

## **Influence de la couche limite sur la sollicitation et les réponses d'un bâtiment de grande hauteur**

**Auteur :** Tychon, Maxime

**Promoteur(s) :** Denoël, Vincent

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/20389>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

## Influence de la couche limite sur la sollicitation et les réponses d'un bâtiment de grande hauteur

---

Auteur           Maxime TYCHON

Promoteur       V. DENOËL

Tout au long de ce travail de fin d'études, on entreprend plusieurs démarches afin d'examiner l'impact de la couche limite atmosphérique sur les sollicitations et les réponses d'un bâtiment de grande hauteur. On se base sur une structure théorique académique, la plus générale possible, à laquelle on attribue un système noyau-portique périphérique.

Dans un premier temps, on réalise des essais en soufflerie sur un modèle réduit du bâtiment. Ces essais montrent que les deux premières charges statiques principales de vent permettent une reconstruction de l'enveloppe supérieure à 80%. Ce pourcentage inclut les réactions en base et les déplacements au sommet. La combinaison des actions longitudinales et transversales du vent révèle parfois des différences locales par rapport aux chargements individuels, notamment dans les réactions verticales, le moment de torsion du noyau et les déplacements verticaux des nœuds. Les charges statiques s'ajustent par rapport aux distributions de charges obtenues lors des simulations de l'action du vent longitudinales et transversales seules, tout en préservant la distribution verticale de ces simulations individuelles.

Dans un second temps, on se penche sur l'Eurocode et examine comment la norme aborde le problème. On suit les directives et formules de l'Eurocode et de l'annexe nationale belge pour établir une distribution de sollicitations dans chaque direction. En s'appuyant sur cette distribution, on procède à une analyse élastique linéaire d'une poutre encastree-libre pour calculer les réponses requises. La norme n'évoque pas la combinaison des actions.

La comparaison montre que la norme conduit, généralement, à une résultante conservatrice des charges dans le sens du vent, avec une erreur relative augmentant pour des terrains plus rugueux. L'erreur atteint environ 10% pour la catégorie II et 25% à 30% pour les catégories III et IV. Les faibles amortissements peuvent entraîner des sollicitations supérieures à celles prévues par la norme. La distribution des charges selon la norme suit le chargement externe, tandis que la distribution réelle suit les modes de vibration dominants, entraînant une hauteur d'application plus grande pour les essais en soufflerie, surtout avec des terrains plus rugueux.

Pour la force perpendiculaire au vent, la réponse est similaire en allure entre la norme et les essais, mais les valeurs diffèrent fortement. Les essais montrent des forces de même ordre de grandeur que dans le sens du vent, tandis que l'Eurocode présente des valeurs plus de 20 fois supérieures, avec des erreurs relatives de plus de 2000%.



# Table des matières

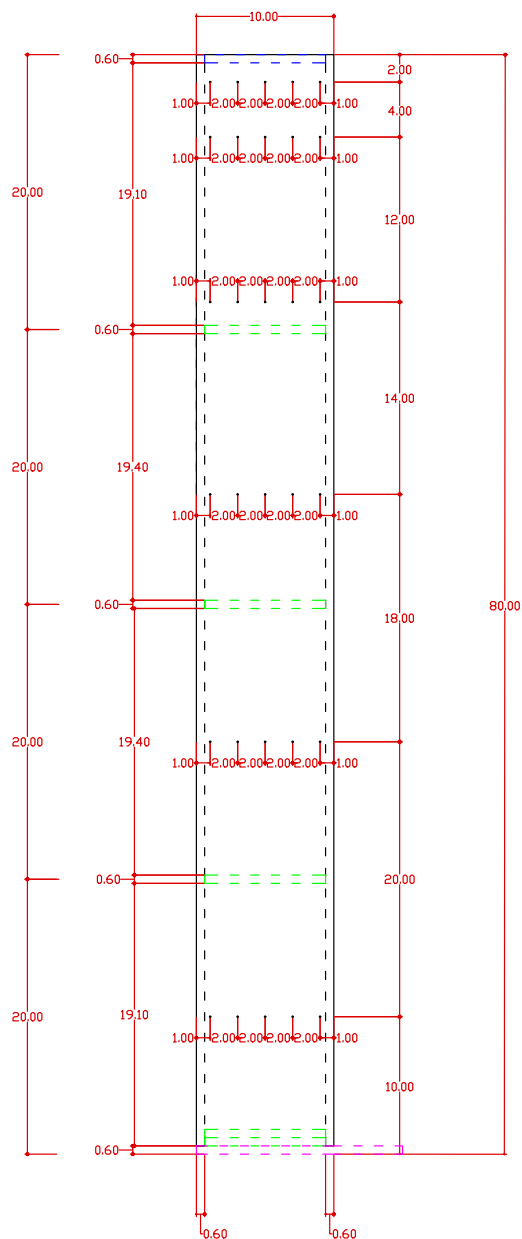
<b>A</b>	<b>Modèle réduit</b>	<b>1</b>
<b>B</b>	<b>Numérotation des noeuds dans le modèle numérique</b>	<b>3</b>
<b>C</b>	<b>Eurocode - calcul</b>	<b>5</b>
C.1	Pression de pointe . . . . .	5
C.1.1	Vitesse de référence du vent . . . . .	5
C.1.2	Vitesse moyenne . . . . .	6
C.1.3	Turbulence du vent . . . . .	6
C.1.4	Pression dynamique de pointe . . . . .	7
<b>D</b>	<b>Soufflerie - résultats supplémentaires</b>	<b>9</b>
D.1	Force longitudinale . . . . .	9
D.1.1	Influence amortissement . . . . .	9
D.2	Force transversale . . . . .	10
D.2.1	Influence couche limite . . . . .	10
D.2.2	Influence amortissement . . . . .	11
D.3	Combinaison . . . . .	13
D.3.1	Influence couche limite . . . . .	13
D.3.2	Influence amortissement . . . . .	13
D.3.3	Reconstruction de l'enveloppe . . . . .	14
<b>E</b>	<b>Comparaison Soufflerie vs Eurocode - résultats supplémentaires</b>	<b>17</b>
E.1	Force longitudinale . . . . .	17
E.2	Force transversale . . . . .	18



