

Adaptation des règles européennes au calcul de cheminées autoportantes

Auteur : Neven, Sophie

Promoteur(s) : Jaspart, Jean-Pierre; Demonceau, Jean-Francois

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/4683>

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.



Adaptation des règles européennes au calcul de cheminées autoportantes

En collaboration avec la société Drever International s.a.

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master

« Ingénieur Civil des Constructions », par Sophie Neven

Composition du jury :

Jean-Pierre Jaspart

Jean-François Demonceau

Vincent Denoël

Olivier Pensis

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées
Année académique 2017-2018

Table des matières

Tables des illustrations.....	4
Tables des notations	5
Remerciements.....	9
Résumé	10
Abstract	11
1. Introduction	12
1.1. Contexte	12
1.2. Cas d'étude	13
1.2.1. Cheminée simple enveloppe.....	14
1.2.2. Cheminée double enveloppe	14
1.3. Méthodologie	15
2. Modélisation	20
3. Evaluation des propriétés mécaniques des matériaux	21
4. Calcul des actions.....	26
4.1. Poids propre	26
4.2. Charges de vent	26
4.2.1. Composante statique et composante dynamique dans la direction du vent.....	27
4.2.2. Composante dynamique dans la direction transversale au vent	35
4.3. Charges d'exploitation	39
5. Combinaisons d'actions	40
6. Analyse.....	42
7. Vérifications.....	46
7.1. Classification	46
7.2. Vérification d'ovalisation	46
7.3. Etats limites de service	47
7.4. Etats limites ultimes.....	48
7.4.1. Résistance en section.....	48
7.4.2. Voilement	49
7.4.3. Flambement global élastique.....	52
7.4.4. Vérification à la fatigue	54
8. Utilisation du logiciel pour le cas d'étude	57
8.1. Paramètres d'entrée et modélisation	57
8.2. Prise en compte des imperfections	58
8.3. Poids propre	59

8.4.	Calcul du premier mode propre et de la première fréquence propre	59
8.5.	Charges de vent	60
8.5.1.	Composante statique et composante dynamique dans la direction du vent.....	60
8.5.2.	Composante dynamique dans la direction transversale	62
8.6.	Calcul des efforts internes et déplacements.....	62
8.7.	Classification	63
8.8.	Vérification d'ovalisation	64
8.9.	Etats limites de service	66
8.10.	Etats limites ultimes.....	66
8.10.1.	Vérification de la résistance en section	66
8.10.2.	Vérification au voilement.....	67
8.10.3.	Vérification au flambement global élastique	68
8.10.4.	Vérification à la fatigue	68
8.11.	Conclusion	69
8.12.	Pistes d'amélioration	69
9.	Etudes paramétriques.....	72
9.1.	Influence du diamètre	72
9.2.	Influence de l'épaisseur	76
9.2.1.	Epaisseur constante sur la hauteur.....	76
9.2.2.	Epaisseur variable par tronçons.....	80
9.3.	Utilisation des études paramétriques pour valider la formule approchée de la première fréquence propre donnée dans la partie 1-4 de l'Eurocode 1	83
9.4.	Conclusion	85
10.	Conclusion et perspectives d'évolution	86
	Bibliographie.....	89
	Annexes	91
	Annexe 1 : Calcul de la pression de pointe	91
	Annexe 2 : Etablissement d'une formule générale pour l'inertie d'une portion d'anneau de cercle	93
	Annexe 3 : Vérification des formules approchées de calcul de la charge critique par rapport aux valeurs obtenues avec Ossa2D	94
	Annexe 4 : Logiciel – première partie	100
	Annexe 5 : Logiciel – deuxième partie	105
	Annexe 6 : Logiciel – troisième partie	117

Tables des illustrations

Figure 1 : Exemple de cheminées réalisées par la société Drever International S.A. (Drever International S.A.)	12
Figure 2 : Evolution du facteur kfy en fonction de la température provenant de trois sources différentes	23
Figure 3 : Evolution du facteur kE en fonction de la température provenant de trois sources différentes	23
Figure 4 : Evolution du facteur $k\rho$ en fonction de la température	24
Figure 5 : Evolution du facteur kfy avec la température pour trois aciers différents.....	25
Figure 6 : Quatre premiers modes propres d'une structure encastree libre (Reid)	27
Figure 7 : Calcul de l'élancement λ (Comité européen de normalisation, 2005).....	29
Figure 8 : Facteur d'extrémité $\psi\lambda$ en fonction de l'élancement λ et du taux de remplissage ϕ (Comité européen de normalisation, 2005)	30
Figure 9 : Spectre de réponse (Handa, 2006)	32
Figure 10 : Forme du premier mode propre d'une cheminée obtenue à l'aide de l'équation provenant de l'Eurocode 1 partie 1-4	34
Figure 11 : Détachement des tourbillons de Von Karman (Reid)	35
Figure 12 : Réponse charge - déplacement dans le cas d'une analyse élastique linéaire (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997).....	42
Figure 13 : Réponse charge - déplacement dans le cas d'une analyse élastique linéaire (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997).....	44
Figure 14 : Comparaison du premier mode propre calculé avec BeamZ et avec la formule de l'Eurocode	60
Figure 15 : Pression dynamique de pointe correspondant au cas d'étude	61
Figure 16 : Comparaison de la vitesse critique d'ovalisation sans raidisseur et de la vitesse moyenne du vent.....	65
Figure 17 : Comparaison des vitesses critiques d'ovalisation avec et sans raidisseurs, et de la vitesse moyenne du vent.....	66
Figure 18 : Deux solutions permettant de réduire les vibrations perpendiculaires au vent (Comission NBN E250 - E25001, 2010).....	71
Figure 19 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction du diamètre	74
Figure 20 : Déplacements en tête en fonction du diamètre	74
Figure 21 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction du diamètre	75
Figure 22 : Déplacements en tête en fonction du diamètre	76
Figure 23 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur	78
Figure 24 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur.....	78
Figure 25 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur	79
Figure 26 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur.....	79
Figure 27 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur	81
Figure 28 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur.....	81
Figure 29 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur	82
Figure 30 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur.....	82

Tables des notations

Lettres latines :

a_L	Amplitude de limitation normalisée
A_{ref}	Aire de référence
B^2	Coefficient de réponse quasi-statique
C_0	Coefficient orographique
C_c	Constante aérodynamique
C_d	Coefficient dynamique
C_{dir}	Coefficient de direction
C_f	Coefficient de force
$C_{f,0}$	Coefficient de force des cylindres sans écoulement de contournement aux extrémités
C_r	Coefficient de rugosité
C_s	Coefficient de dimension
$C_s C_d$	Coefficient structural
C_{season}	Coefficient de saison
D	Diamètre extérieur
Δw_k	Amplitude d'imperfection caractéristique
E	Module de Young
f_L	Fréquence adimensionnelle
F_{W1}	Force équivalente représentant l'action du vent dans la direction du vent
F_{W2}	Force équivalente représentant l'action du vent dans la direction perpendiculaire au vent
f_y	Limite d'élasticité
f_{yd}	Valeur de calcul de la limite d'élasticité
H	Hauteur
H_{cr}	Hauteur critique
h_{eff}	Hauteur équivalente
H_{eq}	Force horizontale équivalente prenant en compte les imperfections globales
I	Inertie
I_v	Intensité de turbulence du vent
k	Rugosité de surface équivalente
K_a	Paramètre d'amortissement aérodynamique
$k_E(T)$	Facteur donné par le module de Young à la température T rapportée à sa valeur à 20°C
$k_{fy}(T)$	Facteur donné par la limite d'élasticité à la température T rapportée à sa valeur à 20°C
k_l	Coefficient de turbulence

k_p	Facteur de pointe
k_r	Facteur de terrain
$k_\rho(T)$	Facteur donné par la masse volumique à la température T rapportée à sa valeur à 20°C
L	Echelle de turbulence
L_r	Entre-distance des raidisseurs
L_t	Echelle de référence
m	Masse par unité de longueur
m_e	Masse équivalente par unité de longueur du mode fondamental
N	Nombre de cycle de l'action du vent
n_1	Première fréquence propre de la construction
N_{crit}	Charge critique de flambement élastique
N_{Ed}	Effort axial
$n_{i,o}$	Fréquence propre d'ovalisation de la coque
q_p	Pression dynamique de pointe
R^2	Coefficient de réponse résonante
Re	Nombre de Reynolds
R_h et R_b	Fonctions d'admittance aérodynamique
S_c	Nombre de Scruton
S_L	Fonction de densité spectrale de la puissance adimensionnelle
S_t	Nombre de Strouhal
S_v	Densité spectrale à une branche
t	Epaisseur
T	Température
TV	Durée de vie
v	Vitesse de pointe du vent
v_b	Vitesse de référence du vent
v_{b0}	Valeur de base de la vitesse de référence du vent
v_{crit}	Vitesse critique du vent
$v_{crit,ov}$	Vitesse critique d'ovalisation de la coque
v_m	Vitesse moyenne du vent
W_s	Poids des éléments structuraux
W_t	Poids total
$y_{F,max}$	Déplacement maximal dans le temps au point où la déformée modale normalisée vaut 1, engendré par la force de vent dans la direction transversale
z_0	Longueur de rugosité

z_e Hauteur de référence

Lettres grecques :

α	Coefficient amplificateur des charges horizontales pour prendre en compte le second ordre
α_{imp}	Facteur de réduction d'imperfection élastique
β	Facteur de gamme plastique
χ	Facteur de réduction associé au voilement
δ	Décrément logarithmique total d'amortissement
Δ	Défaut global d'aplomb initial
δ_a	Décrément logarithmique d'amortissement aérodynamique
δ_d	Décrément logarithmique d'amortissement dû à des dispositifs spéciaux
δ_{max}	Déplacement maximal dans la direction du vent
δ_s	Décrément logarithmique d'amortissement structural
$\Delta\sigma_c$ et $\Delta\tau_c$	Résistances à la fatigue correspondant à 2 millions de cycles de chargement
ϵ_0	Coefficient de largeur de bande
ϵ_1	Facteur de fréquence
ϕ	Taux de remplissage
Φ_1	Première déformée modale
Φ_{imp}	Facteur d'imperfection
γ	Facteur partiel de résistance
η	Exposant d'interaction
λ	Elancement effectif
$\bar{\lambda}$	Elancement relatif de la coque
$\bar{\lambda}_0$	Elancement relatif au palier plastique
$\bar{\lambda}_p$	Elancement relatif à la limite plastique
μ_s	Masse de la coque par unité d'aire
ν	Fréquence de franchissement
ν_{air}	Viscosité cinématique de l'air
ν_p	Coefficient de poisson
ρ	Masse volumique
ρ_{air}	Masse volumique de l'air
σ	Contrainte normale
σ_{crit}	Contrainte critique de voilement élastique
σ_{Rd}	Contrainte résistante au voilement
σ_v	Ecart type

σ_{VM}	Contrainte de comparaison de Von Mises
τ	Contrainte tangentielle
ω	Paramètre de longueur adimensionnelle
ξ	Facteur amplificateur du poids de l'enveloppe prenant en compte les accessoires
ψ_0	Coefficient définissant la valeur de combinaison d'une action variable
ψ_1	Coefficient de combinaison
ψ_λ	Facteur d'effet d'extrémités

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier mes promoteurs, Monsieur Jaspert et Monsieur Demonceau, pour leur disponibilité et leur réactivité à toutes mes questions.

Ensuite, j'aimerais remercier Monsieur Pensis et Monsieur Hoang de la société Drever International S.A. pour leur présence à de nombreuses réunions et leurs conseils avisés.

Je remercie également Monsieur Denoël pour ses explications sur tous les phénomènes induits par le vent. Je le remercie également d'avoir rendu accessible son logiciel BeamZ pour mon travail, et d'y avoir effectué les modifications nécessaires, permettant de lier nos deux programmes.

Pour finir, je remercie mes proches pour leur soutien, leurs encouragements, et leur aide à la correction de la langue française dans ce travail.

Résumé

Ce travail a été demandé par la société Drever International S.A. dans le but de clarifier et automatiser le dimensionnement de leurs cheminées métalliques autoportantes. Quatre objectifs sont visés : l'analyse approfondie des étapes du dimensionnement des cheminées, basé sur les normes européennes, et prenant en compte les spécificités relatives à leurs structures ; la création d'un code de calcul automatisant le dimensionnement ; l'analyse critique des normes européennes utilisées ; et l'établissement de conseils, résultant d'études paramétriques, pour guider le choix du diamètre et des épaisseurs lors du pré-dimensionnement. Le code de calcul est réalisé dans le programme Matlab.

Ces objectifs sont atteints via l'établissement d'un modèle d'éléments finis prenant en compte les températures élevées de l'enveloppe structurale. Ensuite, les charges appliquées sont déterminées et ajoutées au modèle pour réaliser l'analyse. Celle-ci est faite à l'aide du logiciel BeamZ. Il effectue une analyse élastique linéaire au premier ordre, mais il a été décidé d'ajouter des corrections à cette analyse, pour considérer le second ordre. Ensuite, toutes les vérifications sont réalisées en suivant les recommandations des normes européennes. Le programme réalisé est alors utilisé sur un cas d'étude permettant d'évaluer les ordres de grandeur obtenus. Il apparaît que ce cas d'étude n'est en fait pas vérifié, dû à l'action trop importante des tourbillons de Von Karman. La création de ce logiciel et l'analyse de la méthode de dimensionnement proposée par l'Eurocode ont mis en évidence certaines incohérences, lacunes et failles présentes dans cette norme.

L'analyse du cas d'étude amène à la conclusion qu'un amortisseur doit être ajouté à la structure, pour atténuer les vibrations dans la direction perpendiculaire au vent. Les études paramétriques permettent de conseiller un petit diamètre pour diminuer les efforts en base et une épaisseur plus importante pour assurer des déplacements raisonnables. Ces études sont également utilisées pour analyser la validité d'une formule approchée, fournie dans la norme, permettant de calculer la fréquence propre des cheminées.

Abstract

This work was requested by the company Drever International S.A. in order to clarify and automate the design of their self-supporting metal chimneys. Four objectives are targeted: an in-depth analysis of the chimney designing steps, based on European standards, and taking into account the specificities relative to their structures; the creation of a calculation code making the design automatic; the critical analysis of the European standards used; and the establishment of advice, resulting from parametric studies, to guide the choice of diameter and thicknesses during pre-design. The calculation code is made in Matlab.

These goals are achieved through the establishment of a finite element model taking into account the high temperatures of the structural envelope. Then the applied loads are determined and added to the model to perform the analysis. This is done using the BeamZ software. It performs a first order linear elastic analysis, but it was decided to add corrections to this analysis, to consider the second order. After that, all the checks are carried out following the recommendations of European standards. The realized program is then used on a case study to evaluate the orders of magnitude obtained. It appears that this case study is in fact not checked, due to the too important action of vortex shedding. The creation of this software and the analysis of the designing method proposed by the Eurocode have highlighted some inconsistencies, gaps and flaws present in this standard.

