

PIEU SOUS CHARGE TRANSVERSALE

Programme : GEO5 – Pieux (à partir de la version 2020)

Fichiers : NFP94-262-Ex4.gp1

Contexte

L'application de l'Eurocode 7 se complète par une annexe nationale. En France, le choix a été fait de rédiger une norme d'application pour chacun des types d'ouvrages géotechniques. Pour les fondations profondes, la norme NF P94-262 est applicable. Un comité d'expert sous l'égide du CEREMA a rédigé un guide d'application. Nous nous basons ici sur l'exemple 4 de ce guide pour appliquer le programme GEO5 – Pieux. Dans la suite, il sera cité comme "Référence".

AVERTISSEMENT : Dans ce document, l'utilisateur sera guidé à travers toutes les étapes de définitions et d'analyse d'un projet géotechnique, dans un contexte établi par l'auteur. L'utilisateur doit être informé que les réglages de l'analyse (onglets « Paramètres ») sont de sa responsabilité et doivent être vérifiés/adaptés avant de commencer tout nouveau projet.

Table des matières

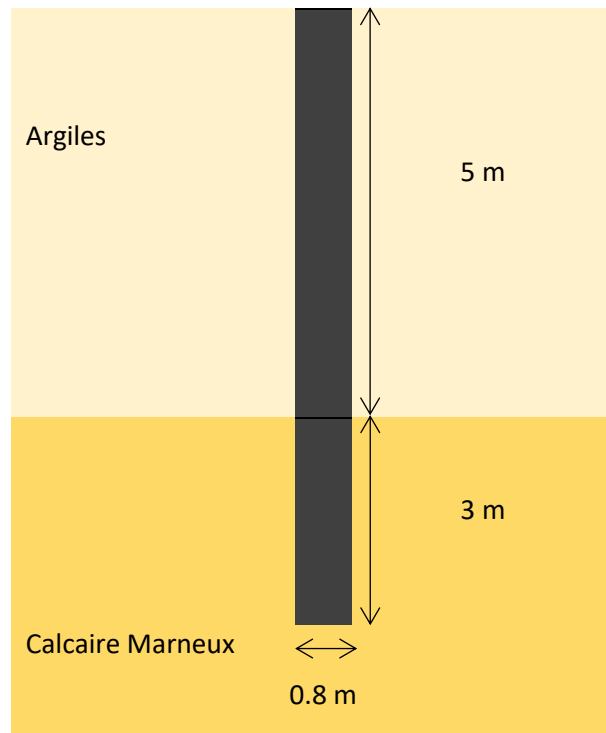
1	Données du projet.....	2
1.1	Ouvrage	2
1.2	Données géotechniques	2
1.3	Hypothèses de calcul	3
2	Définition du modèle.....	4
2.1	Item "Paramètres"	4
2.2	Item "Profil"	4
2.3	Item "Assignation"	6
2.4	Item "Module Kh"	6
2.5	Item "Charge"	7
2.6	Item "Géométrie"	7
2.7	Item "Matériau"	7
2.8	Passage du calcul	8
3	Résultats	8
3.1	Vérification de la résistance structurale :	10
3.2	Vérification de la résistance à la compression et flexion	11
3.3	Vérification de la résistance au cisaillement	11

1 Données du projet

1.1 Ouvrage

On analyse un pieu foré à la boue ancré dans du calcaire et soumis à un chargement transversal. Le pieu a une longueur de 8m, un diamètre de 0.8m et il est ancré de 3m dans un sol calcaire marneux.

Dans cet exercice, nous nous limiterons à l'analyse des déformations horizontales le long du pieu. Nous ne ferons pas de calcul de capacité portante verticale.



1.2 Données géotechniques

Les sols en place sont constitués de calcaire marneux surmontés de 5m d'argiles.