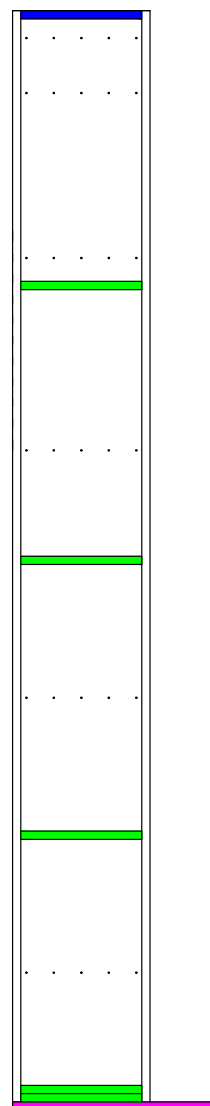


## A Modèle réduit

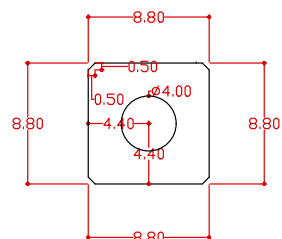
# FACADE



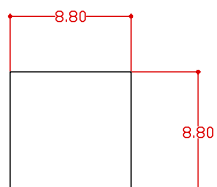
COUPE



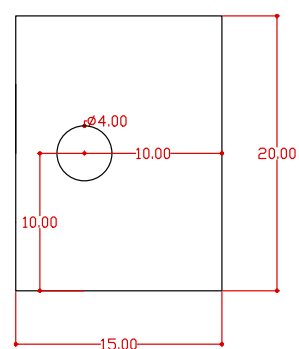
## DIAPHRAGME



## TOIT



BASE



**FIGURE A.1** – Plan du modèle réduit (cm)



(a) Tubage



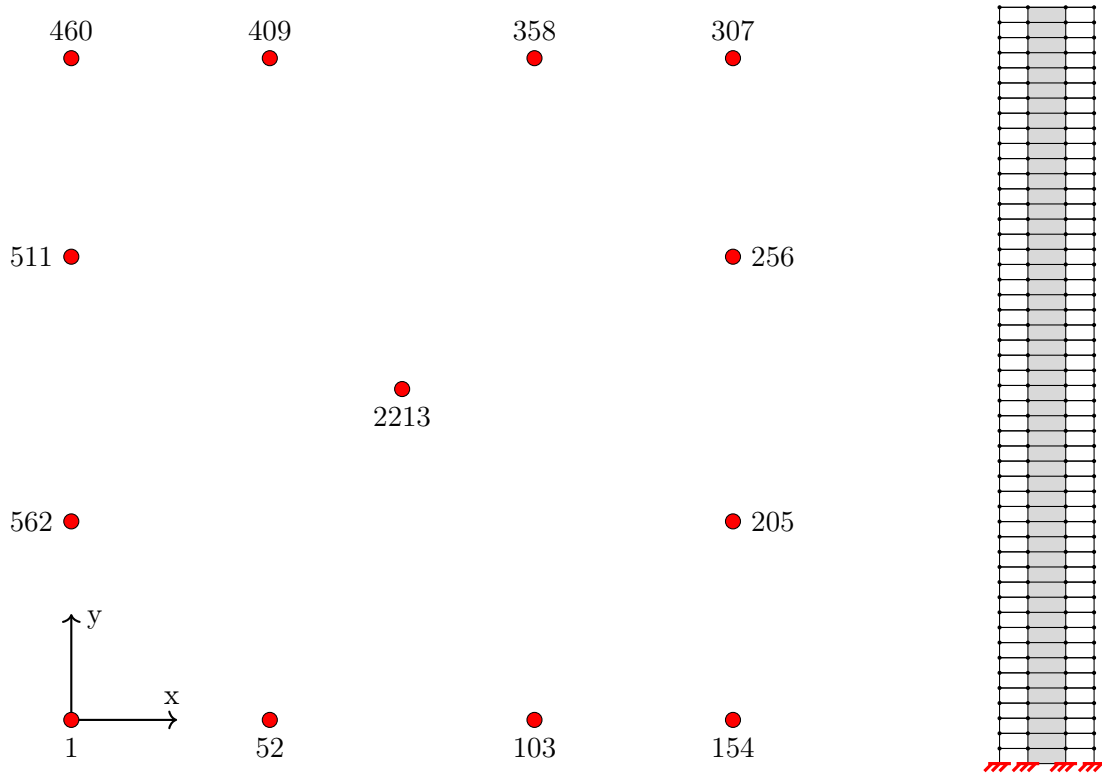
(b) Collage



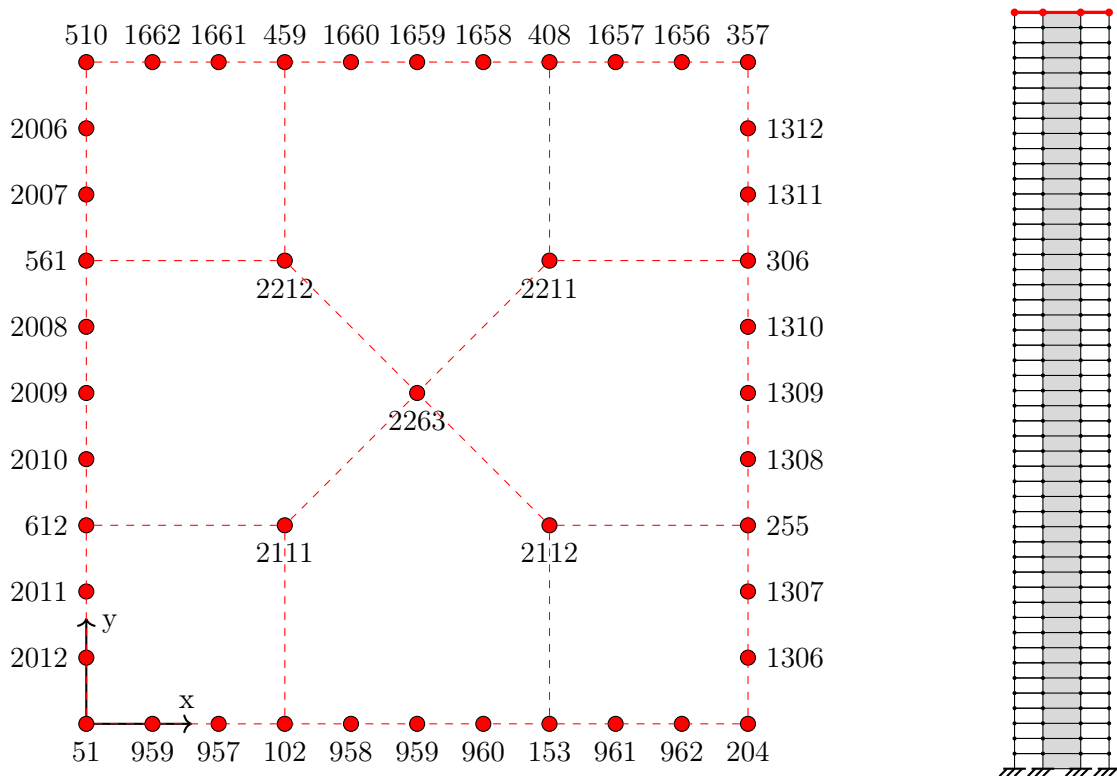
(c) Mise en place

**FIGURE A.2** – Photos du modèle réduit

## B Numérotation des noeuds dans le modèle numérique



**FIGURE B.1** – Numérotation des noeuds en base du bâtiment dans le modèle numérique



**FIGURE B.2** – Numérotation des noeuds au sommet du bâtiment dans le modèle numérique



## C Eurocode - calcul

### C.1 Pression de pointe

On commence par calculer les vitesses du vent et la pression de pointe sur toute la hauteur du bâtiment. La vitesse du vent et par conséquent la pression comprennent une composante moyenne et une composante turbulente.

#### C.1.1 Vitesse de référence du vent

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 26 \text{ m/s} \quad (\text{C.1})$$

- $v_b$  est la vitesse de base du vent, définie en fonction de la direction du vent et de la période de l'année, à 10 mètres au-dessus du sol dans une zone de catégorie de terrain II.
- $v_{b,0}$  est la valeur de base de la vitesse de référence du vent. Elle se définit sur base d'une période de retour de 50 ans. Selon les recommandations de l'ANB, on considère la vitesse de référence du vent comme égale à 26 m/s pour toute la Belgique.