The analysis of the case study leads to the conclusion that a damper must be added to the structure, to reduce the vibrations in the direction perpendicular to the wind. Parametric studies can advise a small diameter to reduce the forces in the foundation and a greater thickness to ensure reasonable displacements. These studies are also used to analyze the validity of an approximate formula, provided in the standard, for calculating the natural frequency of chimneys.

1. Introduction

1.1. Contexte

La société Drever International S.A. est une entreprise qui se dédie à l'avancement de la technologie des équipements de traitement thermique. Elle est spécialisée dans les fours de recuit continu et les lignes de galvanisation pour le traitement de bandes d'acier au carbone et d'acier inoxydable (Drever International S.A., 2007). Les fours que la société produit nécessitent des cheminées autoportantes de plusieurs dizaines de mètres de haut pour évacuer les fumées résiduelles. Le dimensionnement de ces structures est l'objet de ce travail. Une illustration du type de constructions réalisées est présentée à la Figure 1.



Figure 1 : Exemple de cheminées réalisées par la société Drever International S.A. (Drever International S.A.)

Ce travail a été demandé par la société Drever International S.A. dans le but d'analyser en détail le dimensionnement des cheminées conçues pour évacuer les fumées des fours. La société intervient dans de nombreux pays, ce qui complique le dimensionnement des structures. En effet, différentes normes existent pour guider le calcul et les vérifications, et tous les pays n'utilisent pas la même. Par conséquent, la société a désiré clarifier et automatiser le calcul.

Ce travail comporte quatre objectifs. Le premier est de comprendre et analyser avec précision les différentes étapes et spécificités du dimensionnement d'une cheminée métallique autoportante. Cela passe, entre autre, par la compréhension des phénomènes guidant le dimensionnement. Le second est de créer un code de calcul basé sur les normes européennes. Il simplifiera et automatisera le dimensionnement en tenant compte des particularités des cheminées de la société Drever International S.A.. Le troisième objectif est de réaliser une analyse critique des méthodes proposées dans les normes européennes afin d'y évaluer les éventuelles failles, incohérences ou manques d'informations. Le quatrième est d'étudier l'influence de certains paramètres clés, ce qui aidera à

optimiser le choix de leur valeur. En effet, le programme développé se contentera de calculer les charges et de vérifier la structure à partir des caractéristiques données par l'utilisateur, il n'aura pas de rôle d'optimisation.

Deux catégories de cheminées sont réalisées par la société Drever International S.A. : des cheminées de type simple enveloppe pour des hauteurs inférieures à 50 mètres, et des cheminées de type double enveloppe pour des hauteurs supérieures. L'enveloppe structurelle se présente sous la forme d'un cylindre en acier, fixé au sol et relié via un conduit (de diamètre égal au fût en contact avec les fumées) à un ventilateur extrayant les fumées des fours. Les cheminées sont indépendantes des bâtiments à proximité qui contiennent, entre autres, le four et le ventilateur, puisque le conduit les reliant ne transmet aucun effort. Elles se situent à côté de bâtiments mais sont toujours fixées au sol et non sur l'un d'eux.

Actuellement, les cheminées de hauteur inférieure à 50 mètres ne sont presque plus utilisées. Cependant, elles sont tout de même considérées dans ce travail, de manière à pouvoir simplifier le problème en ne prenant, dans un premier temps, qu'une enveloppe.

La hauteur des cheminées de la société Drever International S.A. tourne généralement aux environs de 50 à 60 mètres, avec un diamètre d'environ 3 à 4 mètres. Elles sont construites par tronçons de plus ou moins 12 mètres, assemblés à l'aide de brides boulonnées. Le diamètre est constant sur la hauteur mais l'épaisseur varie d'un tronçon à l'autre. Chacun de ceux-ci est constitué de tôles de 2 mètres de large, dont les deux extrémités ont été soudées pour former des cylindres. Les petits cylindres de 2 mètres de large sont ensuite soudés bout-à-bout pour former les tronçons de 12 mètres. Les fûts sont également raidis à l'aide de couronnes tous les 3 mètres environ, mais cela sera étudié et optimisé dans la suite de ce travail.

Au niveau des équipements, les cheminées possèdent généralement des échelles ainsi que deux passerelles. Dans les cheminées double enveloppe, des planchers sont placés à différents niveaux. Ceux-ci relient les deux enveloppes et bloquent les déplacements relatifs horizontaux, mais pas les déplacements verticaux.

Deux types de phénomènes sont rencontrés lors du dimensionnement, soit ils sont dus à des spécificités des cheminées de la société Drever International S.A., soit ils concernent les cheminées autoportantes de manière générale. En effet, lors de toute étude de cheminées autoportantes en acier, les phénomènes suivants doivent, entre autres, être étudiés : tourbillons de Van Karman, ovalisation du fût, variation des caractéristiques mécaniques des matériaux avec la température, fatigue due à l'effet dynamique du vent et répartition particulière des contraintes due à la forme de coque. De plus, une attention spécifique doit être accordée à la présence de passerelles, accessoires extérieurs, raidisseurs ainsi qu'aux assemblages et à la fondation des cheminées dimensionnées pour la société Drever International S.A..

1.2. Cas d'étude

Le code de calcul créé doit être valable de manière générale, pour toutes les cheminées réalisées par la société Drever International S.A.. Cependant, pour pouvoir obtenir des résultats, les présenter dans ce rapport et évaluer leur validité en fonction des ordres de grandeur, un exemple sera analysé à l'aide du code. Dans cette section, une cheminée de chaque catégorie est présentée. Ces cas d'étude représentent une opportunité de mettre en avant les paramètres importants, ainsi que les dimensions et caractéristiques usuelles. Ce sont toutes deux des structures réelles ayant été dimensionnées par la société. Toutefois, seule celle de type simple enveloppe sera modélisée et vérifiée par le code développé dans le cadre de ce travail.

1.2.1. Cheminée simple enveloppe

La cheminée simple enveloppe, qui servira de cas d'étude, possède les dimensions présentes au Tableau 1. Le diamètre varie de manière linéaire puis reste constant jusqu'au sommet. Il y a quatre épaisseurs différentes, variant par segments sur lesquels elle reste constante. Les longueurs de ceux-ci, donnés de bas en haut, sont : 9,8 mètres ; 10 mètres ; 9,7 mètres ; 9,3 mètres. Les épaisseurs dans le Tableau 1 sont données dans le même ordre. (Drever International S.A., 1996)

Hauteur	38,8 m
Diamètre extérieur	Variable – de 2,9 m en base à 1,6 m à l'altitude 9,8 m. Constant – 1,6 m pour les altitudes supérieures.
Epaisseur	Variable – 10 mm, 8 mm, 7 mm, 5 mm.

Tableau 1 : Dimensions de la cheminée simple enveloppe (Drever International S.A., 1996)

L'ouverture vers le conduit amenant les fumées se situe entre les altitudes 19,8 mètres et 23,5 mètres. Juste au-dessus se trouve un silencieux de 6 mètres de haut. Par rapport à l'enveloppe, ce silencieux est beaucoup plus lourd et va donc intervenir fortement dans le poids total de la cheminée.

L'enveloppe est composée de deux matériaux : de l'acier S235 pour les tronçons inférieurs à celui permettant l'entrée des fumées, et de l'acier inoxydable AISI 304 pour ce tronçon ainsi que ceux situés au-dessus. Une passerelle est présente à une altitude de 35,9 mètres. La fondation est réalisée à l'aide de 24 boulons de type M42.

Par rapport à cette structure réelle, quelques modifications ont été apportées pour la modélisation. Tout d'abord, le silencieux n'est pas pris en compte. En effet, ils ne sont généralement plus placés sur les cheminées mais en amont, dans le bâtiment contenant le four. Dès lors, il a été décidé de ne pas tenir compte de ce silencieux et de le remplacer par un tronçon de cheminée fictif, de 1,6 mètre de diamètre et ayant la même épaisseur que la partie inférieure. Ensuite, le diamètre est considéré constant sur toute la hauteur car des troncs coniques ne sont actuellement plus utilisés puisque cela introduit des moments de flexion parasites.

1.2.2. Cheminée double enveloppe

La cheminée double enveloppe servant de cas d'étude possède les dimensions présentes au Tableau 2. Elle est constituée de six segments de longueurs et épaisseurs différentes. Les diamètres intérieur et extérieur restent cependant constants sur toute la hauteur. L'enveloppe intérieure ne commence qu'à partir du troisième tronçon, dans lequel se fait l'entrée des fumées à 28 mètres de haut. Elle est posée sur un grillage de poutres. (Drever International S.A., 2016)

Les longueurs des six segments sont, de bas en haut : 12 mètres, 12 mètres, 12 mètres, 8 mètres, 8 mètres, et 6 mètres. L'épaisseur de l'enveloppe extérieure varie pour les différents segments. Ces valeurs sont données dans le même ordre dans le Tableau 2.

Hauteur	58 m
Diamètre extérieur de l'enveloppe extérieure	3,7 m
Diamètre intérieur de l'enveloppe extérieure	1,62 m
Epaisseur de l'enveloppe extérieure	Variable – 20 mm, 16 mm, 12 mm, 10 mm, 8 mm, 6 mm.
Epaisseur de l'enveloppe intérieure	5 mm

Tableau 2 : Dimensions de la cheminée double enveloppe (Drever International S.A., 2016)

Cette cheminée possède beaucoup plus d'équipements que celle de type simple enveloppe présentée ci-avant. Elle est munie de plusieurs échelles mises bout à bout sur toute la hauteur et placées à l'intérieur de l'enveloppe extérieure. Plusieurs planchers lient les enveloppes intérieure et extérieure à intervalles réguliers, environ tous les 4 à 6 mètres. Un escalier est également présent hors de l'enveloppe extérieure à partir du quatrième segment. Cependant, l'escalier extérieur n'équipe généralement pas les cheminées double enveloppe, il correspond à une demande spécifique du client. Il ne sera donc pas considéré spécifiquement puisqu'il n'est pas un équipement revenant de manière générale.

Pour cette cheminée, chaque enveloppe est constituée d'un seul matériau. L'enveloppe intérieure est en acier inoxydable AISI 304 tandis que l'enveloppe extérieure est faite d'acier S235.

La fondation est réalisée au moyen de 52 boulons de types M36.

1.3. Méthodologie

Pour réaliser un logiciel prenant en compte les particularités des cheminées de la société Drever et pour étudier les effets des variations de différents paramètres, la première étape a évidemment été de se familiariser avec ces structures. Pour cela, les principales caractéristiques ont été expliquées par des ingénieurs de la société et des plans de cheminées existantes ont été analysés.

Ensuite, un certain nombre de documents traitant du dimensionnement de cheminées métalliques de manière générale, ainsi que des phénomènes importants intervenant dans leur dimensionnement ont été étudiés. Les normes européennes Eurocodes ont également été analysées pour écrire le code de calcul. Ce logiciel suit la structure présentée sur l'organigramme ci-dessous.

Le code de calcul développé dans le cadre de ce travail se compose de trois parties principales. La première consiste en l'encodage des données géométriques et mécaniques, et le calcul des actions. Dans la deuxième, le code créé s'intègre au programme développé par le professeur Vincent Denoël, BeamZ, qui réalise l'analyse du modèle et calcule les efforts et déplacements. Finalement, dans la troisième partie sont effectuées les vérifications pour s'assurer de la résistance de la structure aux états limites de service et ultimes.

Durant la première partie du programme, l'utilisateur va être sollicité pour encoder toutes les caractéristiques de la cheminée nécessaires à l'établissement du modèle. Il devra également fournir certaines informations sur l'environnement dans lequel sera située la cheminée. Le programme traitera toutes ces données pour les fournir au logiciel BeamZ dans un format compatible.

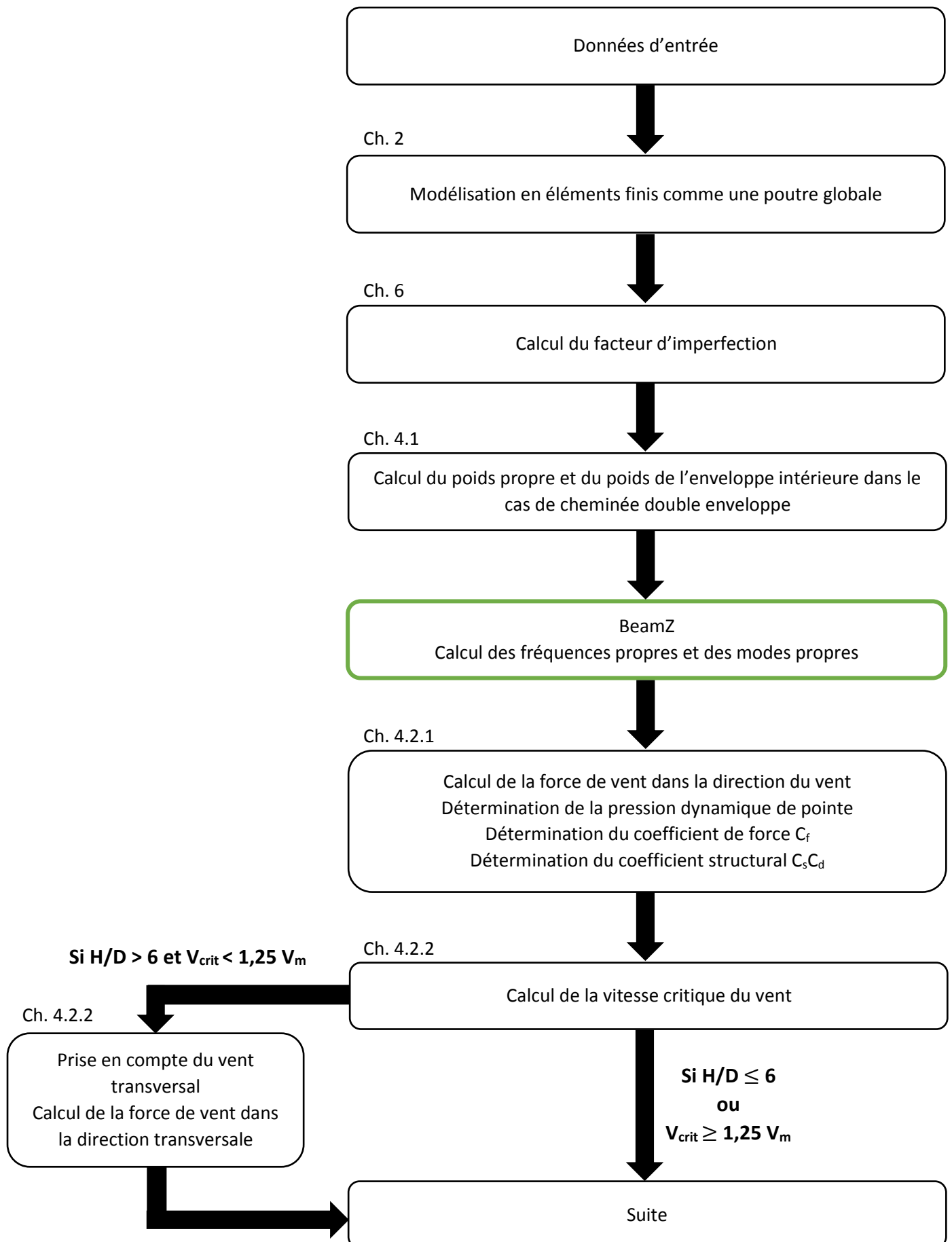
Le logiciel développé par Monsieur Denoël est en réalité appelé deux fois, les deux premières parties n'étant pas strictement séparées. Il est utilisé une première fois après l'encodage des données pour calculer les fréquences et modes propres de la structure, puis une seconde fois, après le calcul des