Les propriétés mécaniques sont précisées dans le tableau ci-dessus :

	Poids volumique γ (kN/m ³)	Poids volumique saturé γ_{sat} (kN/m ³)	Coefficient de poisson ν	Module de déformation E_{def} (Pa)	Cohésion C_u (kPa)	E_m (MPa)	α
Argile	18.5	18.5	0,35	10	0	10	0,66
Calcaire marneux	21	21	0.20	100	0	25	0,5

Le sol est également décomposé en tranches le long du pieu avec les caractéristiques décrites dans le tableau suivant, où :

$$K_f = \frac{12E_M}{\frac{4B_0}{3B} \left[2,65 * \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \alpha} \text{ avec } B_0 = 0.6m$$

Profondeur z(m)		K _f (Kpa)	P _f (Kpa)
de	à		
0,00	0,20	10767	531
0,20	0,50	12350	609
0,50	0,80	14250	703
0,80	1,20	16467	812
1,20	1,60	19000	937
1,60	2,00	20267	1000
2,00	2,50	20267	1000
2,50	3,00	20267	1000
3,00	3,60	20267	1000
3,60	4,20	20267	1000
4,20	5,00	20267	1000
5,00	5,60	63032	1500
5,60	6,40	63032	1500
6,40	7,20	63032	1500
7,20	8,00	63032	1500

Tableau 1 : Décomposition du sol en tranches et caractéristiques

1.3 Hypothèses de calcul

La méthode de calcul appropriée pour une fondation élançée (pieux) soumise à des sollicitations transversales est le modèle d'interaction sol-structure (MISS) ; le comportement du pieu sera donc modélisé dans le programme GEO5 – Pieux selon cette méthode. Nous nous limiterons aux calculs des efforts dans le pieux et des déplacements horizontaux. On utilise alors l'hypothèse de Winkler, poutre sur appuis élastiques, qui donne l'équation générale de comportement suivante :

$$E_p I_p \frac{d^4}{dz^4} + E_s * y(z) = 0 \text{ avec } I = \pi \frac{D^4}{64}$$

Le pieu est chargé en tête selon le tableau 2 ci-dessous et on impose un effort tranchant et un moment nul en pied.

	F _{c;d} (kN)	T(kN)	M (kN.m)
ELU - situations durables et transitoires	1700	340	300
ELS - combinaison caractéristique	1300	260	200
ELS - combinaison fréquente	1200	230	170
ELS – combinaison quasi-permanente	1100	200	150

Tableau 2 : Chargement en tête de pieu pour les différentes combinaisons

On choisit un béton C25/30 avec une résistance à $f_{ck}=25\text{MPa}$

On retiendra les coefficients partiels suivants :

- $\gamma_G = 1.35$ sur les charges permanentes défavorables
- $\gamma_s = 1.10$ pour la résistance de frottement axial sur des pieux en compression
- $\gamma_b = 1.10$ pour la résistance de pointe
- $\gamma_{st} = 1.4$ pour la résistance de frottement axial sur le fut des pieux en traction.

2 Définition du modèle

2.1 Item "Paramètres"

Cliquer sur "Edition" pour régler les paramètres :

- Courbe de charge avec la théorie Non linéaire (Masopust)
- Définition des paramètres γ_G , γ_s et γ_b γ_{st}

Edition des paramètres de l'étude actuelle : Pieux

Matériaux et normes : Pieux

Calcul en conditions drainées : NAVFAC DM 7.2

Calcul en conditions non drainées : Tomlinson

Courbe de charge : non linéaire (Masopust)

Capacité portante horizontale : demi-espace élastique

Méthode de vérification : calcul selon EN 1997

Approche de calcul : 2 - réduction de la charge et de la résistance

Situation de calcul permanente Situation de calcul transitoire Situation de calcul accidentelle Situation de calcul au séisme

— Coefficient de réduction de la charge (F)

Charge permanente :

— Coefficient de réduction de la résistance (R)

Pieux forés Pieux battus Pieux CFA

Coefficient de réduction de la résistance du fût : $\gamma_s = 1.10$ [-]

Coefficient de réduction de la résistance de la pointe : $\gamma_b = 1.10$ [-]

Coefficient de réduction de la capacité portante du pieu en traction : $\gamma_{st} = 1.15$ [-]

OK Annuler

2.2 Item "Profil"

La surface est établie à la cote de 0 m.

On ajoute 2 couches d'épaisseurs :

- $t_1 = 5$ m
- $t_2 = \infty$

Num.	Epaisseur de la couche t [m]	Profondeur z [m]
1	5,00	0,00 .. 5,00
2	-	5,00 .. ∞

2.2.1 Item "Sols"

On définit ici les 2 types de sol en place.