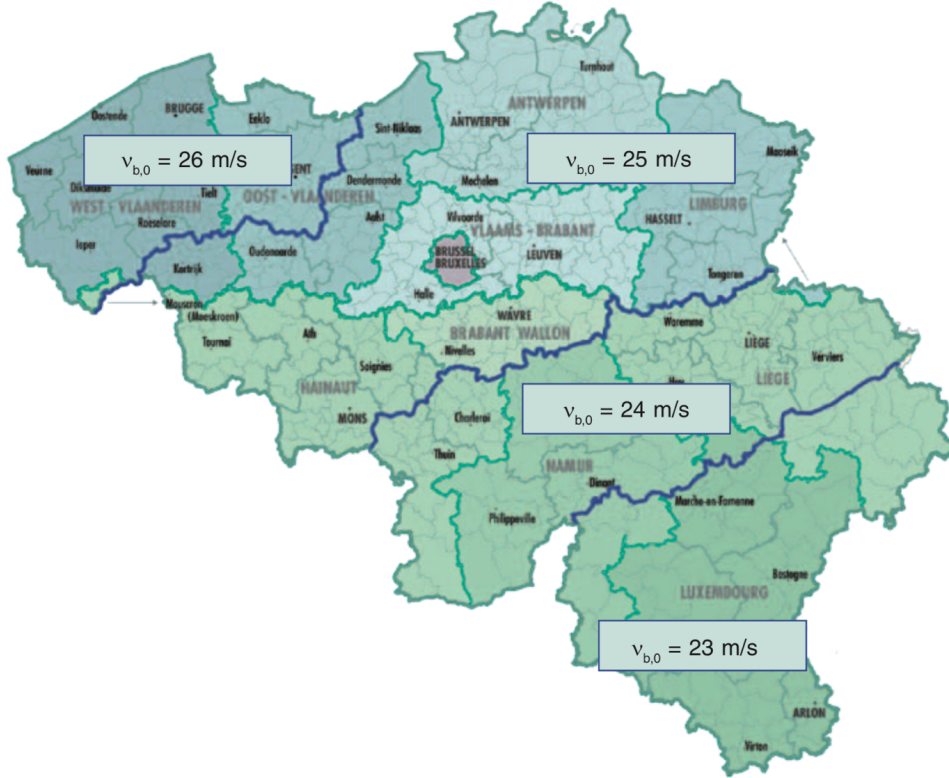


FIGURE C.1 – Vitesse de référence du vent  $v_{b0}$  [2]

- $c_{dir}$  est le coefficient de direction. Pour garder notre cas le plus général possible, on fixe la valeur à 1.
- $c_{season}$  est le coefficient de saison. Pour garder notre cas le plus général possible, on fixe la valeur à 1.

La formule établie est valide pour une période de retour de 50 ans. Si on souhaite changer la probabilité  $p$  de dépassement sur un an, on multiplie la vitesse de référence du vent par un coefficient de probabilité. On garde la période de retour de 50 ans.

$$c_{prob} = \left( \frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n = 1.00 \quad (\text{C.2})$$

- K est le paramètre de forme qui dépend du coefficient de variation de la distribution des valeurs extrêmes. La valeur recommandée est de 0.2.
- n est l'exposant. La valeur recommandée est de 0.5.

### C.1.2 Vitesse moyenne

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (C.3)$$

- $c_r$  représente le facteur de rugosité. Ce facteur tient compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la structure, due à la hauteur au-dessus du niveau du sol et à la rugosité du terrain en amont de la structure dans la direction du vent considérée. Pour l'étude de ce travail, on passe en revue les catégories de terrain II, III et IV.

Catégorie de terrain	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer	0,003	1
I Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles	0,01	1
II Zone à végétation basse telle que de l'herbe, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur	0,05	2
III Zone avec une couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, des forêts permanentes)	0,3	5
IV Zone dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m	1,0	10
NOTE Les catégories de terrain sont illustrées en A.1.		

FIGURE C.2 – Catégories de terrain [1]

$$\begin{aligned} z \geq z_{min} : c_r(z) &= k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\ z < z_{min} : c_r(z) &= k_r \cdot \ln \left( \frac{z_{min}}{z_0} \right) \end{aligned} \quad (C.4)$$

- $k_r$  est le facteur de terrain qui dépend de la longueur de rugosité  $z_0$ , calculé en utilisant la formule suivante.

$$k_r = 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{0.05} \right)^{0.07} \quad (C.5)$$

- $c_o$  est le coefficient orographique. Pour garder notre cas le plus général possible, on fixe la valeur à 1.

### C.1.3 Turbulence du vent

$$z \geq z_{min} : I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)} \quad (C.6)$$

- $c_o$  est le coefficient orographique.
- $k_l$  est le coefficient de turbulence. Pour un coefficient orographique unitaire, c'est-à-dire une pente de terrain inférieure à 5%, l'ANB considère :

- $k_1 = 1.00$  - catégories de terrain 0, I et II
- $k_1 = 0.95$  - catégorie de terrain III
- $k_1 = 0.85$  - catégorie de terrain IV

- $z_0$  est la longueur de rugosité.

#### C.1.4 Pression dynamique de pointe

La pression dynamique de pointe  $q_p$  intègre la vitesse moyenne et les fluctuations rapides de vitesse.

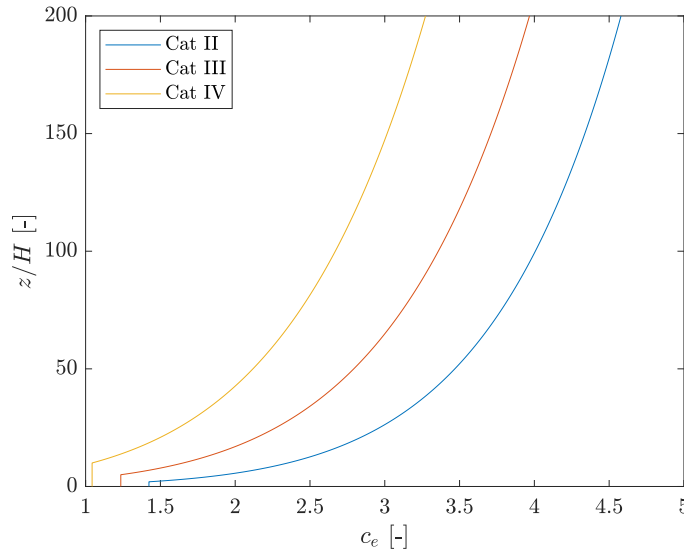
$$q_p(z) = (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

- $\rho$  est la masse volumique de l'air, qui dépend de l'altitude, de la température et de la pression atmosphérique attendues dans la région lors des tempêtes de vent. La valeur recommandée est de  $1.25 \text{ kg/m}^3$ .
- $c_e(z)$  est le facteur d'exposition calculé en utilisant la formule suivante.

$$c_e = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

- $q_b$  est la pression dynamique de référence calculée en utilisant la formule suivante.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 422.50 \text{ N/m}^2$$



**FIGURE C.3** – Représentation du coefficient d'exposition  $c_e$





## D Soufflerie - résultats supplémentaires

### D.1 Force longitudinale

#### D.1.1 Influence amortissement

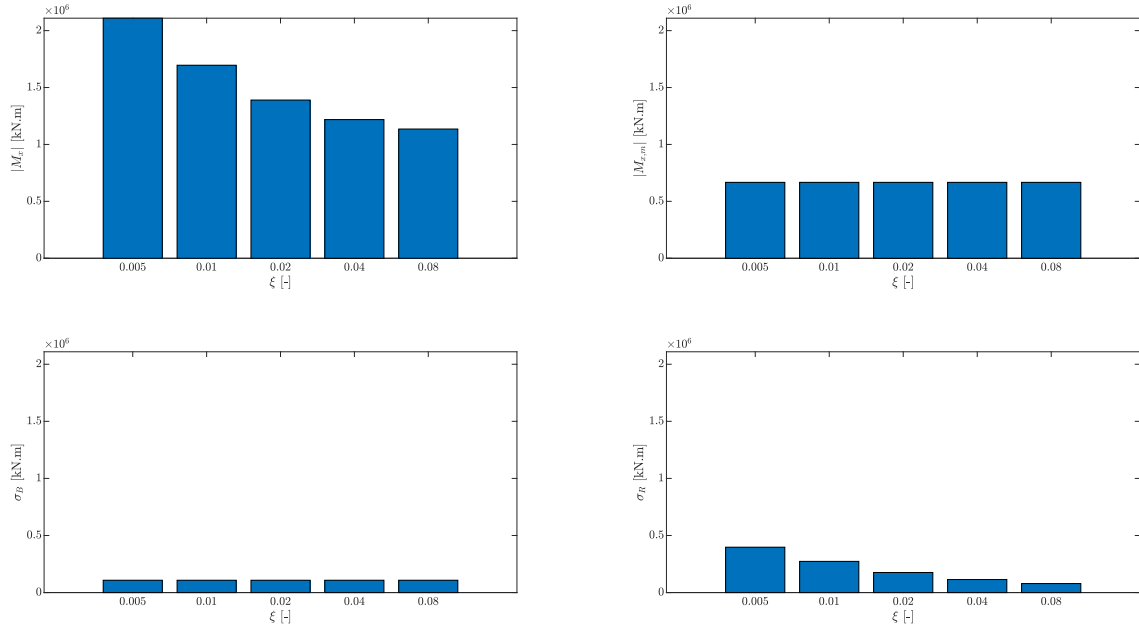


FIGURE D.1 – Influence de l'amortissement sur le moment global longitudinal selon les essais de soufflerie