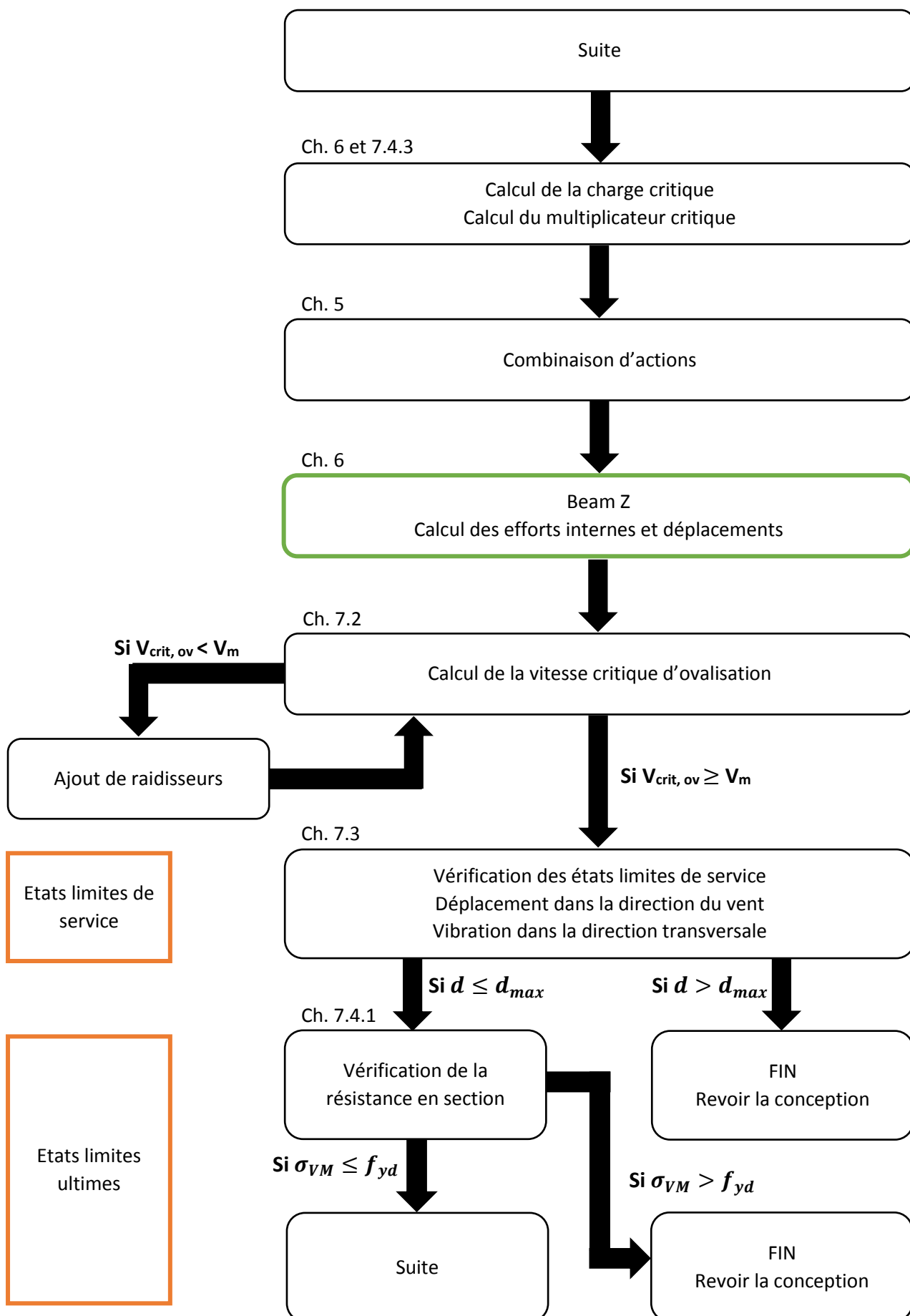
actions, pour déterminer les efforts et déplacements. En effet, les fréquences et modes propres sont nécessaires au calcul des charges de vent.

La troisième partie du code effectue toutes les vérifications nécessaires. Tout d'abord, la vérification d'ovalisation de la coque due à l'une des composantes dynamiques du vent est réalisée. Ensuite, les états limites de service à vérifier concernent les déplacements en tête de structure. Enfin, les différents états limites ultimes sont vérifiés, à savoir la résistance en section, le voilement des parois, la fatigue des détails due à la composante dynamique du vent dans la direction transversale à la direction du vent, et le flambement global élastique de la cheminée.

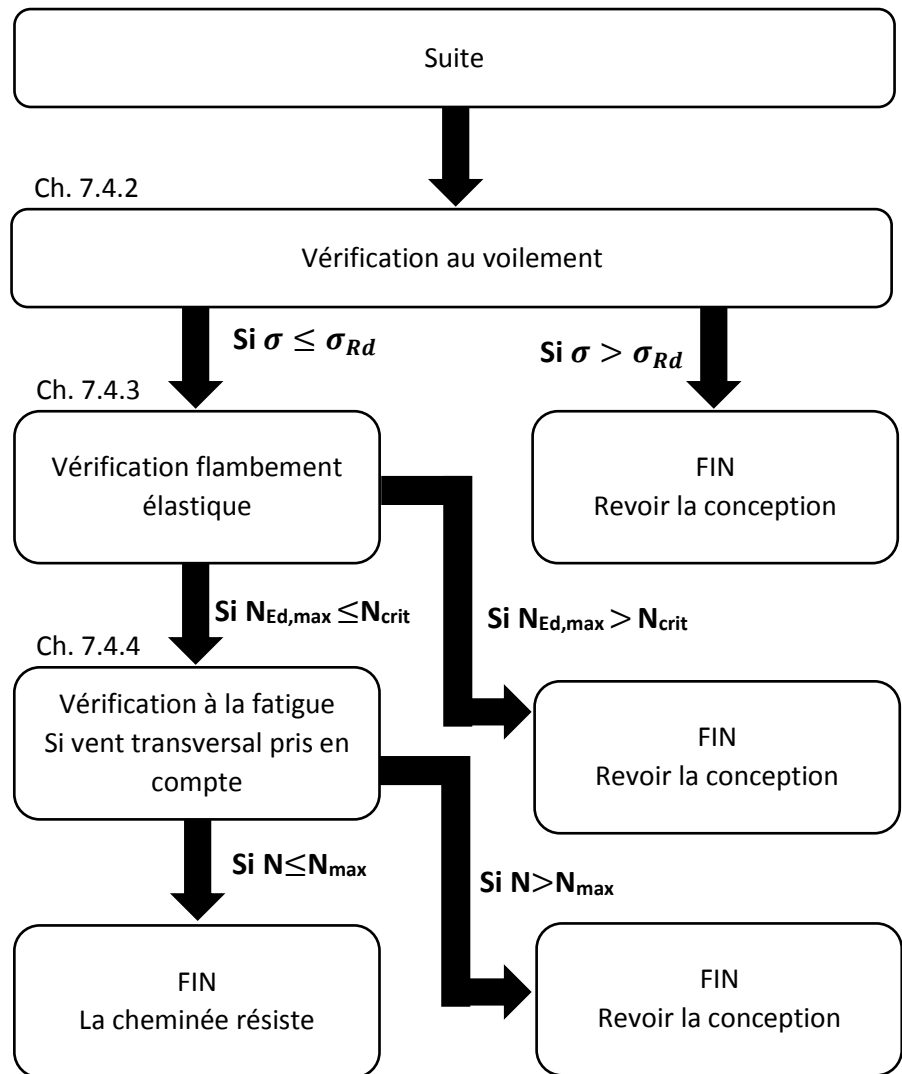
Une fois le code développé, il est utilisé pour vérifier une cheminée existante, dont les caractéristiques ont été légèrement modifiées par rapport à la structure réellement construite. Cette application permettra de vérifier la validité du logiciel développé en analysant les ordres de grandeur des résultats obtenus.

Finalement, des études paramétriques étudiant l'influence du diamètre et de l'épaisseur sur les résultats seront réalisées. Leurs conclusions permettront à l'ingénieur en charge du dimensionnement des futures cheminées d'orienter le choix de ces paramètres pour optimiser l'efficacité de la structure. Ces études seront également utilisées pour analyser la validité d'une formule approchée, fournie dans la norme, permettant de calculer la fréquence propre des cheminées.





Etats limites ultimes



2. Modélisation

Pour étudier la structure et la vérifier sous les actions qui la sollicitent, il est nécessaire de créer un modèle simplifié de celle-ci. Il doit être le plus proche possible de la réalité. Pour cela, des éléments finis sont utilisés, dont la taille sera choisie par l'utilisateur, en fonction du raffinement désiré.

Chaque élément est défini séparément dans la partie du code établissant les données. Ils sont caractérisés par leur hauteur, leur diamètre, leur épaisseur, la température moyenne sur l'épaisseur à mi-hauteur de l'élément, la limite d'élasticité et le module de Young correspondant à cette température. Le nombre d'éléments est choisi par l'utilisateur, mais il est évident que plus il y en a, plus le modèle est précis. Il faudra tout de même veiller à ce que les extrémités des différents segments de construction correspondent à celles d'éléments modélisés pour permettre les changements d'épaisseur.

Le modèle ainsi créé est soumis à certaines hypothèses et simplifications, qui sont détaillées ci-dessous.

La structure est représentée comme une poutre encastree libre. En effet, les assemblages réalisés à l'aide de brides boulonnées sont considérés rigides et la fondation est assimilée à un encastrement.

Ensuite, le calcul de la température en chaque point de la structure est également simplifié. Entre les températures extrêmes, au niveau de l'entrée des fumées et au sommet de la cheminée, qui seront données par l'utilisateur du logiciel, la variation est supposée linéaire. La température est considérée constante sur l'épaisseur et la hauteur d'un même élément, et égale à la valeur moyenne sur l'épaisseur à mi-hauteur de cet élément.

Le poids propre n'est pas non plus évalué de manière exacte. Etant donné que la position, le nombre et le poids des accessoires peuvent varier d'une cheminée à l'autre, il a été décidé de répartir le poids de manière uniforme sur un même élément. Cela est fait à l'aide de facteurs multipliant le poids de l'enveloppe structurelle. Ce dernier est calculé à partir des caractéristiques géométriques et mécaniques définissant chaque élément, tandis que les facteurs seront entrés par l'utilisateur. Il y a un facteur par élément fini, de manière à pouvoir prendre en compte des surpoids de certains éléments par rapport à d'autres, dus à la présence d'accessoires ou de passerelles. Cependant, dans les cheminées de type double enveloppe, le poids de l'enveloppe intérieure n'est pas réparti sur des éléments mais pris en compte comme une charge ponctuelle. Celle-ci est appliquée au nœud correspondant au niveau du grillage de poutres sur lequel s'appuie l'enveloppe intérieure.

Concernant le calcul des effets du vent, deux simplifications ont été appliquées. Tout d'abord, la présence des bâtiments proches de la cheminée est négligée. Le vent agit donc de manière symétrique par rapport à l'axe de la structure. Ensuite, l'effet des passerelles et accessoires externes, pouvant modifier la prise au vent, est également négligé. La cheminée est ainsi considérée comme un cylindre complètement lisse.

La théorie des poutres est utilisée pour l'analyse de la structure. Cela est permis par la norme sous certaines conditions, présentées au point 6. Ces conditions doivent être vérifiées pour pouvoir utiliser le logiciel.

3. Evaluation des propriétés mécaniques des matériaux

Une fois le modèle géométriquement défini, il faut attribuer aux éléments un matériau et les propriétés mécaniques correspondantes. Seuls deux matériaux sont utilisés : l'acier inoxydable de type AISI 304 et l'acier S235. Cependant, les propriétés mécaniques ne varient pas uniquement en fonction du matériau mais aussi avec la température. L'influence de celle-ci, ainsi que la pertinence de considérer ses effets seront analysées dans la suite. Le gradient restant faible, il est possible que les effets de la température sur les propriétés mécaniques soient négligeables. Les propriétés dont il est question dans ce chapitre sont la masse volumique, la limite d'élasticité, et le module de Young.

Dans les cheminées simple enveloppe, la partie en contact avec les fumées, c'est-à-dire à partir de la connexion entre la cheminée et le bâtiment abritant le ventilateur, est réalisée en acier inoxydable de type AISI 304, tandis que la partie inférieure est faite en acier S235. Pour les cheminées de type double enveloppe, l'acier inoxydable de type AISI 304 est utilisé pour l'enveloppe intérieure, tandis que l'acier S235 est utilisé pour l'enveloppe extérieure. Seul l'acier inoxydable est donc soumis à l'effet de la température, et cela pour les deux catégories de cheminées. La masse volumique de l'acier inoxydable est donnée dans le document Material Data Sheet fournis par la société Drever International S.A. et vaut 7920 kg/m^3 (21/02/2018). Celle de l'acier S235 est prise égale à la valeur usuelle de 7850 kg/m^3 .

Habituellement, la température moyenne sur l'épaisseur au niveau de l'arrivée des fumées est d'environ 300°C , tandis que celle au niveau d'évacuation des fumées, c'est-à-dire en haut de la cheminée, est d'environ 80°C . Pour les cheminées de type double enveloppe, seule l'enveloppe intérieure est soumise à température, l'enveloppe extérieure étant considérée à température ambiante. Pour les cheminées de type simple enveloppe, c'est la partie inférieure, sous le niveau de l'arrivée des fumées, qui est supposée rester à température ambiante tandis que le haut est soumis à la température des fumées. La nécessité de prendre en compte l'effet de la température sur les propriétés mécaniques sera analysée en comparant les résultats obtenus en tenant compte des modifications de propriétés dues à l'élévation de température, et ceux obtenus en considérant les propriétés mécaniques de l'acier à 20°C .

La limite d'élasticité et le module de Young à 20°C , ainsi que leur évolution avec la température, sont fournis dans plusieurs documents de référence. Les valeurs diffèrent suivant la source considérée. Celles provenant de trois documents de référence ont donc été analysées et comparées. Ces documents sont : Material data sheet (21/02/2018), la norme Eurocode EN13084-7 (Institut allemand de normalisation, 2013), et la norme américaine ASME (The american society of mechanical engineers, 2011).