The screenshot shows the 'Edition des propriétés des sols' dialog box for 'Argiles' soil. The 'Identification' tab is active, showing the soil name 'Argiles' and its description 'Argile sableuse (CS), consistance rigide'. The 'Données de base' section includes fields for 'Poids volumique' (18.50 kN/m³), 'Coefficient de Poisson' (0.35), and 'Méthode Tomlinson' (0.00 kPa). The 'Caractéristiques de déformation' section includes 'Calcul de tassement' (saisir Edef) and 'Module de rigidité' (10.00 MPa). The 'Soulèvement hydraulique' section includes 'Calcul soulèvem. hydraulique' (standard) and 'Poids volumique du sol saturé' (18.50 kN/m³). The 'Affichage' tab shows the 'Catégorie des échantillons' (GEO), 'Sous-catégorie' (Sols (1 - 16)), 'Echantillon' (5 Argile sableuse), 'Couleur' (dark green), and 'Arrière-plan' (saisir la couleur).





Boite de dialogue pour saisie des paramètres du sol 1 : Argile

The screenshot shows the 'Edition des propriétés des sols' dialog box for 'Calcaire Marneux' soil. The 'Identification' tab is active, showing the soil name 'Calcaire Marneux' and its description 'Gravier de bonne granularité (GW), moyennement dense'. The 'Données de base' section includes fields for 'Poids volumique' (21.00 kN/m³), 'Coefficient de Poisson' (0.20), and 'Méthode Tomlinson' (0.00 kPa). The 'Caractéristiques de déformation' section includes 'Calcul de tassement' (saisir Edef) and 'Module de rigidité' (100.00 MPa). The 'Soulèvement hydraulique' section includes 'Calcul soulèvem. hydraulique' (standard) and 'Poids volumique du sol saturé' (21.00 kN/m³). The 'Affichage' tab shows the 'Catégorie des échantillons' (GINT), 'Sous-catégorie' (Tous (1 - 53)), 'Echantillon' (28 CALCAIRE), 'Couleur' (yellow), and 'Arrière-plan' (saisir la couleur).

Boite de dialogue pour saisie des paramètres le sol 2 : Calcaire marneux

2.3 Item "Assignment"

On associe ici chaque couche du profil avec un des sols renseignés.

 		Assignment par le clic gauche : Argiles	
Num.	Epaisseur [m]	Sol assigné	
1	5.00	Argiles	
2		Calcaire Marneux	

2.4 Item "Module Kh"

Dans le programme GEO5 – Pieux, le module de réaction horizontale du sol de fondation est défini par K_h et non par le module linéique K_f dans le tableau 1. Les deux paramètres sont liés par la relation suivante :

$$K_f = BK_h$$

Formule 2.4

Avec $B = 0.8\text{m}$ diamètre du pieu et $K_f = \frac{12E_M}{\frac{4B_0}{3B} \left[2,65 * \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \alpha}$; $B_0 = 0.6\text{m}$

Dans le cadre "Module Kh" :


- On sélectionne la méthode d'évaluation : **saisir par diagramme**
- On ajoute les différentes valeurs du tableau 2 et la valeur de K_h correspondante ; La valeur de K_h est obtenue à l'aide de la formule 2.4 ci-dessus.



Module de réact. du sol de fond.		saisir par diagramme
+ Ajouter		
Num.	Profondeur [m]	Module de réaction horizont. k_h [MN/m ³]
1	0,00	13,46
2	0,20	13,46
3	0,20	15,44
4	0,50	15,44
5	0,50	17,81
6	0,80	17,81
7	0,80	20,58
8	1,20	20,58
9	1,20	23,75
10	1,60	23,75
11	1,60	25,33
12	5,00	25,33
13	5,00	78,79
14	8,00	78,79

Boite de dialogue pour saisie des valeurs du module de réaction K_h

2.5 Item "Charge"

On ajoute les différentes valeurs du tableau 2 :

 Ajouter

☐ Considérer le poids propre du pieu dans le calcul de la charge  Importer  d'exploit.