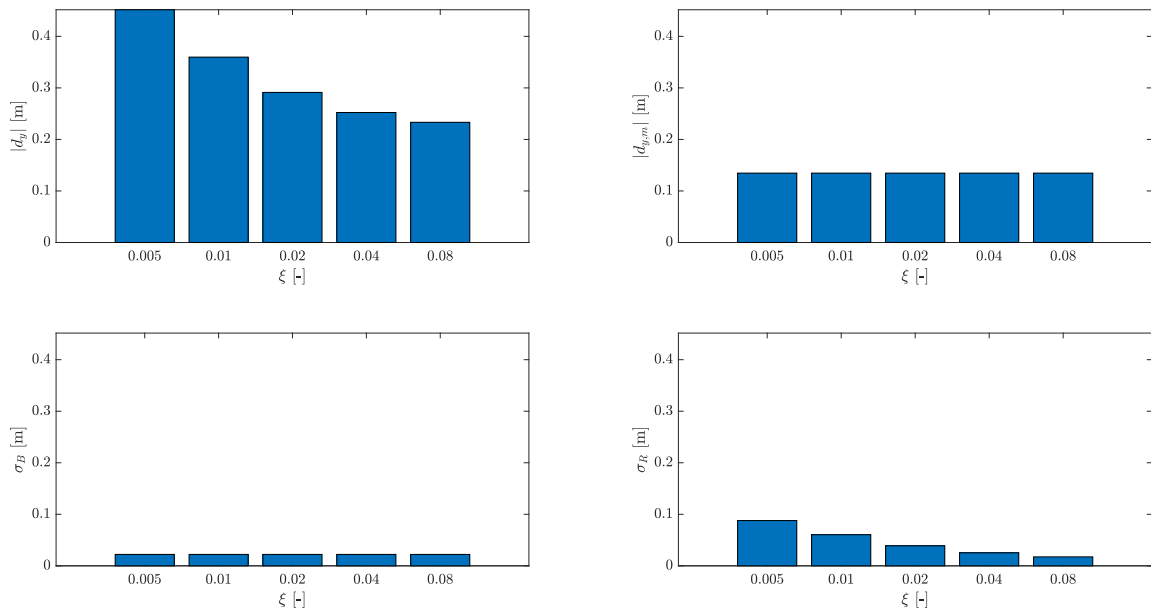


FIGURE D.2 – Influence de l'amortissement sur le déplacement en tête longitudinal selon les essais de soufflerie

$\xi$ [-]	$M_{x,\min}$ [kN.m]	$M_{x,\max}$ [kN.m]	$M_{x,m}$ [kN.m]	$\sigma_B$ [kN.m]	$\sigma_R$ [kN.m]
0.005	-2109	775.3	-667.0	108.2	397.6
0.01	-1696	362.0	-667.0	108.2	273.4
0.02	-1390	56.06	-667.0	108.2	176.0
0.04	-1218	-115.9	-667.0	108.2	114.4
0.08	-1135	-198.5	-667.0	108.2	78.84
	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

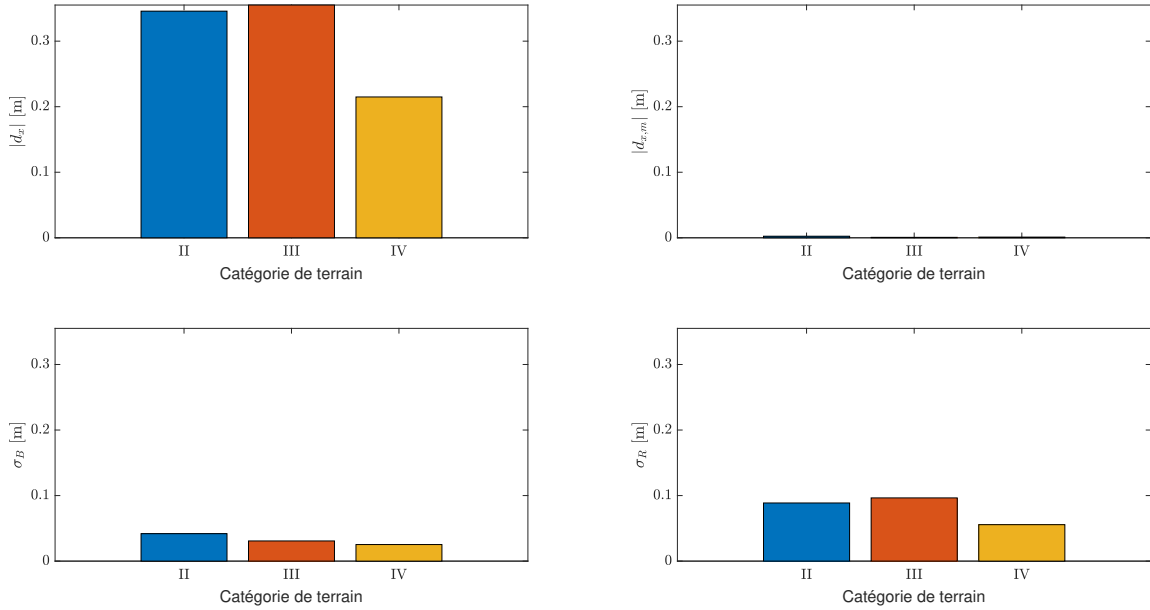
**TABLEAU D.1** – Influence de l'amortissement sur le moment global longitudinal selon les essais de soufflerie

$\xi$ [-]	$d_{y,\min}$ [m]	$d_{y,\max}$ [m]	$d_{y,m}$ [m]	$\sigma_B$ [m]	$\sigma_R$ [m]
0.005	-182.3	451.6	134.6	22.15	87.82
0.01	-90.45	359.7	124.6	22.15	60.38
0.02	-21.95	291.2	134.6	22.15	38.87
0.04	17.01	252.3	134.6	22.15	25.27
0.08	36.02	233.3	134.6	22.15	17.41
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$

**TABLEAU D.2** – Influence de l'amortissement sur le déplacement en tête longitudinal selon les essais de soufflerie

## D.2 Force transversale

### D.2.1 Influence couche limite



**FIGURE D.3** – Influence de la couche limite sur le déplacement en tête transversal selon les essais de soufflerie

Catégorie de terrain	$d_{x,\min}$ [m]	$d_{x,\max}$ [m]	$d_{x,m}$ [m]	$\sigma_B$ [m]	$\sigma_R$ [m]
II	-345.8	341.0	-2.38	41.88	88.72
III	-355.1	353.8	-0.65	30.79	96.57
IV	-214.9	212.8	-1.04	25.28	55.62
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$