Puisqu'il a été décidé que ce travail suive les recommandations de l'Eurocode, c'est ce document qui sera utilisé pour les valeurs de propriétés. Cependant, il semble intéressant d'étudier les différences présentes dans la littérature. La Figure 2 représente l'évolution de la limite d'élasticité rapportée à sa valeur à 20°C en fonction de la température, pour les trois documents précédemment cités et la Figure 3 représente l'évolution du module de Young rapporté à sa valeur à 20°C . Des différences sont clairement visibles, mais restent limitées. Il est impossible de connaître de manière exacte la limite d'élasticité et le module de Young d'un matériau de manière générale, ils dépendent de sa fabrication, et des différences dans les valeurs caractéristiques sont donc normales. De plus, la norme européenne ne présente pas un nombre précis pour le module de Young, mais un intervalle. Il a été décidé de prendre la moyenne des extrêmes de l'intervalle. En choisissant les propriétés provenant de la norme européenne, la cohérence est assurée puisque tout le travail se basera sur ces normes. La Figure 4 représente l'évolution du facteur de masse volumique, défini comme le rapport de la masse volumique

à la température T sur sa valeur à 20°C, en fonction de la température. Les valeurs ont été calculées à partir des coefficients de dilatation thermique donnés par la norme européenne. Etant donné la très faible diminution de masse volumique lorsque la température augmente, il a été décidé de ne pas prendre en compte cette variation. La masse volumique restera donc constante dans les calculs.

Dans les documents de référence, seules des valeurs ponctuelles sont données. Pour insérer l'évolution des propriétés avec la température dans le code de calcul, il est nécessaire de déterminer des lois les caractérisant. Concernant le module de Young, il semble clair qu'une loi linéaire interpole précisément les données ponctuelles. Pour la limite d'élasticité, la loi d'interpolation est moins évidente mais il apparaît qu'une loi du second degré est satisfaisante.

Le Tableau 3 présente, dans la deuxième colonne, la limite d'élasticité rapportée à sa valeur à 20°C, donnée par l'Eurocode, ainsi que, dans la troisième colonne, les valeurs calculées à l'aide de la loi de second degré choisie. La quatrième colonne présente l'erreur relative effectuée en utilisant cette loi. Nous pouvons voir que l'erreur maximum est de seulement 3,28%, et cela est jugé acceptable. Si une loi linéaire est utilisée en gardant la propriété à 20°C exacte, l'erreur relative maximum aux points évalués est d'environ 14,46%, c'est pourquoi il a été nécessaire de raffiner la loi. Le Tableau 4 représente les mêmes informations, mais cette fois pour le module de Young. La loi utilisée est ici linéaire. L'erreur relative maximale de tous les points donnés dans l'Eurocode appartenant à la gamme de température rencontrée, est seulement de 1,27%. L'équation (1) définit les facteurs présents dans le Tableau 3 et le Tableau 4. Les équations (2) et (3) définissent les lois utilisées pour les évolutions en fonction de la température de la limite d'élasticité et du module de Young respectivement, tous deux rapportés à leur valeur à 20°C.

$$k_{f_y}(T) = \frac{f_y(T)}{f_y(T = 20^\circ)}; k_E(T) = \frac{E(T)}{E(T = 20^\circ)} \quad (1)$$

$$k_{f_y}(T) = 2,85 * 10^{-6} * T^2 - 2,47 * 10^{-3} * T + 1,05 \quad (2)$$

$$k_E(T) = 1 + \frac{0,83 - 1}{500 - 20} * (T - 20) \quad (3)$$

Les facteurs $k_{f_y}(T)$ et $k_E(T)$ définis à l'équation (1) ont été utilisés à la place des valeurs réelles de la limite d'élasticité et du module de Young dans le but de pouvoir réutiliser les lois d'évolution des propriétés avec la température pour d'autres aciers qu'uniquement l'acier inoxydable AISI 304. Cependant, cela n'est finalement pas possible car l'évolution des facteurs $k_{f_y}(T)$ est spécifique à chaque type d'acier. La Figure 5 montre l'évolution de ce facteur avec la température pour trois aciers différents, dont l'acier AISI 304 (X5CrNi18-10). A 300°C, cette figure montre presque 20% de différence entre les valeurs des deux aciers extrêmes. Le code de calcul développé dans ce travail ne sera donc valable que lorsque l'acier exposé à la fumée est de type AISI 304. Cela ne cause normalement aucun problème car c'est toujours cet acier qui est utilisé par la société Drever International S.A..

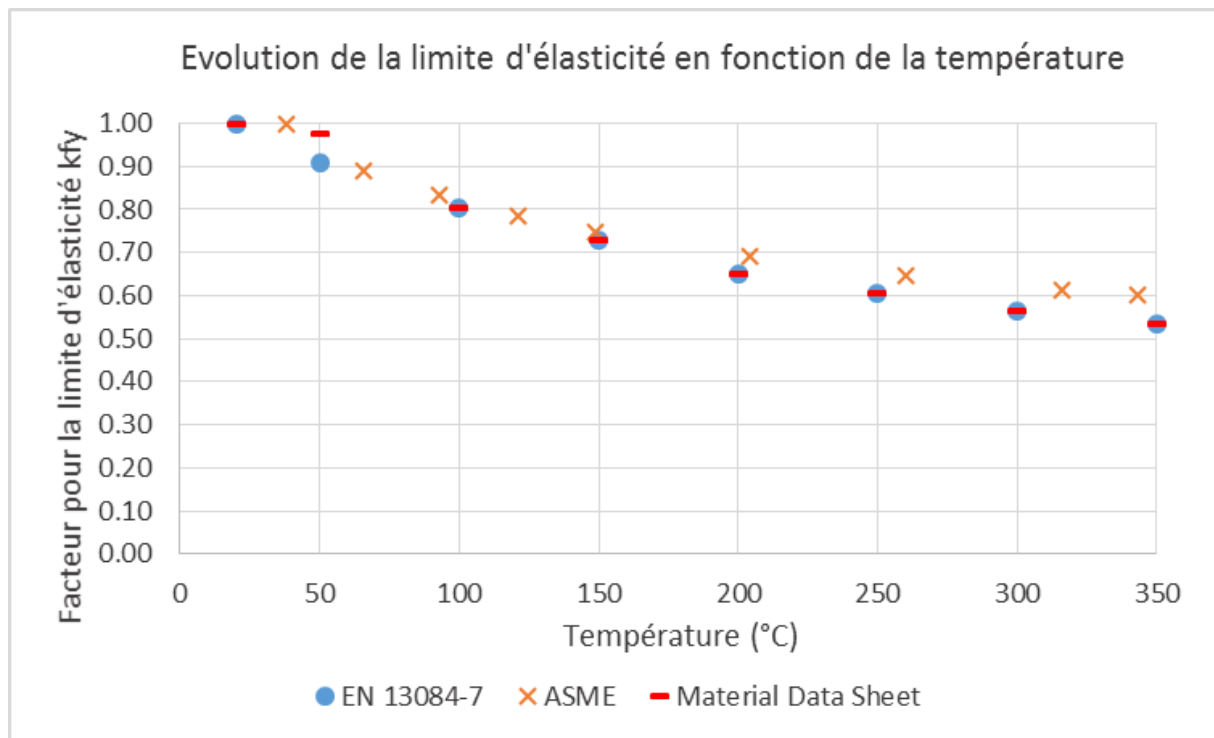


Figure 2 : Evolution du facteur k_{fy} en fonction de la température provenant de trois sources différentes

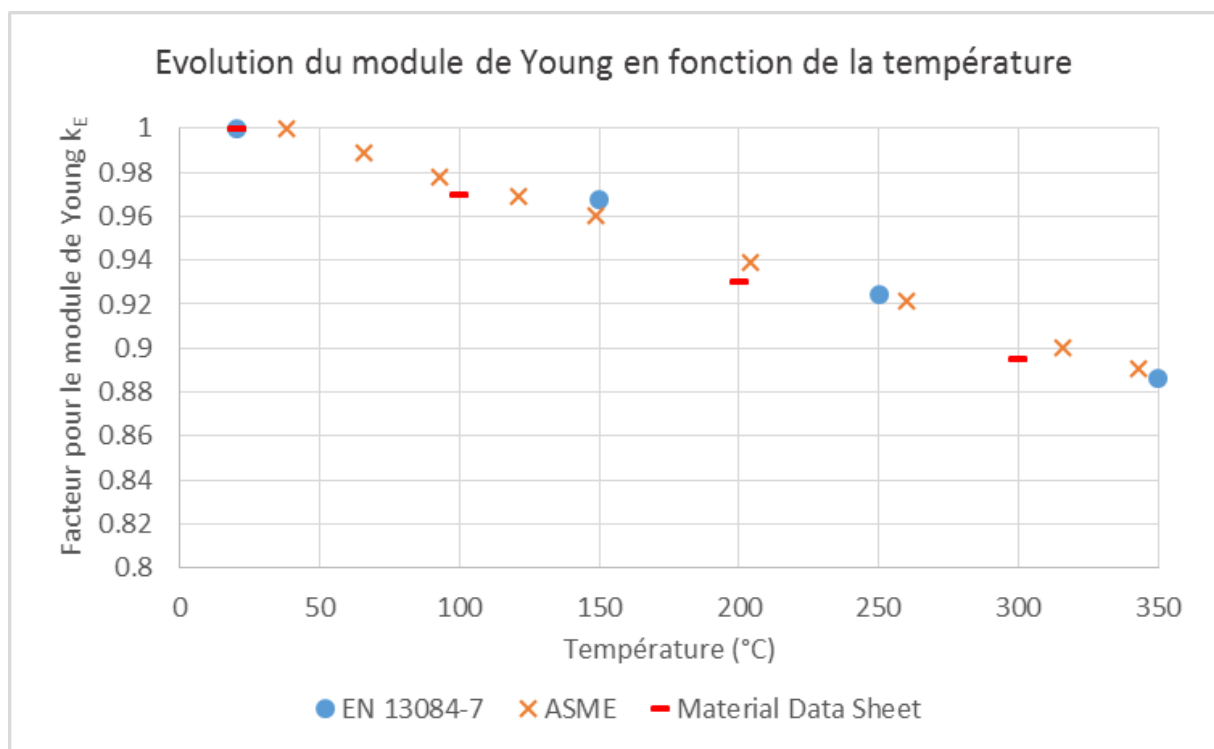


Figure 3 : Evolution du facteur k_E en fonction de la température provenant de trois sources différentes

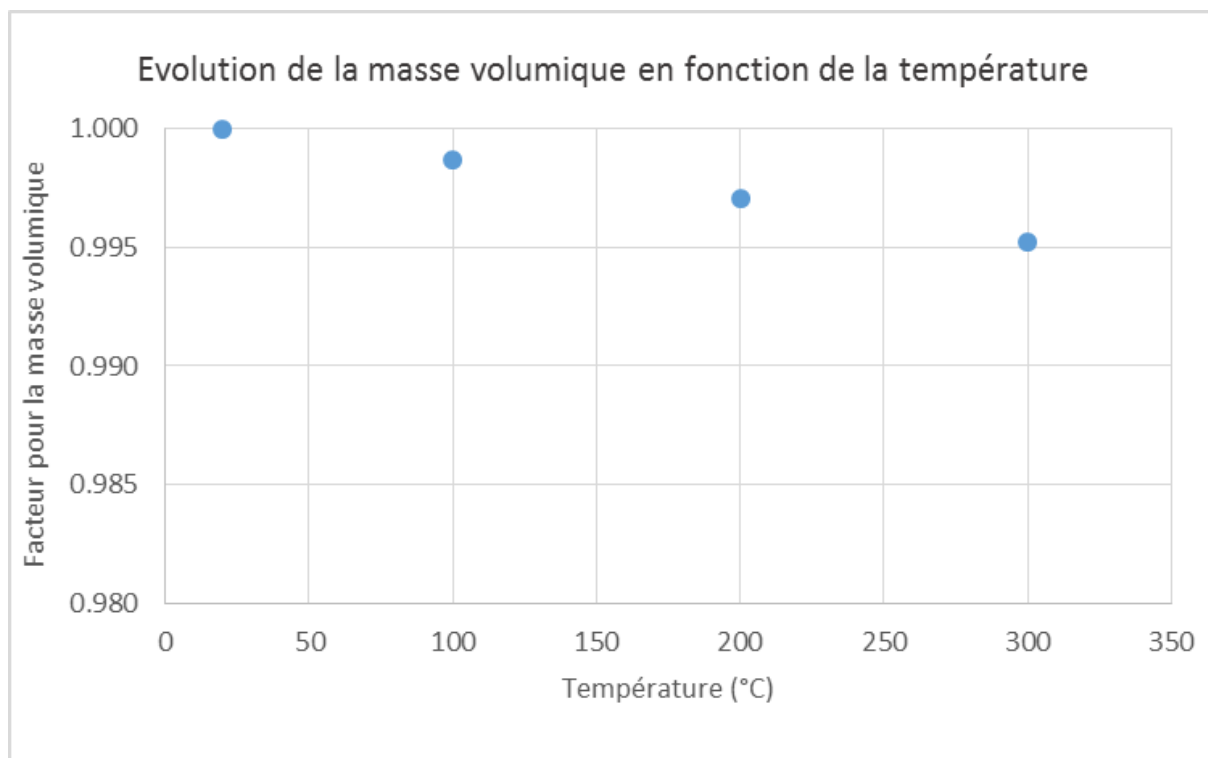


Figure 4 : Evolution du facteur k_ρ en fonction de la température

T (°C)	k_y vrai	k_y approx	Erreur (%)
20	1.00	1.00	0.17
50	0.91	0.93	2.86
100	0.81	0.83	3.28
150	0.73	0.74	2.12
200	0.65	0.67	2.87
250	0.61	0.61	0.91
300	0.56	0.57	0.25
350	0.53	0.53	0.24

Tableau 3 : Evolution de la limite d'élasticité avec la température

T (°C)	k_E vrai	k_E approx	Erreur (%)
20	1	1.00	0.00
150	0.97	0.96	1.27
250	0.92	0.92	0.37
350	0.89	0.89	0.00