Num.	Charge	Nom	N [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	H _x [kN]	H _y [kN]	Type	
	nouveau	modif.							
1	Oui		ELU	1700,00	0,00	300,00	-340,00	0,00	de calcul
2	Oui		ELS1	1300,00	0,00	200,00	-260,00	0,00	d'exploitation
3	Oui		ELS2	1200,00	0,00	170,00	-230,00	0,00	d'exploitation
4	Oui		ELS3	1100,00	0,00	150,00	-200,00	0,00	d'exploitation

Forces saisies

2.6 Item "Géométrie"

On renseigne les dimensions et caractéristiques du pieu et du matériau.

— Dimensions de base

Section du pieu :

Diamètre du pieu : d = [m]

Longueur du pieu : l = [m]

Matériau du pieu :

— Technologie

Type de technologie :

— Mise en place

Recépape du pieu : h = [m]

Profondeur du terrain modifié : h_z = [m]

Géométrie

2.7 Item "Matériau"

Un béton C25/30 est choisi dans le catalogue et on renseigne le poids volumique de la structure.

Poids volumique de la structure : $\gamma =$ [kN/m³]

— Béton

C 25/30 (utilisateur)

$f_{ck} = 25,00$ MPa

$f_{ctm} = 2,60$ MPa

$E_{cm} = 10333,00$ MPa

$G = 12917,00$ MPa

— Ferrailage longitudinal

B500

$f_{yk} = 500,00$ MPa

— Ferrailage horizontal

B500

$f_{yk} = 500,00$ MPa

Matériau

Pour la vérification de la stabilité à long terme des fondations profondes en bétons, il convient de prendre en compte un module différé $E = E_{dif} = \frac{E_{cm}}{3}$; $E = E_{dif} = \frac{31000}{3} = 10333 \text{ MPa}$. En conséquence, $G = 12917 \text{ MPa}$.

On clique alors sur "Personnaliser" pour éditer les caractéristiques du béton avec ces valeurs.

Edition du matériau - Béton

Description du matériau

Nom: C 25/30

Caractéristiques du matériau

Résistance cylindrique à la compression	$f_{ck} =$	25,00 MPa
Résistance à la traction	$f_{ctm} =$	2,60 MPa
Module d'élasticité	$E_{cm} =$	10333,00 MPa
Module d'élasticité en cisaillement	$G =$	12917,00 MPa

☐ Calculer les valeurs

OK
Annuler

2.8 Passage du calcul

En cliquant sur "Capacité portante horizontale", le programme effectue le calcul des forces internes appliquées au pieu et la capacité portante de la section. Son affichage en vert signifie que le calcul s'est correctement déroulé (résistance admissible par exemple).

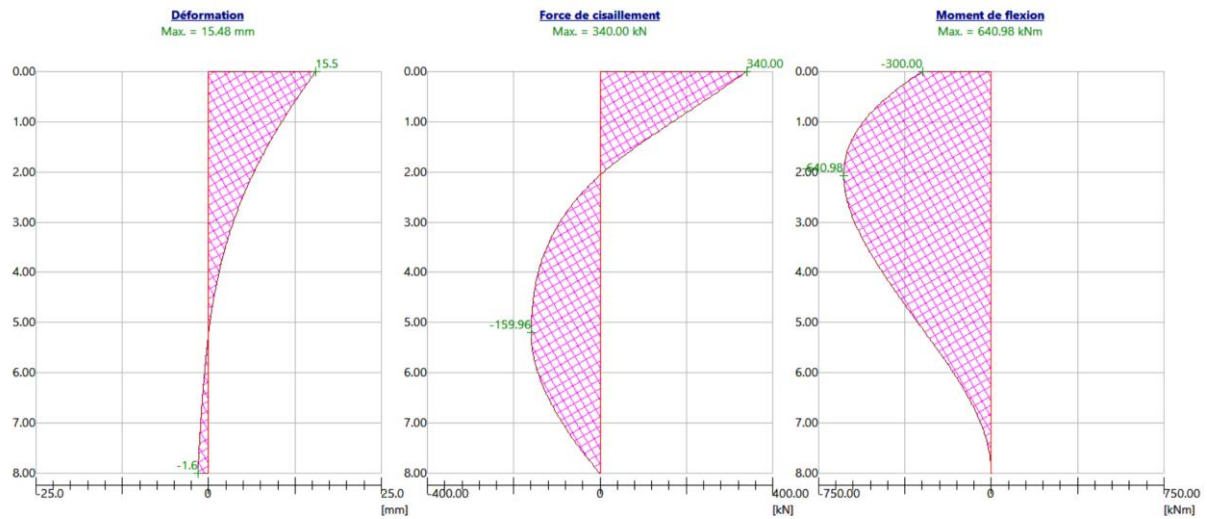
3 Résultats

En faisant une comparaison, on remarque que les résultats en déplacements (ELS) et efforts obtenus avec le Programme GEO5 - Pieux sont exactement les mêmes que ceux de la référence.