**TABLEAU D.3** – Influence de la couche limite sur le déplacement en tête transversal selon les essais de soufflerie

## D.2.2 Influence amortissement

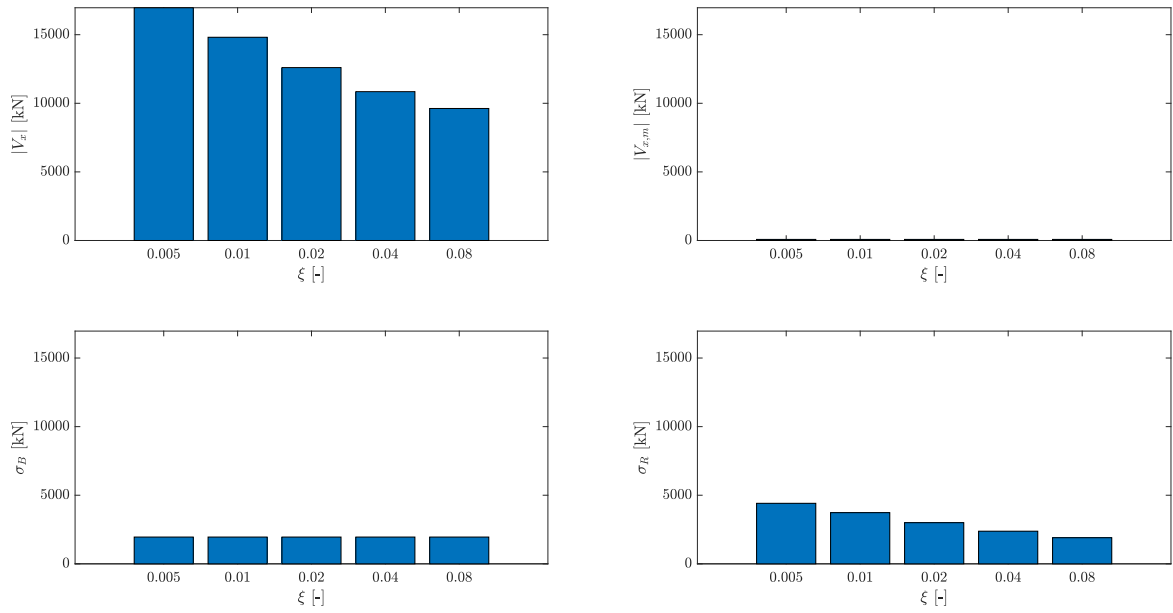


FIGURE D.4 – Influence de l'amortissement sur le cisaillement global transversal selon les essais de soufflerie

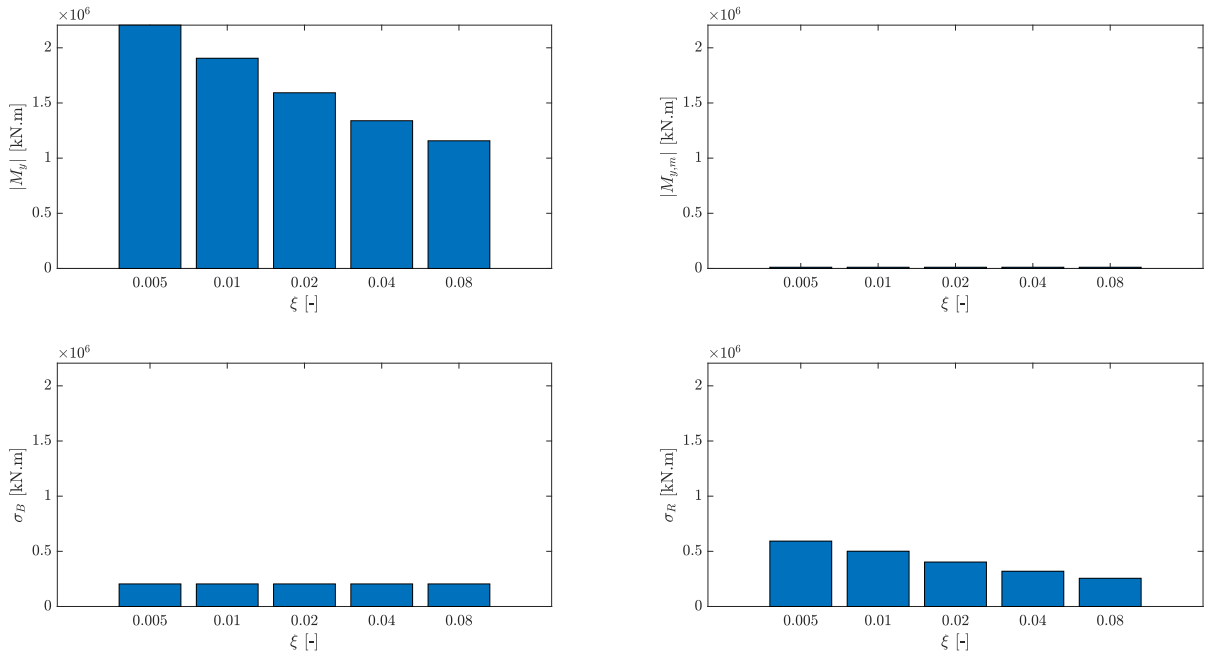
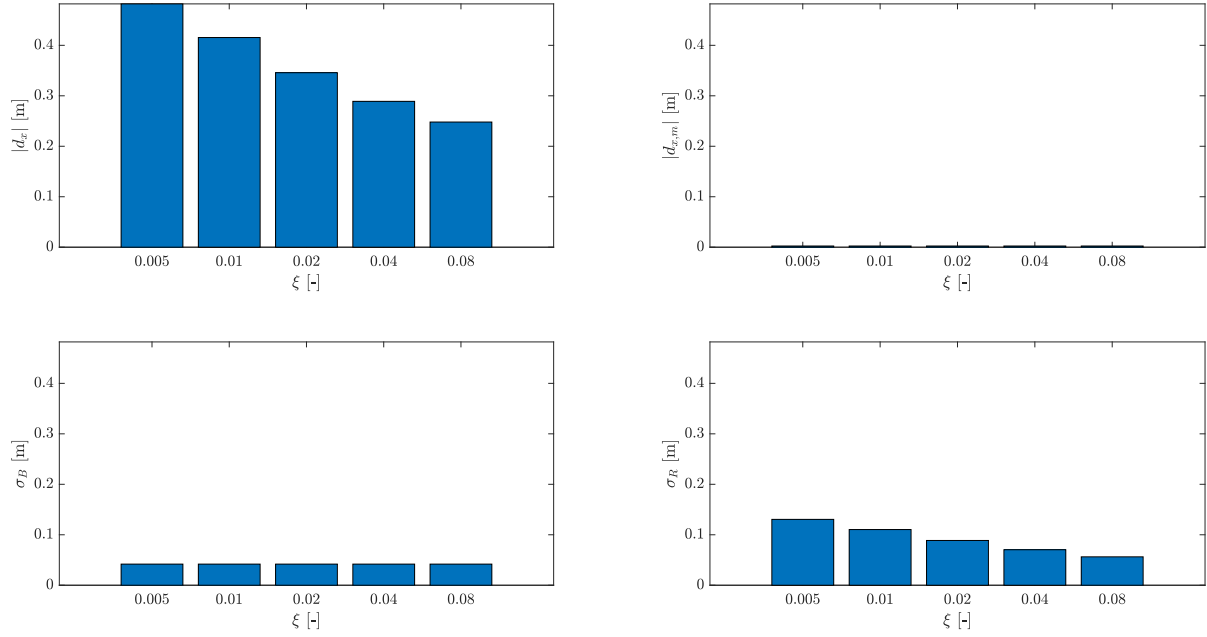


FIGURE D.5 – Influence de l'amortissement sur le moment global transversal selon les essais de soufflerie



**FIGURE D.6** – Influence de l’amortissement sur le déplacement en tête transversal selon les essais de soufflerie

$\xi$ [-]	$V_{x,min}$ [kN]	$V_{x,max}$ [kN]	$V_{x,m}$ [kN]	$\sigma_B$ [kN]	$\sigma_R$ [kN]
0.005	-16963	16805	-79.38	1952	4411
0.01	-14813	14654	-79.38	1952	3730
0.02	-12603	12445	-79.38	1952	2999
0.04	-10850	10691	-79.38	1952	2379
0.08	-9622	8464	-79.38	1952	1903

