tirants – Dallages – Radiers – Pargois de soutènement spéciales – Poutres-voiles – Consoles voiles – Réservoirs – Assemblages et liaison – Escaliers

► Dans le tome 1

Partie 1 – Théorie : Matérialisation des efforts sollicitants – Quantification des efforts sollicitants – De la RDM au béton armé – Analyse structurale du béton armé

Partie 2 – Dispositions constructives et dimensionnement :

– Contexte normatif – Dispositions constructives – Poteaux – Poutres – Dalles

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR



SOCOTEC

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14685-1



9 782281 146851