Tableau 4 : Evolution du module de Young avec la température

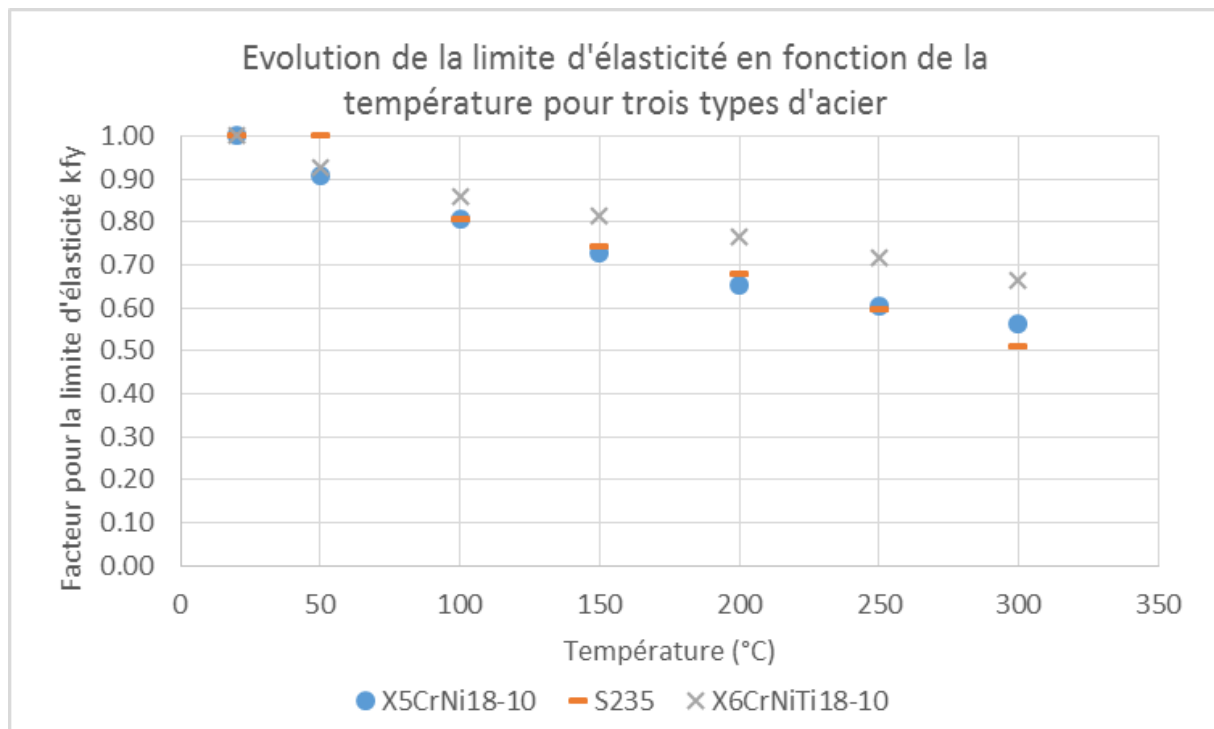


Figure 5 : Evolution du facteur k_{fy} avec la température pour trois aciers différents

4. Calcul des actions

4.1. Poids propre

La première charge agissant sur la structure est bien évidemment son poids propre. Celui-ci prend en compte les deux types d'acier utilisés pour la cheminée. Comme expliqué ci-dessus, les masses volumiques sont supposées indépendantes de la température et valent, pour l'acier S235 et pour l'acier inoxydable AISI 304 respectivement, 7850 kg/m³ et 7920 kg/m³ (21/02/2018).

Le poids des enveloppes se calcule facilement puisque leurs géométries et leurs matériaux sont connus. Cependant, il n'est pas possible de généraliser l'estimation du poids des accessoires de la cheminée tel que les passerelles et les échelles, car ils dépendent de la situation, des besoins spécifiques et des envies du client. Aussi, il a été décidé de prendre en compte leur poids par le biais d'un facteur supérieur ou égal à l'unité, multipliant le poids de l'enveloppe. Il est appliqué à chaque élément de modélisation et peut varier d'un élément à l'autre pour prendre en compte la position des différents accessoires.

Ce facteur amplificateur, défini à l'équation (4), est déterminé par le rapport du poids total d'un tronçon fictif de la cheminée par le poids du cintre porteur seul.

$$\xi_i = \frac{\text{Poids total de l'élément } i}{\text{Poids de l'enveloppe structurelle de l'élément } i} \quad (4)$$

Dans le cas des cheminées de type double enveloppe, le cintre intérieur est modélisé par une force ponctuelle appliquée à la hauteur correspondant au grillage de poutres sur lequel l'enveloppe est appuyée.

4.2. Charges de vent

L'action suivante à considérer est le vent. Il a différents effets, qui seront analysés en détail dans la suite. Il y a tout d'abord un effet statique, dû à la pression qu'il impose à la structure. Ensuite, plusieurs effets dynamiques doivent être pris en compte : l'effet dû aux tourbillons dans le sens du vent ; l'effet dû aux tourbillons de Von Karman dans le sens perpendiculaire à la direction du vent ; et l'ovalisation de l'enveloppe circulaire.

L'action du vent est traitée dans l'Eurocode 1, partie 1-4 (Comité européen de normalisation, 2005), via le calcul de forces équivalentes. La méthode de calcul présentée et discutée dans ce chapitre provient de ce document de référence. L'effet statique et l'effet dynamique dans la direction du vent sont regroupés au travers d'une même force, l'effet dynamique étant pris en compte par un coefficient adéquat. Les deux autres composantes de l'action du vent sont évaluées séparément. L'ovalisation de l'enveloppe circulaire est toutefois traitée comme une vérification et non comme une action.

L'effet dynamique du vent entraîne la prise en compte des fréquences et modes propres de la structure. Dans le cas d'une cheminée autoportante, le premier mode est prépondérant, c'est pourquoi les suivants ne seront pas considérés dans la réponse de la structure au vent. En effet, les modes associés à une fréquence plus haute participent en général moins à la réponse de la structure. De plus, l'importance de la participation d'un mode est fonction de la répartition des masses. Les quatre premiers modes d'une structure encastree libre sont présentés à la Figure 6. Dans le premier mode, toute la masse part dans la même direction, tandis que dans les trois modes suivants, elle se

répartit des deux côtés de la position initiale. La prise en compte d'un nombre plus important de modes aura donc tendance à atténuer le résultat puisque des déplacements dans une direction seront additionnés à d'autres dans la direction opposée. (Plumier)

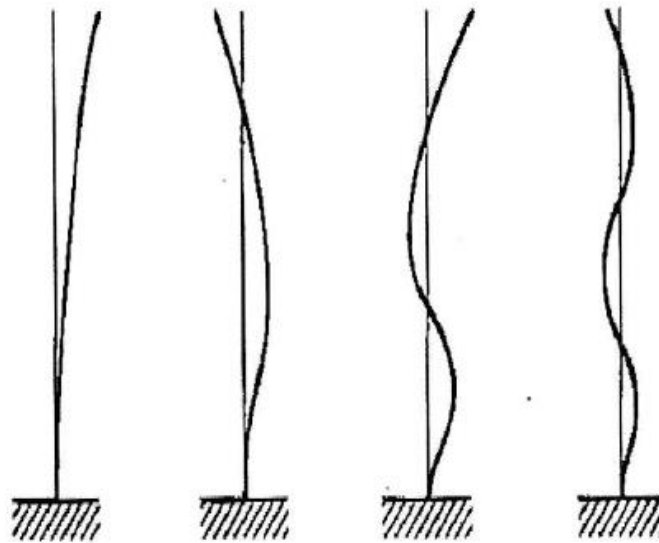


Figure 6 : Quatre premiers modes propres d'une structure encastree libre (Reid)

4.2.1. Composante statique et composante dynamique dans la direction du vent

La force exercée par le vent reprenant la composante statique et la composante dynamique dans la direction du vent est calculée à partir de l'équation (5).

$$F_{w1} = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (5)$$

Dans cette équation, $c_s c_d$ est le coefficient structural, c_f le coefficient de force applicable à la construction, $q_p(z_e)$ la pression dynamique de pointe à la hauteur de référence z_e , et A_{ref} l'aire de référence de la construction. La hauteur de référence est prise égale au niveau supérieur de l'élément considéré.

La force obtenue est une force concentrée. Elle sera calculée séparément pour chaque élément fini du modèle représentant la cheminée. C'est l'une des raisons pour lesquelles des éléments finis plus petits fournissent une meilleure représentation de la réalité. En effet, le vent n'applique normalement pas une multitude de forces concentrées mais bien une force répartie sur toute la hauteur de la cheminée.

Le calcul de la pression dynamique de pointe est détaillé à l'annexe 1. Il suit la méthode habituelle utilisée pour tout calcul de charge de vent et n'amène aucune spécificité ni difficulté.

Le coefficient de force c_f applicable à un cylindre à base circulaire de longueur finie se calcule à partir de l'équation (6).

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda \quad (6)$$

Où $c_{f,0}$ est le coefficient de force des cylindres sans écoulement de contournement aux extrémités et ψ_λ est le facteur d'effet d'extrémités.

Le coefficient de force des cylindres sans écoulement de contournement aux extrémités est donné dans la norme en fonction du nombre de Reynolds et d'un facteur de rugosité équivalente.

Le nombre de Reynolds se calcule à partir des équations (7) et (8).

$$Re = \frac{D * v(z_e)}{\nu} \quad (7)$$

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 * q_p(z_e)}{\rho_{air}}} \quad (8)$$

Dans les équations ci-dessus, D représente le diamètre, ν est la viscosité cinématique de l'air valant $15 * 10^{-6} m^2/s$, $v(z_e)$ la vitesse de pointe du vent à la hauteur de référence z_e , et ρ_{air} la masse volumique de l'air valant $1,25 kg/m^3$.

Le facteur de rugosité équivalente est défini comme le rapport de la rugosité de surface équivalente k sur le diamètre de la cheminée D . La rugosité de surface équivalente est donnée en fonction du type de surface. Pour l'acier, elle vaut 0,05 mm. Le diamètre limite correspondant à une rugosité équivalente de 10^{-4} est déterminé à l'équation (9) et vaut 0,5 mètre. Un diamètre si petit ne sera jamais utilisé pour les cheminées de la société Drever International S.A., c'est pourquoi le coefficient de force des cylindres sans écoulement de contournement aux extrémités est calculé en utilisant les formules correspondant à la courbe de la plus petite rugosité équivalente.

$$\frac{k}{D} < 10^{-4} \Rightarrow D > \frac{k}{10^{-4}} = \frac{0.05}{10^{-4}} = 500 mm \quad (9)$$

Pour calculer le facteur d'extrémités ψ_λ , l'élancement effectif λ doit être déterminé. Le tableau 7-16 de l'Eurocode 1 partie 1-4, rapporté à la Figure 7, présente les valeurs recommandées pour l'élancement. Les cheminées correspondent à des cylindres à base circulaire, et donc au cas numéro deux. Cependant, la ligne correspondante ne donne d'informations que lorsque la hauteur de la construction est inférieure à 15 mètres ou supérieure ou égale à 50 mètres. Après analyse du tableau afin de trouver une solution pour les valeurs intermédiaires, il apparaît que seule la ligne quatre donne des valeurs d'élancement quelle que soit la longueur. La ligne une fournit l'élancement pour les mêmes gammes de longueur que la ligne deux, mais pour les sections polygonales, et la ligne trois donne uniquement une indication pour les valeurs intermédiaires. Il semble donc que l'élancement de la ligne trois se rapporte aux lignes une et deux, mais le dessin correspondant est complètement différent.

Finalement, la solution a été trouvée dans la version anglaise de la partie 1-4 de l'Eurocode 1 qui présente ce tableau mais en ayant supprimé les lignes de la dernière colonne séparant les trois premiers cas. Cela semble d'ailleurs se confirmer dans la version « brouillon » de la nouvelle partie 1-4 de l'Eurocode (Comité européen de normalisation, 2018).

Toutefois, pour chercher une solution à ce problème, l'annexe nationale belge associée à la partie 1-4 de l'Eurocode 1 a également été analysée. Cette annexe remplace le tableau discuté ci-dessus par un autre, dans lequel les valeurs de l'élancement ont été modifiées. Cela est étonnant car les valeurs sont en opposition avec ce qui est présenté dans le tableau initial. En effet, l'élancement est toujours exprimé par rapport au quotient de la longueur de la construction sur sa largeur, mais les coefficients multipliant ce rapport ont changé. Pour les sections polygonales, le coefficient vaut 1 à la place de varier entre 1,4 et 2, et pour les cylindres à base circulaire, il vaut 2 au lieu de varier entre 0,7 et 1.

Etant donné que le logiciel est créé dans le but d'être utilisé pour les constructions de manière internationale, l'annexe nationale belge n'est pas prise en compte. Ce sont donc les valeurs de l'Eurocode général qui sont prises pour le calcul de l'élancement, bien qu'une incohérence semble apparaître avec l'annexe nationale belge.

Les règles suivantes ont donc finalement été utilisées, correspondant aux cylindres à base circulaire :

- Pour $H \geq 50m \Rightarrow \lambda = \min(0,7 * H/D ; 70)$;
- Pour $H < 15m \Rightarrow \lambda = \min(H/D ; 70)$;
- Pour les valeurs intermédiaires de H , il convient d'utiliser l'interpolation linéaire.

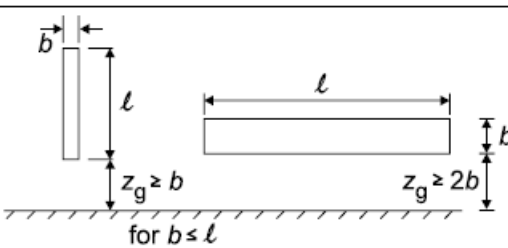
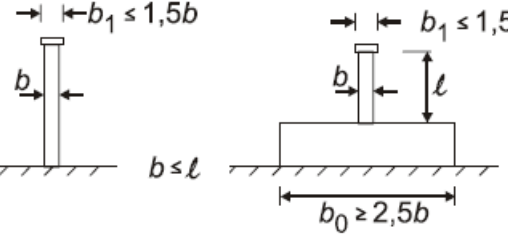
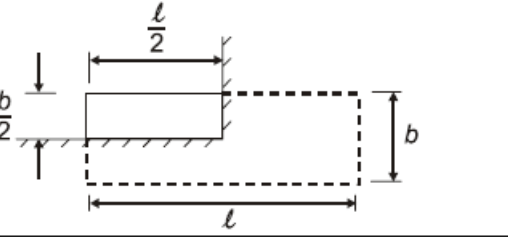
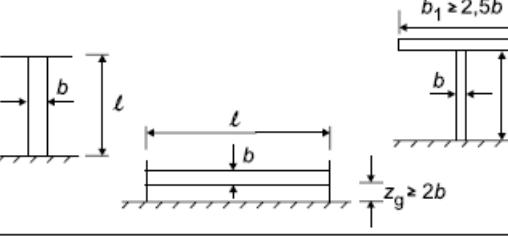
N°	Position de la structure, vent perpendiculaire au plan de l'élément	Élancement effectif λ
1		Pour les sections polygonales, rectangulaires et à arêtes vives et pour les structures en treillis : - pour $\ell \geq 50$ m, la plus petite des deux valeurs : $\lambda = 1,4 \ell/b$ ou $\lambda = 70$; - pour $\ell < 15$ m, la plus petite des deux valeurs : $\lambda = 2 \ell/b$ ou $\lambda = 70$.
2		Pour les cylindres à base circulaire : - pour $\ell \geq 50$ m, la plus petite des deux valeurs : $\lambda = 0,7 \ell/b$ ou $\lambda = 70$; - pour $\ell < 15$ m, la plus petite des deux valeurs : $\lambda = \ell/b$ ou $\lambda = 70$.
3		Pour les valeurs intermédiaires de ℓ, il convient d'utiliser l'interpolation linéaire.
4		Pour $\ell \geq 50$ m, la plus grande des deux valeurs : $\lambda = 0,7 \ell/b$ ou $\lambda = 70$, Pour $\ell < 15$ m, la plus grande des deux valeurs : $\lambda = \ell/b$ ou $\lambda = 70$. Pour les valeurs intermédiaires de ℓ, il convient d'utiliser l'interpolation linéaire.