**TABLEAU D.4** – Influence de l’amortissement sur le cisaillement global transversal selon les essais de soufflerie

$\xi$ [-]	$M_{y,min}$ [kN.m]	$M_{y,max}$ [kN.m]	$M_{y,m}$ [kN.m]	$\sigma_B$ [kN.m]	$\sigma_R$ [kN.m]
0.005	-2206	2184	-10.98	204.6	592.7
0.01	-1905	1883	-10.98	204.6	501.1
0.02	-1593	1571	-10.98	204.6	402.9
0.04	-1339	1317	-10.98	204.6	319.6
0.08	-1157	1135	-10.98	206.4	255.7
	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

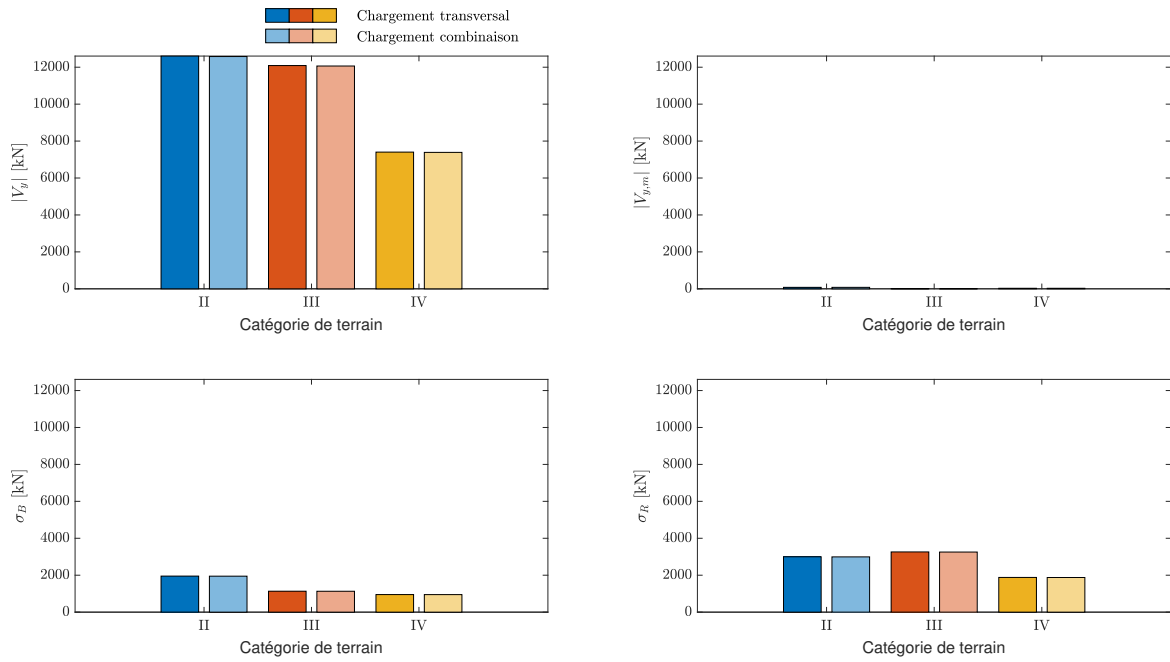
**TABLEAU D.5** – Influence de l’amortissement sur le moment global transversal selon les essais de soufflerie

$\xi$ [-]	$d_{x,min}$ [m]	$d_{x,max}$ [m]	$d_{x,m}$ [m]	$\sigma_B$ [m]	$\sigma_R$ [m]
0.005	-482.1	477.3	-2.38	41.88	130.5
0.01	-415.4	410.7	-2.38	41.88	110.3
0.02	-345.8	341.0	-2.38	41.88	88.72
0.04	-289.0	284.2	-2.38	41.88	70.37
0.08	-248.0	243.2	-2.38	41.88	56.31
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$

**TABLEAU D.6** – Influence de l’amortissement sur le déplacement en tête transversal selon les essais de soufflerie

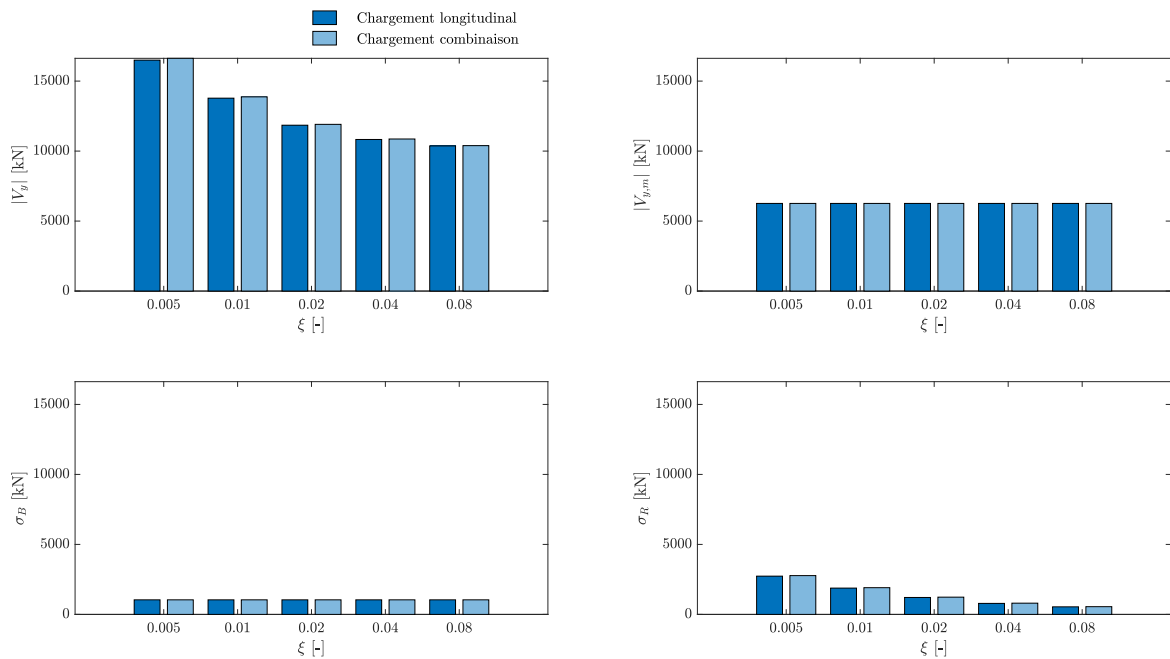
## D.3 Combinaison

### D.3.1 Influence couche limite



**FIGURE D.7** – Comparaison du cisaillement global transversal sous la sollicitation transversale et la sollicitation complète pour plusieurs couches limites