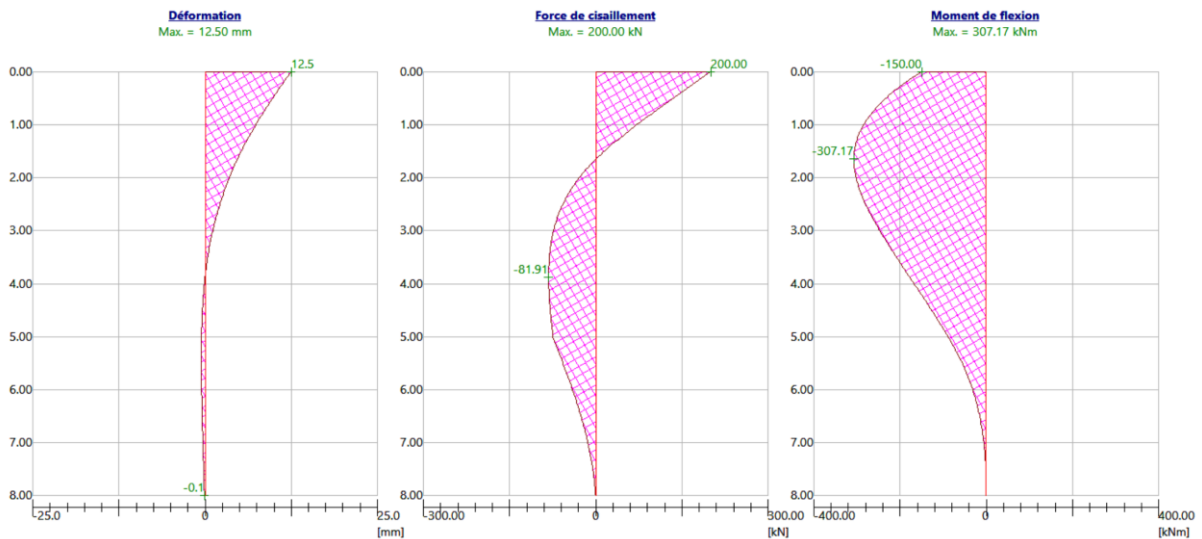
Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Déformation Y_{max} (mm)	Effort tranchant T_{max} (kN)	Moment de flexion M_{max} (kN.m)
ELU - situations durables et transitoires	(22)	340	558
Référence		340	558
ELS - combinaison caractéristique	16,3	260	403
Référence	16,3	260	403
ELS - combinaison fréquente	14,3	230	351
Référence	14,3	230	351
ELS – combinaison quasi-permanente	12,5	200	307
Référence	12,5	200	307

Graphes de la déformée et des profils d'effort pour le cas ELU :



Graphes de la déformée et des profils d'effort pour le cas ELS – combinaison quasi-permanente :



3.1 Vérification de la résistance structurale :

Dans cet exemple, la méthode de vérification de la référence ne présente pas la résistance du pieux au cisaillement, à la compression et flexion. Voilà pourquoi nous utilisons le Programme GEO5-Pieux pour justifier la résistance du pieux face à ces actions.

- **Dimensionnement de l'armature** : Après vérification aux quatre états limites, la référence et le programme GEO5-pieux retiennent les résultats suivants :

	Référence	GEO5-Pieux
Nbre de barres	14	13
Type d'armature	Aciers HA 500	Aciers B 500
Enrobage	70 mm	70 mm
Section minimale d'armature longitudinales (A_s)	25 cm ²	25 cm ²
Diamètre armatures	25 mm	16 mm
Espacement	10 -20 cm	20 cm

NB : le choix et les caractéristiques de l'armature peuvent être personnalisés dans l'item 'Matériau' du programme GEO5-Pieux.