Figure 7 : Calcul de l'élancement λ (Comité européen de normalisation, 2005)

La figure 7.36 de l'Eurocode 1 partie 1-4 donne ensuite la valeur du facteur d'extrémité en fonction de l'élancement et du taux de remplissage ϕ . Ce dernier est fonction des ouvertures dans la structure.

Cette figure, représentée à la Figure 8 ci-dessous, ne permet cependant pas de généraliser la détermination du facteur d'extrémité en fonction des deux paramètres via une équation unique. En effet, elle présente plusieurs courbes correspondant à des valeurs ponctuelles du taux de remplissage, et aucune formule liant les trois paramètres n'est donnée. L'objectif du programme créé étant, entre autre, d'automatiser le calcul, il est préférable de ne pas demander à l'utilisateur d'aller lui-même chercher la valeur du facteur d'extrémité dans la norme en fonction du cas étudié.

Chaque courbe de la Figure 8 liant le facteur d'extrémité à l'élancement, pour un taux de remplissage donné, est multi-linéaire lorsque l'axe des abscisses est à l'échelle logarithmique. Ces propriétés ont été exploitées pour générer une équation à insérer dans le programme. Cela est fait sous l'hypothèse d'un taux de remplissage unitaire, car il n'y a aucune ouverture prévue dans les cheminées de la société Drever International S.A.. Cette équation se présente sous la forme présentée à l'équation (10), c_1 et c_2 étant différents pour chaque partie linéaire de la courbe.

$$\psi_\lambda = \frac{1}{c_1} * \log(c_2 * \lambda) \quad (10)$$

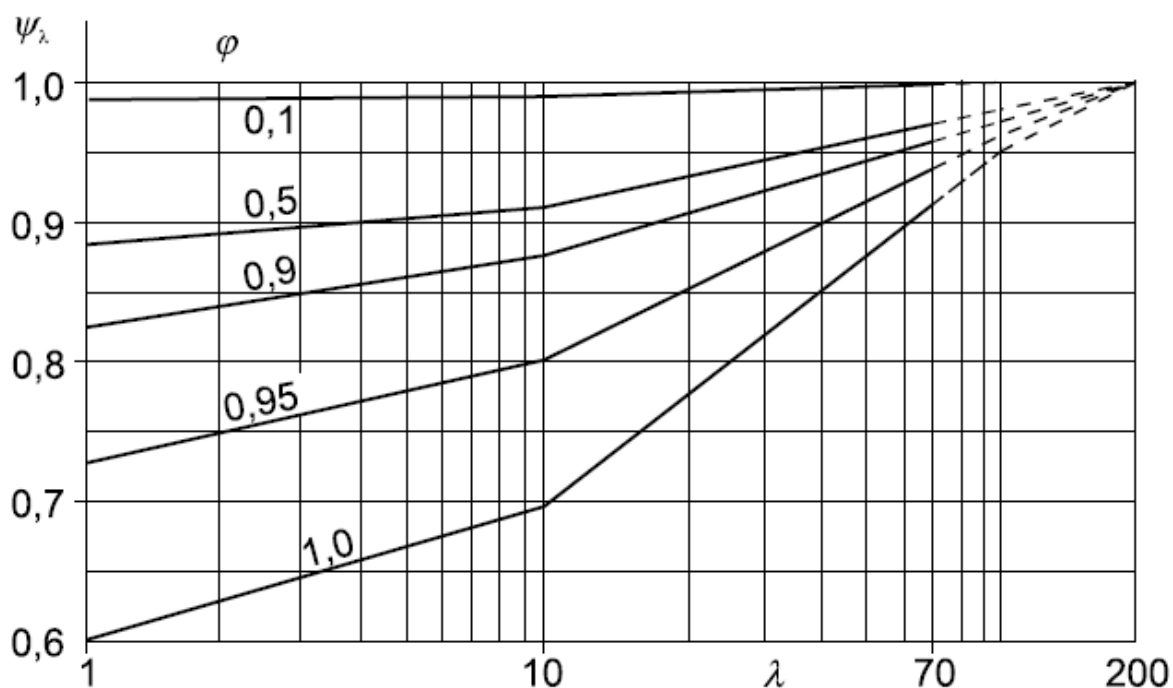


Figure 8 : Facteur d'extrémité ψ_λ en fonction de l'élancement λ et du taux de remplissage ϕ (Comité européen de normalisation, 2005)

Le coefficient structural $c_s c_d$ est en fait composé de deux facteurs indépendants exprimant des phénomènes bien distincts. Le coefficient c_s est appelé coefficient de dimension. Il prend en compte le fait que la pression de pointe n'a pas lieu au même moment en tout point de la surface de la structure. C'est donc un coefficient de réduction, inférieur à 1. Au contraire, le coefficient c_d tient compte de l'effet dynamique du vent. Il va alors majorer la force équivalente pour tenir compte de l'effet défavorable des vibrations engendrées par la turbulence en résonance avec la structure. Il a une

valeur supérieure à l'unité. En général, la combinaison de ces deux coefficients, l'un majorateur l'autre réducteur, résulte en un coefficient structural proche de l'unité.

Pour cette raison, dans le cas des cheminées à sections transversales circulaires dont la hauteur est inférieure à 60 mètres et inférieure à 6,5 fois le diamètre, la norme européenne conseille de prendre la valeur de $c_s c_d$ égale à 1. Dans le cas présent, la hauteur des cheminées est parfois inférieure à 60 mètres mais jamais inférieure à 6,5 fois le diamètre. En effet, pour un diamètre de 3,7 mètres (correspondant au deuxième cas d'étude), cela fait une hauteur maximale de 24 mètres, ce qui est largement inférieur aux hauteurs habituelles. Ces paramètres doivent donc être calculés précisément.

L'Eurocode 1 partie 1-4 (Comité européen de normalisation, 2005) donne deux méthodes pour les calculer, c'est la première qui sera utilisée dans ce travail. Les conditions suivantes doivent toutefois être satisfaites pour pouvoir l'utiliser :

- La construction correspond à l'une des trois formes générales représentées à la figure 6.1 de l'Eurocode 1 partie 1-4. C'est-à-dire que la construction doit être verticale, horizontale, ou ponctuelle. Les cheminées étant des constructions verticales, cette condition est automatiquement satisfaite.
- Seules les vibrations dans la direction du vent selon le mode fondamental sont significatives, et la déformée de ce mode a un signe constant. En général, cette condition est également satisfaite puisque le premier mode des cheminées est de signe constant. L'importance des vibrations dans les différentes directions sera vérifiée ultérieurement.

Sous réserves de ces conditions, les formules (11) et (12) peuvent être utilisées pour calculer respectivement le coefficient de dimension et le coefficient dynamique.

$$c_s = \frac{1 + 7 * I_v(z_s) * \sqrt{B^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (11)$$

$$c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s) * \sqrt{B^2}} \quad (12)$$

Une alternative à ces formules réside dans l'annexe D de l'Eurocode 1 partie 1-4, dans laquelle les résultats de ces formules sont représentés graphiquement en fonction de la hauteur et du diamètre. Cependant, ces graphiques ne couvrent pas la gamme de cheminées de la société Drever International S.A., et ne sont valables que pour deux catégories de rugosité de terrain et pour une vitesse de référence du vent de 28 m/s. Il a donc été décidé de calculer précisément le coefficient structural plutôt que d'utiliser cette annexe.

Dans les équations (11) et (12), le paramètre k_p est appelé facteur de pointe et est défini comme le rapport de la valeur maximale de la partie fluctuante de la réponse à son écart-type. Le paramètre B^2 est le coefficient de réponse quasi-statique, il traduit l'absence de corrélation parfaite de la pression sur la surface de la construction. Le paramètre R^2 est le coefficient de réponse résonante, il exprime l'effet de la turbulence en résonance avec le mode de vibration considéré de la construction. Ces deux dernières parties de la réponse sont visibles sur le spectre de réponse des rafales de vent, Figure 9. Leurs expressions sont données aux équations (13), (14), et (15). L'altitude z_s vaut 0,6 fois la hauteur.

$$k_p = \max \left(3; \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}} \right) \quad (13)$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 * \left(\frac{D + h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_L(z_s, n_{1,x}) * R_h(\eta_h) * R_b(\eta_b) \quad (15)$$

Les paramètres intervenant dans les équations (13), (14), et (15) ci-dessus sont définis au Tableau 5.

ν [Hz]	Fréquence de franchissement ;
$T = 600s$	Durée d'intégration de la vitesse moyenne du vent ;
D [m]	Diamètre ;
h [m]	Hauteur ;
$L(z_s)$	Echelle de turbulence à la hauteur de référence z_s ;
δ	Décrément logarithmique total d'amortissement ;
S_L	Fonction de densité spectrale de la puissance adimensionnelle ;
R_h et R_b	Fonctions d'admittance aérodynamique ;

Tableau 5 : Paramètres intervenant dans les équations (13), (14), et (15)

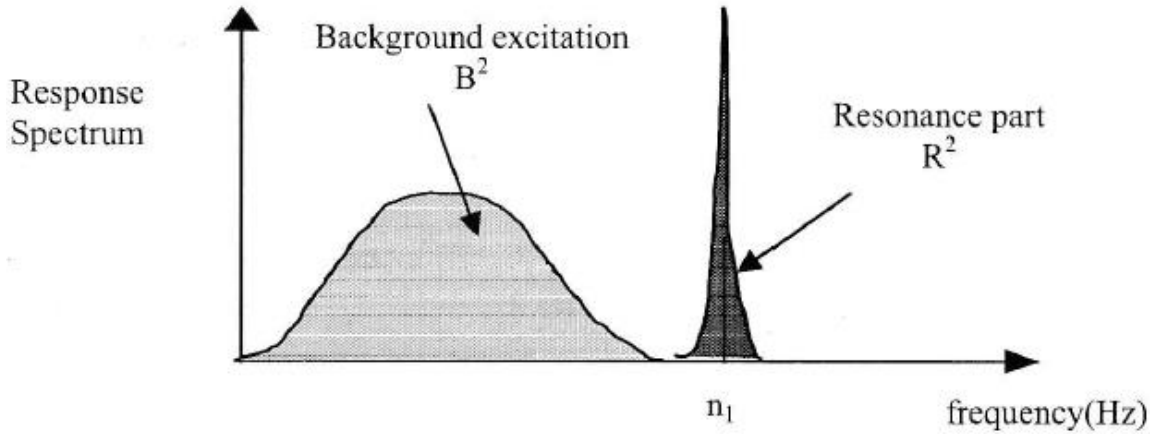


Figure 9 : Spectre de réponse (Handa, 2006)

La fréquence de franchissement ν se calcule à l'aide de l'équation (16), dans laquelle $n_{1,x}$ est la fréquence propre de la construction dans la direction du vent. Les cheminées étant symétriques par rapport à leur axe, les fréquences sont identiques dans toutes les directions.

$$\nu = n_{1,x} * \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0.08 \text{ Hz} \quad (16)$$

L'échelle de turbulence représente la dimension moyenne des rafales du vent naturel. Pour les hauteurs inférieures à 200 mètres, l'échelle de turbulence peut être calculée à l'aide de l'équation (17). Dans le cas des cheminées considérées, la hauteur sera toujours inférieure à 200 mètres.

$$L(z) = L_t * \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha \text{ pour } z \geq z_{min} \quad (17)$$

$$L(z) = L(z_{min}) \text{ sinon.}$$

Dans cette équation, z_t est une hauteur de référence valant 200 mètres, L_t une échelle de référence valant 300 mètres, et α un paramètre dépendant de la longueur de rugosité.

Le décrétement logarithmique d'amortissement δ pour le mode fondamental de flexion peut être estimé par la somme de trois composantes : l'une due à l'amortissement structural, la seconde due à l'amortissement aérodynamique du mode fondamental, et la dernière due à des dispositifs spéciaux tels que des amortisseurs externes. Ces trois composantes sont notées respectivement δ_s , δ_a et δ_d .

Des valeurs approchées de l'amortissement structural sont données dans l'Eurocode 1 partie 1-4 (Comité européen de normalisation, 2005), en fonction de la structure considérée. Pour une « cheminée en acier soudé non revêtue sans isolation thermique externe », qui est le type de construction se rapprochant le plus des cheminées considérées, l'amortissement structural vaut 0,012.

Le décrétement logarithmique d'amortissement aérodynamique δ_a pour le mode fondamental de flexion dans le sens du vent peut être estimé par l'équation (18).

$$\delta_a = \frac{c_f(z_s) * \rho_{air} * D * v_m(z_s)}{2 * n_1 * m_e} \quad (18)$$

$$m_e = \frac{\int_0^H m(s) * \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^H \Phi_1^2(s) ds} \quad (19)$$

Dans l'équation (18), c_f est le coefficient de force défini à l'équation (6), ρ_{air} est la masse volumique de l'air, v_m est la vitesse moyenne du vent à la hauteur considérée et m_e est la masse équivalente par unité de longueur du mode fondamental. Cette dernière variable est calculée à l'aide de l'équation (19) dans laquelle m représente la masse par unité de longueur, et Φ_1 la déformée modale.

La fréquence propre et le mode propre des cheminées sont calculés précisément grâce au programme BeamZ utilisant la méthode des éléments finis. L'Eurocode fournit également des formules simplifiées pour estimer ces deux paramètres. Ces formules, données aux équations (20) et (21) seront utilisées pour comparer les résultats des deux méthodes de calculs.

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \quad (20)$$

$$n_1 = \frac{\epsilon_1 * D}{h_{eff}^2} * \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz] \quad (21)$$

Pour les tours et cheminées, $\xi = 2$. La forme du premier mode propre est alors représentée à la Figure 10. Les nouveaux paramètres intervenant dans l'équation (21) sont définis au Tableau 6.

ϵ_1	Facteur de fréquence, valant 1000 pour les cheminées en acier ;
$h_{eff} = h_1 + \frac{h_2}{3} [m]$	Hauteur équivalente de la cheminée, h_1 et h_2 sont définis à la figure F.1 de l'Eurocode 1 partie 1-4 ;
W_s	Poids des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la cheminée ;
W_t	Poids total de la cheminée.