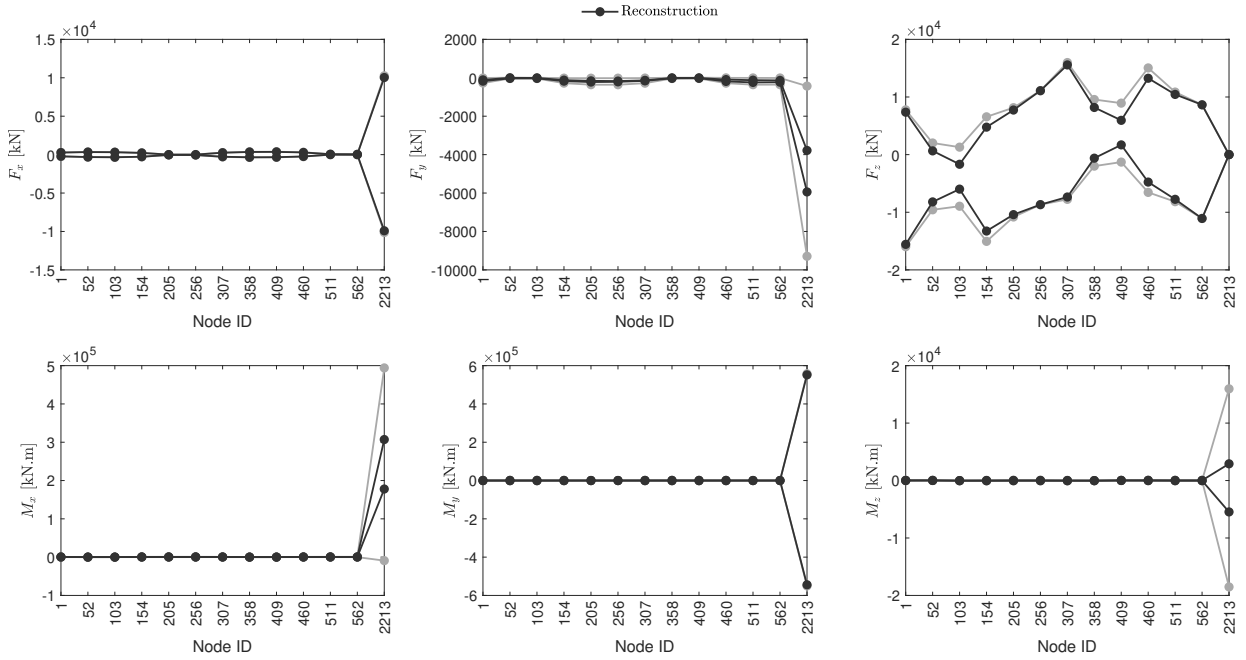
### D.3.2 Influence amortissement



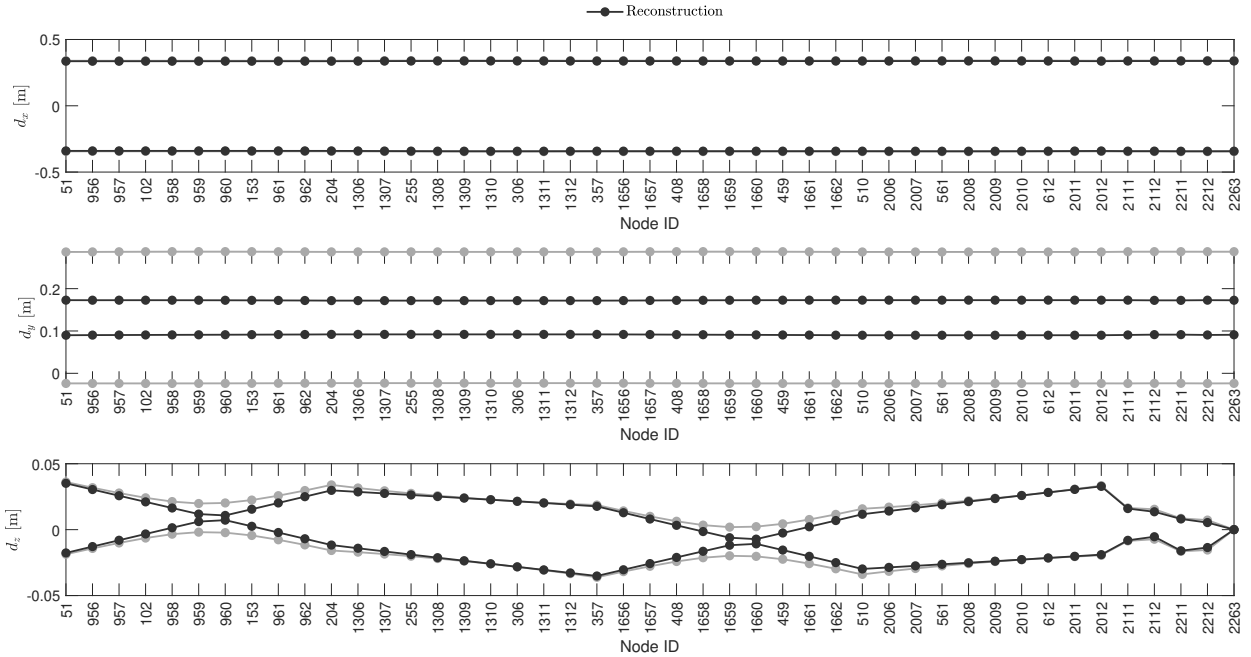
**FIGURE D.8** – Comparaison du cisaillement global longitudinal sous la sollicitation longitudinale et la sollicitation complète pour plusieurs valeurs d'amortissement

### D.3.3 Reconstruction de l'enveloppe

#### PSWL 1

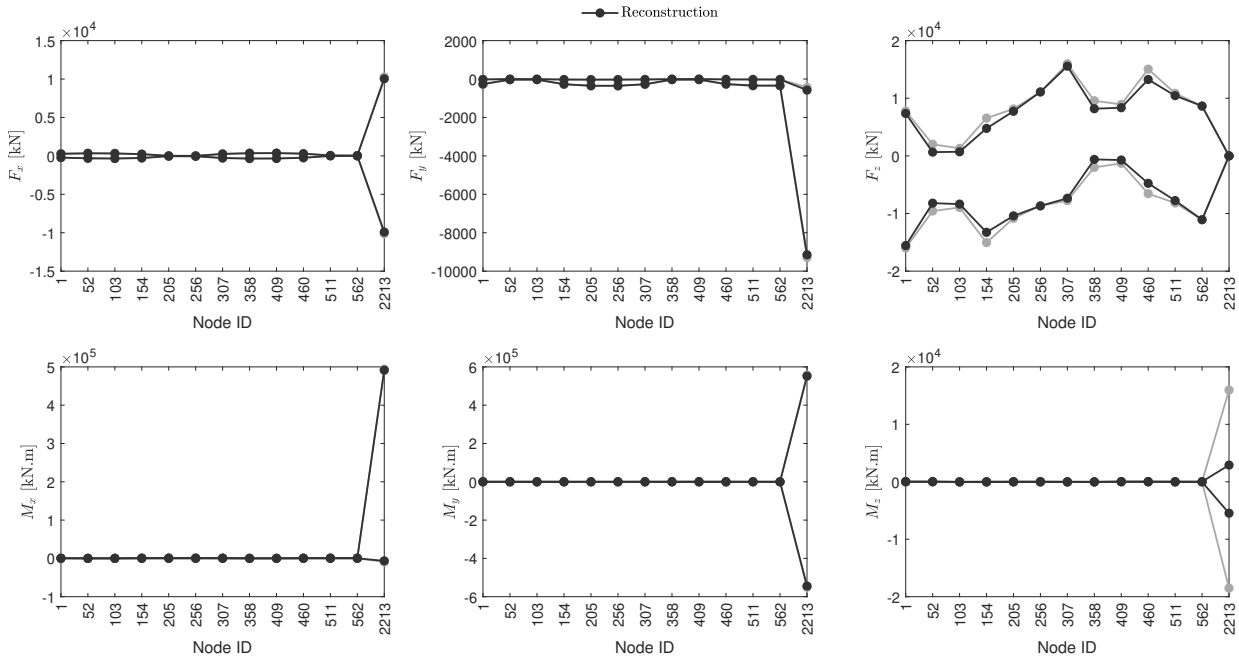


**FIGURE D.9** – Reconstruction de l'enveloppe des réactions d'appui avec la première PSWL sous la sollicitation complète du vent