Le programme effectue également la vérification du pourcentage de renforcement de l'armature. La vérification se fait selon la méthode de la déformation limite, en se basant sur la relation suivante :

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

$$\rho = \frac{4A_s}{\pi d^2} ; \rho \text{ est le degré ou le pourcentage d'armature longitudinal}$$

Avec $\rho_{\min} = 0.005$ pour $A_c \leq 0.5\text{m}^2$ et $\rho_{\max} = 0.04$. A_c – aire de la section du pieux.

- **Calcul de ρ** : Pourcentage d'armature ou degré de renforcement, $\rho = \frac{4A_s}{\pi d^2}$

Le programme GEO5 - Pieux retient un ferrailage constitué de 13HA16 avec $A_s = 26,1 \text{ cm}^2$; La référence obtient également le même résultat à l'ELU.

$$\rho = \frac{4A_s}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 25}{80^2 \pi} = 0.00520 \text{ ou } 0.52\%$$

=> $\rho_{\min} \leq 0.005 \leq \rho_{\max}$, le pourcentage d'armature est acceptable ; On conclut alors que la section est admissible.

3.2 Vérification de la résistance à la compression et flexion

Le tableau ci-dessous est un récapitulatif de la résistance de l'armature du pieu à la compression/flexion obtenus aux quatre états limites avec le programme GEO5 – pieux :

	Compression et flexion	Capacité portante	Vérification
ELU - situations durables et transitoires	Charge : $N_{Ed} = 17000 \text{ kN}$ Moment de Flexion : 558 kN.m	$N_{Rd} = 2373,13 \text{ kN}$ Moment résistant : $M_{Rd} = 778,58 \text{ kN.m}$	$2373,13 \text{ kN} > 17000 \text{ kN}$ $778,58 \text{ kN.m} > 558 \text{ kN.m}$ -> Conception admissible
ELS - combinaison caractéristique	Charge : $N_{Ed} = 1300 \text{ kN}$ Moment de Flexion : $403,25 \text{ kN.m}$	$N_{Rd} = 2552,65 \text{ kN}$ Moment résistant : $M_{Rd} = 791,81 \text{ kN.m}$	$2552,65 \text{ kN} > 1300 \text{ kN}$ $791,81 \text{ kN.m} > 403,25 \text{ kN.m}$ -> Conception admissible
ELS - combinaison fréquente	Charge : $N_{Ed} = 1200 \text{ kN}$ Moment de Flexion : $351,28 \text{ kN.m}$	$N_{Rd} = 2746,08 \text{ kN}$ Moment résistant : $M_{Rd} = 803,87 \text{ kN.m}$	$2746,08 \text{ kN} > 1200 \text{ kN}$ $803,87 \text{ kN.m} > 351,28 \text{ kN.m}$ -> Conception admissible
ELS – combinaison quasi-permanente	Charge : $N_{Ed} = 1100 \text{ kN}$ Moment de Flexion : $M_{Ed} = 307,17 \text{ kN.m}$	$N_{Rd} = 2910,81 \text{ kN}$ Moment résistant : $M_{Rd} = 812,83 \text{ kN.m}$	$2910,81 \text{ kN} > 1100 \text{ kN}$ $812,83 \text{ kN.m} > 307,17 \text{ kN.m}$ -> Conception admissible

3.3 Vérification de la résistance au cisaillement

Résultats de la résistance de l'armature du pieu aux cisaillements aux quatre états limites avec le programme GEO5 - pieux :

	Force motrice	Effort tranchant résistant	Vérification
ELU - situations durables et transitoires	$V_{Ed} = 340 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 378,77 \text{ kN}$	$340 \text{ kN} > 378,77 \text{ kN}$ Section admissible
ELS - combinaison caractéristique	$V_{Ed} = 260 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 348,49 \text{ kN}$	$348,49 \text{ kN} > 260 \text{ kN}$ Section admissible
ELS - combinaison fréquente	$V_{Ed} = 230 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 333,49 \text{ kN}$	$333,49 \text{ kN} > 230 \text{ kN}$ Section admissible
ELS – combinaison quasi-permanente	$V_{Ed} = 200 \text{ kN}$	$V_{Rd} = 318,49 \text{ kN}$	$318,49 \text{ kN} > 200 \text{ kN}$ Section admissible