Tableau 6 : Paramètres intervenant dans l'équation (21)

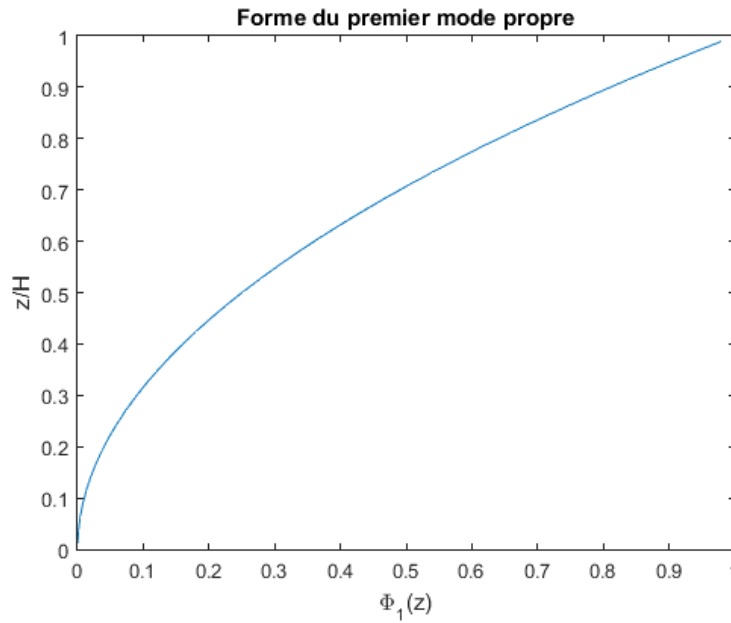


Figure 10 : Forme du premier mode propre d'une cheminée obtenue à l'aide de l'équation provenant de l'Eurocode 1 partie 1-4

Lorsque des dispositifs dissipatifs spéciaux sont ajoutés à la construction, il convient de calculer δ_d au moyen de méthodes théoriques ou expérimentales appropriées. Dans un premier temps, les cheminées sont dimensionnées sans amortisseurs, ils seront ajoutés par la suite si cela est nécessaire. Tant qu'aucun amortisseur n'est considéré, la composante du décrement logarithmique d'amortissement prenant en compte les dispositifs spéciaux est donc nulle.

La fonction de densité spectrale de puissance adimensionnelle est calculée selon l'équation (22). Elle exprime la distribution du vent en fréquence.

$$S_L(z, n) = \frac{n * S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 * f_L(z, n)}{(1 + 10,2 * f_L(z, n))^{5/3}} \quad (22)$$

$$f_L(z, n) = \frac{n * L(z)}{v_m(z)} \quad (23)$$

Dans l'expression ci-dessus, $S_v(z, n)$ est la densité spectrale à une branche (c'est-à-dire définie sur les seules fréquences positives), f_L est une fréquence adimensionnelle définie à l'équation (23) et calculée pour la fréquence $n = n_{1,x}$.

Les fonctions d'admittance aérodynamique R_h et R_b peuvent être calculées de manière approchée pour une déformée de mode fondamental en fonction des dimensions de la structure et de la fréquence adimensionnelle f_L . Les équations (24) à (27) permettent de déterminer ces fonctions.

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 * \eta_h^2} * (1 - \exp(-2 * \eta_h)) \quad (24)$$

$$R_h = 1 \text{ pour } \eta_h = 0$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 * \eta_b^2} * (1 - \exp(-2 * \eta_b)) \quad (25)$$

$$R_b = 1 \text{ pour } \eta_b = 0$$

$$\eta_h = \frac{4,6 * h}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (26)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 * b}{L(z_s)} * f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (27)$$

4.2.2. Composante dynamique dans la direction transversale au vent

La section de la cheminée est circulaire, et donc non profilée. Cela a pour conséquence que le vent ne s'écoule pas autour de la structure naturellement. Pour certaines valeurs de la vitesse du vent, des tourbillons se détachent des deux côtés de manière alternative. Ce phénomène est représenté à la Figure 11. Chaque détachement crée une dépression sur le côté sur lequel il a eu lieu. La norme européenne représente ce phénomène par une force agissant dans la direction transversale au vent, provoquant des déplacements dans cette même direction. Les tourbillons peuvent également engendrer des vibrations dans la cheminée lorsque la fréquence de leur détachement est proche d'une fréquence propre de la structure.

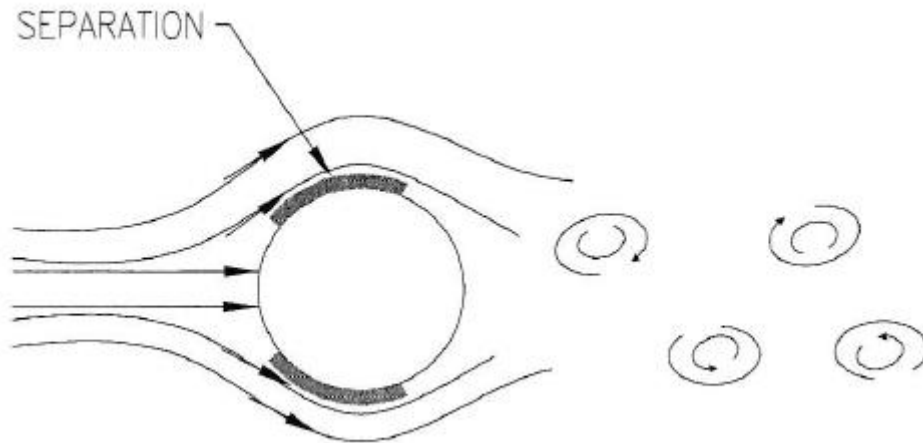


Figure 11 : Détachement des tourbillons de Von Karman (Reid)

L'Eurocode 1 partie 1-4 (Comité européen de normalisation, 2005) conseille de ne se soucier de ce phénomène que sous deux conditions :

- Si le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension transversale de la construction, toutes deux perpendiculaires au vent, est supérieur à 6. Dans le cas présent, les dimensions de la construction dans les directions transversales au vent sont la hauteur et le diamètre. Les rapports de ces deux dimensions correspondant aux deux cas d'études sont calculés aux équations (28) et (29). Ils sont largement supérieurs à 6 et cette condition est donc considérée comme vérifiée pour toutes les cheminées de la société Drever International S.A..

$$\frac{H}{D} = \frac{38,8}{1,6} = 24,25 \quad (28)$$

$$\frac{H}{D_{ext}} = \frac{60,011}{3,7} = 16,22 \quad (29)$$

- Si la vitesse critique du vent pour le mode « i » est inférieure à 1,25 fois la vitesse moyenne du vent. La fréquence de détachement des tourbillons est alors proche d'une fréquence propre de la structure et il y a un risque de résonance. Ce critère sera vérifié pour le premier mode, au cas par cas. Le calcul de la vitesse critique est expliqué ci-dessous.

La vitesse critique du vent pour le mode de vibration de flexion « i » est définie comme la vitesse du vent à laquelle la fréquence du détachement tourbillonnaire est égale à une fréquence propre de la construction. Elle se calcule à l'aide de l'équation (30).

$$v_{crit,i} = \frac{D * n_{i,y}}{S_t} \quad (30)$$

Dans l'équation ci-dessus, $n_{i,y}$ est la fréquence propre du mode considéré « i » dans la direction transversale à celle du vent, et S_t est le nombre de Strouhal. Dans le cas de cheminées circulaires, ce dernier vaut 0,18.

Si le phénomène doit être pris en compte, alors les déplacements induits par la force transversale équivalente doivent être évalués et il faut s'assurer qu'ils restent dans des limites raisonnables. Cette force est calculée à partir de l'équation (31). Elle agit perpendiculairement à la direction du vent.

$$F_{w2}(s) = m(s) * (2 * \pi * n_i)^2 * \Phi_i(s) * y_{F,max} \quad (31)$$

Dans cette équation, $m(s)$ est la masse en vibration de la construction par unité de longueur, $n_{i,y}$ est la fréquence propre de la construction, Φ est la déformée modale de la construction normalisée à 1 au point de déplacement maximal, et $y_{F,max}$ est le déplacement maximal dans le temps au point où Φ est égal à 1.

La norme européenne propose deux méthodes, donnant des résultats assez différents, pour calculer l'amplitude des déplacements perpendiculaires au vent. La première est une méthode générale, tandis que la seconde est spécifique aux structures en consoles dont la réponse se compose de vibrations selon le premier mode. Typiquement, ces dernières structures sont les cheminées et les mâts. C'est donc la deuxième méthode qui sera utilisée dans ce travail, puisqu'elle a été développée spécifiquement pour les cheminées. La norme précise cependant que le choix de la méthode peut être imposé par l'annexe nationale. Bien que celles-ci n'entrent pas en compte dans le développement du

programme, qui se veut le plus général possible, il est à noter que l'annexe nationale belge associée à la partie 1-4 de l'Eurocode 1 interdit l'utilisation de la première méthode. En effet, ce document précise que la première méthode sous-estime les amplitudes des vibrations perpendiculaires au vent. Cela renforce donc la décision de choisir la deuxième méthode, qui semble plus sécuritaire. (Comission NBN E250 - E25001, 2010)

Le déplacement maximal caractéristique, au point de plus grand déplacement, est alors donné par l'équation (32).

$$y_{max} = \sigma_y * k_p \quad (32)$$

Dans cette équation, σ_y est l'écart type du déplacement et k_p le facteur de pointe.

L'écart type du déplacement rapporté au diamètre D , au point de plus grand déplacement peut être calculé en utilisant l'équation (33).

$$\frac{\sigma_y}{D} = \frac{1}{S_t^2} * \frac{C_c}{\sqrt{\frac{S_c}{4 * \pi} - K_a * \left(1 - \left(\frac{\sigma_y}{D * a_L}\right)^2\right)}} * \sqrt{\frac{\rho_{air} * D^2}{m_e}} * \sqrt{\frac{D}{H}} \quad (33)$$

Les paramètres intervenant dans cette équation sont définis dans le Tableau 7.

C_c	Constante aérodynamique dépendant de la forme de section transversale et du nombre de Reynolds, définie au Tableau 8 ;
K_a	Paramètre d'amortissement aérodynamique ;
a_L	Amplitude de limitation normalisée donnant le déplacement des constructions très faiblement amorties, définie au Tableau 8 ;
S_t	Nombre de Strouhal ;
m_e	Masse effective par unité de longueur, donnée à l'équation (19) ;
S_c	Nombre de Scruton ;

Tableau 7 : Paramètres intervenant dans l'équation (33)

La constante d'amortissement aérodynamique K_a diminue avec l'augmentation de l'intensité de turbulence. Pour une turbulence de 0%, la constante d'amortissement peut être considérée égale à sa valeur maximale. Pour des intensités de turbulence supérieures à 0%, l'utilisation de $K_{a,max}$ à la place de K_a est sécuritaire. Les valeurs maximales de la constante d'amortissement aérodynamique sont données au Tableau 8 en fonction du nombre de Reynolds.

Constante	Cylindre à base circulaire pour $Re \leq 10^5$	Cylindre à base circulaire pour $Re = 5 * 10^5$	Cylindre à base circulaire pour $Re \geq 10^6$
C_c	0,02	0,005	0,01
$K_{a,max}$	2	0,5	1
a_L	0,4	0,4	0,4

Tableau 8 : Constantes pour la détermination de l'effet du détachement tourbillonnaire (Comité européen de normalisation, 2005)

Le nombre de Reynolds doit cette fois être évalué à la vitesse du vent critique, selon l'équation (34).

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{D_{ext} * v_{crit,i}}{\nu} \quad (34)$$

Le nombre de Scruton exprime la sensibilité de la structure aux vibrations. Il se calcule selon l'équation (35) et dépend de l'amortissement structural et du rapport de la masse de la construction à la masse de fluide.

$$S_c = \frac{2 * \delta_s * m_{i,e}}{\rho_{air} * D^2} \quad (35)$$

La solution de l'équation (33) est présentée à l'équation (36), les coefficients c_1 et c_2 étant définis respectivement aux équations (37) et (38).

$$\left(\frac{\sigma_y}{D}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \quad (36)$$

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} * \left(1 - \frac{S_c}{4 * \pi * K_a}\right) \quad (37)$$

$$c_2 = \frac{\rho * D^2}{m_e} * \frac{a_L^2}{K_a} * \frac{C_c^2}{S_t^4} * \frac{D}{h} \quad (38)$$

Une fois l'écart-type déterminé, il faut également calculer le facteur de pointe k_p afin de connaître les deux termes de l'équation (32). Ce facteur se calcule à l'aide de l'équation (39).

$$k_p = \sqrt{2} * \left(1 + 1,2 * \arctan\left(0,75 * \left(\frac{S_c}{4 * \pi * K_a}\right)^4\right)\right) \quad (39)$$

La variation dans le temps de la sollicitation dans la direction transversale au vent est très importante puisque les tourbillons créent une dépression successivement de chaque côté. La structure va être tirée d'un côté puis, quelques secondes plus tard, de l'autre. Le problème de fatigue doit alors être étudié avec attention. Cela nécessite de déterminer le nombre de cycles de chargement sur la durée de vie de la construction.

Comme annoncé précédemment, deux méthodes sont disponibles pour calculer l'amplitude des vibrations, et la deuxième est plus adaptée aux cheminées. Cependant, seule la première méthode fournit une formule permettant de calculer le nombre de cycles de chargement. La norme permet d'utiliser celle-ci en adaptant le coefficient de largeur de bande, mais cela est assez controversé dans la communauté scientifique. En effet, la norme précise que les deux méthodes sont différentes et qu'il n'est pas possible de les comparer de manière directe. Les mélanger est donc risqué. Toutefois, il n'existe pas encore de nouvelle formule pour le calcul du nombre de cycles plus adaptée à la deuxième méthode. La recommandation de la norme est donc suivie et la formule de la première méthode est utilisée.

Le nombre de cycles de chargement dû à une oscillation excitée par détachements tourbillonnaires peut être obtenu à l'aide de la méthode 1 en utilisant un coefficient de largeur de bande ϵ_0 valant 0,15. Il est calculé grâce à l'équation (40).

$$N = 2 * TV * n * \epsilon_0 * \left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2 * \exp\left(-\left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2\right) > 10^4 \quad (40)$$

Les paramètres intervenant dans cette équation sont définis dans le Tableau 9.

$v_{crit} [m/s]$	Vitesse critique ;
$v_0 [m/s]$	$\sqrt{2}$ fois la valeur modale de la distribution statistique (loi de Weibull) de la vitesse du vent ;
$TV [s]$	Durée de vie ;
ϵ_0	Coefficient de largeur de bande décrivant la bande des vitesses de vent dans laquelle apparaissent les vibrations dues au détachement tourbillonnaire.

Tableau 9 : Paramètres intervenant dans l'équation (40)

La valeur de v_0 peut être considérée comme étant égale à 20% de la vitesse moyenne caractéristique du vent où se produit le détachement tourbillonnaire.

En réalité, la vitesse du vent varie dans le temps, et donc l'amplitude de la force et des contraintes engendrées aussi. Cependant, pour le calcul du nombre de cycles de chargement, les étendues de contraintes sont supposées constantes. La variation est prise en compte par la loi de Weibull, qui donne la probabilité d'occurrence des différentes valeurs de la vitesse du vent en un lieu précis. Cela est pris en compte dans la valeur du paramètre v_0 . On remplace donc la distribution statistique de la vitesse par une valeur unique qui permet d'obtenir un effet équivalent du dommage produit.