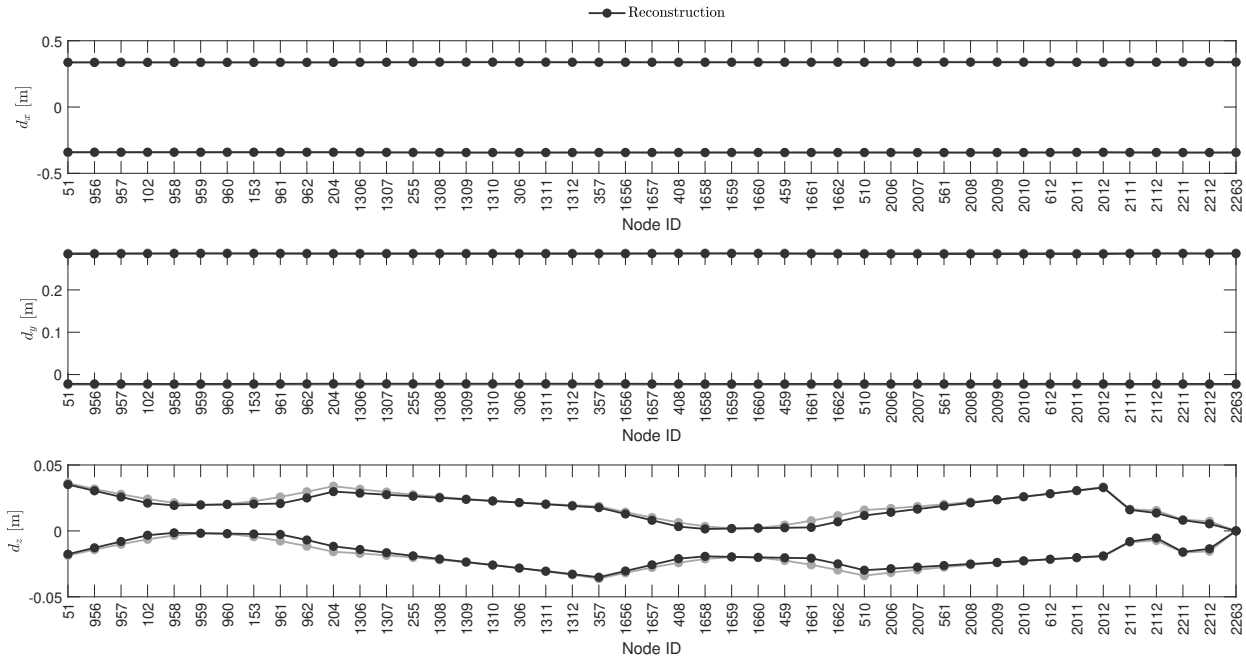


**FIGURE D.10** – Reconstruction de l'enveloppe des déplacements en tête avec la première PSWL sous la sollicitation complète du vent

## PSWL 1 + PSWL 2



**FIGURE D.11** – Reconstruction de l’enveloppe des réactions d’appui avec les deux premières PSWLs sous la sollicitation complète du vent



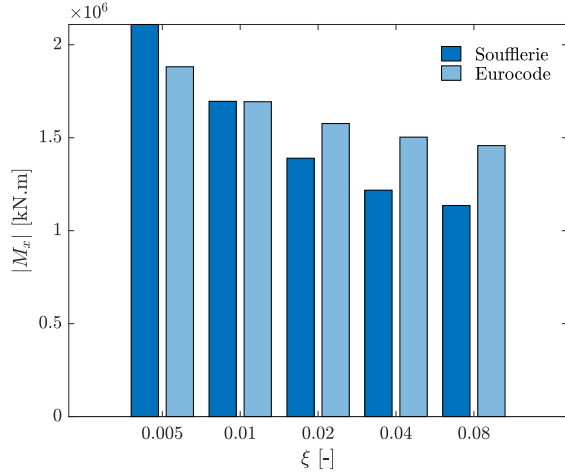
**FIGURE D.12** – Reconstruction de l’enveloppe des déplacements en tête avec les deux premières PSWLs sous la sollicitation complète du vent





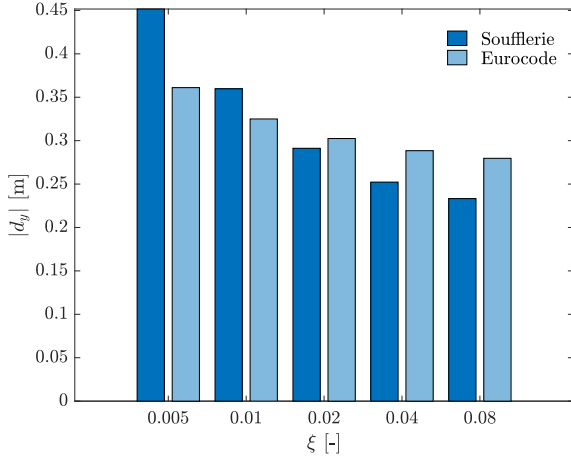
## E Comparaison Soufflerie vs Eurocode - résultats supplémentaires

### E.1 Force longitudinale



	$\xi$ [-]			
	0.005	0.02	0.08	
$Z_{\text{Soufflerie}}$ [kN.m]	2109	1390	1135	$\times 10^3$
$Z_{\text{Eurocode}}$ [kN.m]	1882	1576	1458	$\times 10^3$
$E_z$ [%]	-10.9	13.4	28.5	

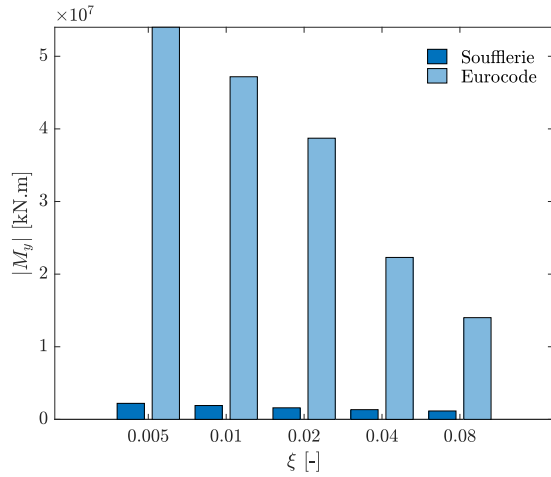
**FIGURE E.1** – Comparaison du moment global longitudinal entre l'Eurocode et les essais de soufflerie pour plusieurs valeurs d'amortissement



	$\xi$ [-]			
	0.005	0.02	0.08	
$Z_{\text{Soufflerie}}$ [m]	451.6	291.2	233.3	$\times 10^{-3}$
$Z_{\text{Eurocode}}$ [m]	361.1	302.5	279.7	$\times 10^{-3}$
$E_z$ [%]	-20.0	3.9	19.9	

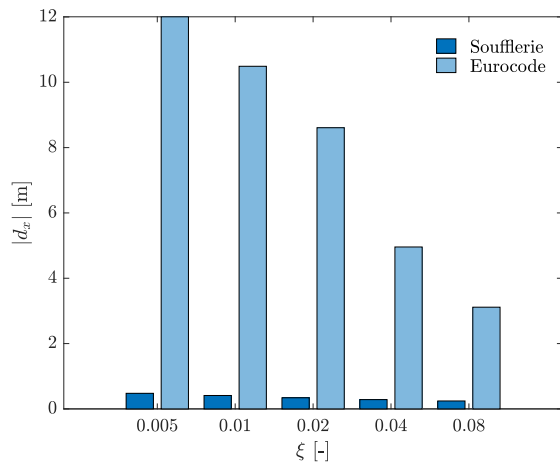
**FIGURE E.2** – Comparaison du déplacement en tête longitudinal entre l'Eurocode et les essais de soufflerie pour plusieurs valeurs d'amortissement

## E.2 Force transversale



	$\xi$ [-]			
	0.005	0.02	0.08	
$z_{\text{Soufflerie}}$ [kN.m]	2206	1593	1157	$\times 10^3$
$z_{\text{Eurocode}}$ [kN.m]	53995	38720	14007	$\times 10^3$
$E_z$ [%]	2348	2331	1111	

**FIGURE E.3** – Comparaison du moment global transversal entre l’Eurocode et les essais de soufflerie pour plusieurs valeurs d’amortissement



	$\xi$ [-]			
	0.005	0.02	0.08	
$z_{\text{Soufflerie}}$ [m]	477.3	341.0	243.2	$\times 10^{-3}$
$z_{\text{Eurocode}}$ [m]	12005	8609	3114	$\times 10^{-3}$
$E_z$ [%]	2415	2425	1180	

**FIGURE E.4** – Comparaison du déplacement en tête transversal entre l’Eurocode et les essais de soufflerie pour plusieurs valeurs d’amortissement