4.3. Charges d'exploitation

L'Eurocode 3 partie 3-2 recommande d'ajouter des charges d'exploitation sur les plateformes. La valeur caractéristique recommandée de ces charges est de 2 kN/m². (Comité européen de normalisation, 2007) Pour en tenir compte, le programme demande à l'utilisateur l'altitude et l'aire des plateformes. Il faut cependant veiller à ce que cette altitude corresponde à un nœud du modèle, car la connexion avec le logiciel BeamZ ne permet pas de placer des forces sur les éléments.

5. Combinaisons d'actions

A présent que les différents cas de charge ont été étudiés, ils doivent être combinés pour étudier le comportement de la structure sous leurs actions simultanées. Les Eurocodes structuraux (Bureau de normalisation, 2002) présentent les différentes combinaisons possibles pour une vérification par la méthode des coefficients partiels.

Les combinaisons de cas de charge à considérer dépendent des états limites vérifiés. Dans ce travail, les états limites de services seront étudiés, ainsi que les états limites ultimes STR et FAT. L'état limite STR correspond à une défaillance interne ou une déformation excessive de la structure ou d'éléments structuraux lorsque la résistance des matériaux de construction de la structure domine. L'état limite FAT est associé à une défaillance de la structure ou d'éléments structuraux due à la fatigue. (Bureau de normalisation, 2002)

Les états limites de service seront vérifiés à l'aide de combinaisons des cas de charges caractéristiques, présentées à l'équation (41). Le premier terme rassemble toutes les charges permanentes, le deuxième représente la charge variable principale, et le dernier regroupe toutes les autres charges variables, dites secondaires. ψ_0 est le coefficient définissant la valeur de combinaison d'une action variable, il dépend du type d'action.

L'équation (42) présente la combinaison utilisée pour l'état limite ultime STR, correspondant à une situation de projet durable ou transitoire. Les facteurs γ sont les facteurs partiels de résistance. Pour les cheminées, ils dépendent de la classe de fiabilité, définie dans l'annexe A de l'Eurocode 3 partie 3-2. (Comité européen de normalisation, 2007)

Finalement, l'équation (43) donne la combinaison de fatigue, qui ne doit prendre en compte que la valeur fréquente du vent, obtenue en multipliant sa valeur caractéristique par le coefficient de combinaison ψ_1 .

$$G_k + Q_{k1} + \sum_i \psi_{0i} * Q_{ki} \quad (41)$$

$$\gamma_G * G_k + \gamma_Q * Q_{k1} + \sum_i \gamma_{Qi} * \psi_{0i} * Q_{ki} \quad (42)$$

$$\psi_1 * Q_k \quad (43)$$

Une difficulté rencontrée lors de l'établissement des combinaisons est qu'aucune valeur des coefficients ψ n'est donnée pour les cheminées. Il a donc fallu prendre une décision et il a été choisi avec l'entreprise de prendre celles correspondant aux bâtiments, donnés dans l'annexe A des Eurocodes structuraux. (Bureau de normalisation, 2002)

Afin d'obtenir les combinaisons exactes à utiliser dans le programme, il faut choisir quelles sont les charges permanentes, variables principales, et variables secondaires. Les charges permanentes sont toujours le poids propre de l'enveloppe structurelle et le poids de l'enveloppe intérieure dans le cas des cheminées double enveloppe, et bien sûr les charges d'imperfection associées. Trois charges variables sont considérées : la force du vent dans la direction du vent, celle dans la direction transversale, et les charges d'exploitation. Cependant, l'Eurocode 3 partie 3-2 indique que les charges d'exécution ne sont supposées agir qu'en l'absence d'autres charges climatiques. De plus, le logiciel

d'analyse étant en deux dimensions, il n'est pas possible de considérer les deux charges de vent dans une même combinaison. Trois combinaisons seront alors définies, en prenant tour à tour chaque charge variable comme principale. Il n'y aura, dans aucune combinaison, de charges variables secondaires puisque les trois actions considérées ne peuvent avoir lieu en même temps.

Finalement, les cas de charges combinés sont présentés au Tableau 10. Il y aura donc 7 combinaisons au total, trois pour les états limites de services et trois pour l'état limite ultime STR, obtenues en ajoutant les coefficients adéquats aux combinaisons présentées au Tableau 10, et une pour l'état limite ultime FAT.

Combinaison	Charges permanentes	Charge variable principale	Charges variables secondaires
1	Poids	Charge de vent dans la direction du vent	Aucune
2	Poids	Charge d'exploitation	Aucune
3	Poids	Charge de vent dans la direction perpendiculaire à celle du vent	Aucune

Tableau 10 : Combinaisons de charges

6. Analyse

L'analyse de la structure sous les charges appliquées est réalisée à l'aide du logiciel BeamZ, qui effectue une analyse élastique linéaire au premier ordre. Le programme fournit les efforts internes et déplacements, mais les contraintes seront calculées manuellement. Des éléments de type poutre sont utilisés pour la modélisation.

L'analyse élastique linéaire au premier ordre est la plus simple de toutes. Cela implique évidemment de devoir faire un nombre important de vérifications par la suite, puisqu'aucun mode de rupture n'est considéré à ce stade. Un avantage important de ce type d'analyse est qu'elle permet d'appliquer le principe de superposition aux efforts internes et déplacements. Les différentes analyses possibles sont classées de deux manières : élastique ou élastoplastique, et de premier ou second ordre.

Une analyse élastique linéaire suppose une réponse de la structure infiniment linéaire, comme présenté sur la Figure 12. Elle peut être utilisée dans tous les cas car aucune hypothèse n'est faite concernant le comportement ductile ou non des sections. (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997) Une analyse élastoplastique ne peut être réalisée que pour les sections de classe 1. Etant donné le rapport du diamètre sur l'épaisseur des sections utilisées pour les cheminées, il sera démontré ci-dessous qu'elles sont de classe 4. L'analyse élastique est donc obligatoire.

Une analyse au premier ordre signifie que l'équilibre est respecté dans la configuration initiale, l'état déformé n'est pas pris en compte. Cela suppose donc que les déplacements ont un effet négligeable sur le comportement structurel. (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997)

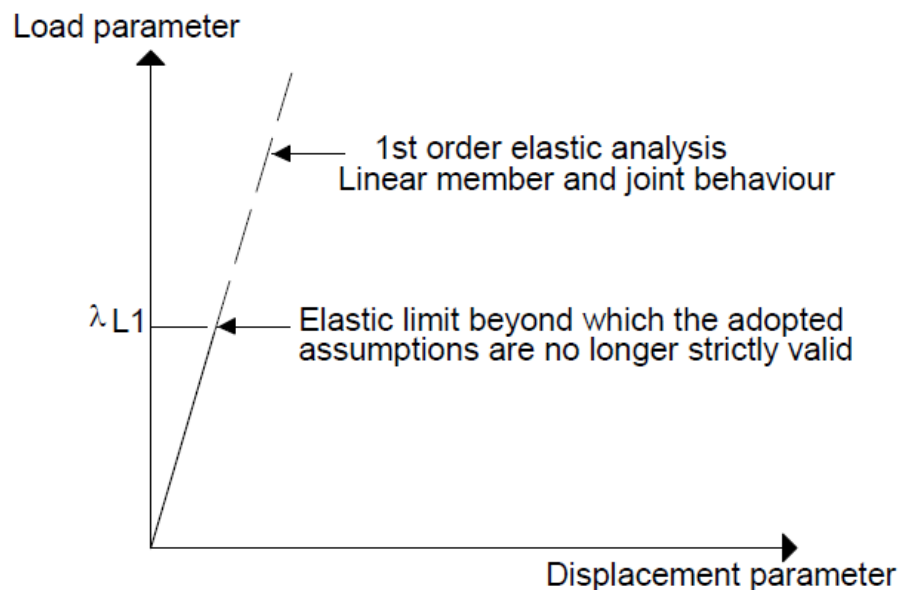


Figure 12 : Réponse charge - déplacement dans le cas d'une analyse élastique linéaire (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997)

La modélisation de la structure portante cylindrique comme une poutre porte le nom de théorie de la membrane. Elle implique que les effets de coques soient négligés. En effet, la structure portante étant cylindrique, des contraintes circonférentielles, spécifiques aux coques, sont normalement présentes. Cependant, il a été choisi d'utiliser la théorie des poutres pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le critère habituel permettant d'utiliser la théorie des poutres, présenté à l'équation (44), est toujours satisfait pour les cheminées de la société Drever International S.A.. Ensuite, la structure est uniquement soumise à son poids et aux charges de vent, qui sont appliquées perpendiculairement à

la surface. L'état de contrainte ne devrait donc pas être trop complexe. Le moment local dans la coque n'est dû dans ce cas qu'à la distribution de pression du vent non-uniforme, mais la norme européenne permet de le négliger sous certaines conditions.

$$\frac{H}{D} > 10 \quad (44)$$

Ces conditions sont données dans l'Eurocode 3 partie 3-2 (Comité européen de normalisation, 2007), et sont présentées ci-dessous. Elles sont vérifiées pour les deux cas d'étude, mais il appartient au futur utilisateur du programme de vérifier qu'elles sont également satisfaites pour le cas qu'il veut traiter.

Le critère permettant de négliger les effets de coques (excepté ceux dus au moment de flexion circonférentiel provenant de la distribution non-uniforme du vent) dans les coques cylindriques verticales non raidies est présenté à l'équation (45). L'équation (46) donne le critère permettant de négliger également le moment de flexion circonférentiel dû au vent. D_m représente le diamètre moyen et t l'épaisseur.

$$\frac{H}{D_m/2} \geq 0.14 * \frac{D_m/2}{t} + 10 \quad (45)$$

$$\frac{D_m/2}{t} \leq 160 \quad (46)$$

Pour les coques cylindriques raidies à l'aide d'anneaux, une seule condition doit être remplie pour pouvoir négliger les effets de flexion de la coque : les anneaux raidisseurs reprenant la pression du vent doivent être dimensionnés pour les moments de flexion circonférentiel.

Lorsque la coque structurelle est modélisée par une poutre, l'analyse au premier ordre peut être utilisée à condition de respecter le critère de l'équation (47), dans laquelle N_{Ed} est la valeur de calcul de la charge verticale totale au pied de la coque, et N_{crit} la charge critique élastique.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{crit}} \leq 0,10 \quad (47)$$

Cependant, une analyse au premier ordre implique de vérifier la structure aux instabilités. Dans le cas des cheminées traitées, les instabilités hors plan ne sont pas à craindre car la section est tubulaire et symétrique. Deux solutions sont alors possibles, faire une analyse au premier ordre et effectuer la vérification aux instabilités en suivant les recommandations de l'Eurocode 3 partie 1-1, présentées comme la « méthode générale de vérification du flambement latéral et du déversement de composants structuraux », ou réaliser une analyse au deuxième ordre « approchée », c'est-à-dire corriger l'analyse au premier ordre par un facteur amplificateur des efforts horizontaux. C'est cette dernière solution qui a été choisie car certains pays n'adhèrent pas à la méthode générale et que la deuxième méthode est beaucoup plus directe.

L'analyse au second ordre tient compte de l'augmentation des efforts dus au bras de levier qui se crée pour les charges verticales par le déplacement de la structure sous les charges au premier ordre. La réponse charge déplacement obtenue avec une telle analyse est présentée à la Figure 13. La charge est limitée par l'apparition du phénomène de flambement élastique.

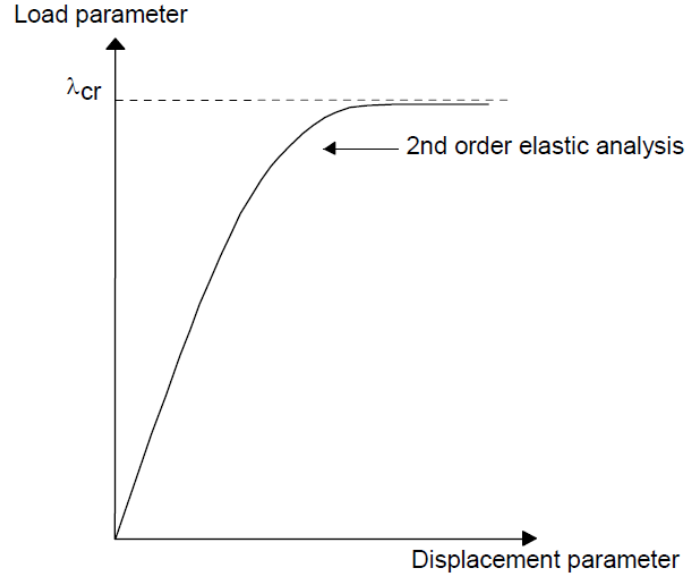


Figure 13 : Réponse charge - déplacement dans le cas d'une analyse élastique linéaire (Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M, 1997)

L'analyse réalisée par BeamZ va donc être « corrigée » pour prendre en compte le risque d'instabilité globale. On nomme cette méthode « second ordre approché » car seules les instabilités globales et les imperfections globales sont prises en compte, mais pas les instabilités et imperfections locales. Cette approche consiste à multiplier les charges horizontales par le coefficient défini à l'équation (48), dans laquelle N_{cr} est la charge critique élastique et N la réaction verticale en pied de la cheminée. De cette manière les effets des déformations latérales dus aux charges verticales sont pris en compte. Le calcul de la charge critique sera détaillé au point 7.4.3 ci-dessous.

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (48)$$

Pour intégrer les imperfections globales dans l'analyse, la norme conseille de les considérer sous la forme d'un défaut global d'aplomb initial. Pour les cheminées, la déviation latérale au sommet peut être déterminée à l'aide de l'équation (49) selon l'Eurocode 3, partie 3-2. (Comité européen de normalisation, 2007)

$$\Delta = \frac{H}{500} * \sqrt{1 + \frac{50}{H}} \quad (49)$$

A partir de ce défaut d'aplomb, une force horizontale équivalente est calculée grâce aux équations (50) et (51), pour chaque force verticale V appliquée sur la structure. Ces forces équivalentes permettent d'inclure les imperfections globales dans l'analyse.

$$\Phi_{imp} = \frac{\Delta}{H} \quad (50)$$

$$H_{eq} = \Phi_{imp} * V \quad (51)$$

Les imperfections locales sont intégrées dans la vérification au voilement.

Pour le calcul des contraintes, les formules habituelles de la théorie des poutres sont utilisées. Elles nécessitent la connaissance de l'aire et de l'inertie. Ces deux grandeurs sont connues pour le cylindre, mais il faut également les évaluer au niveau de l'ouverture permettant l'amenée des fumées. L'aire est assez simple à calculer mais aucune formule générale n'a été trouvée pour le calcul de l'inertie d'une portion de cylindre quelconque. Aussi, l'annexe 2 présente le développement réalisé pour dériver une telle formule.

7. Vérifications

7.1. Classification

Les vérifications à effectuer sont différentes en fonction de la classe de la section. En effet, une section de classe 1 permet la redistribution plastique tandis qu'une section de classe 4 n'atteint même pas la limite élastique. Pour inclure les vérifications dans le programme développé, il a donc fallu se positionner quant aux vérifications à réaliser. Etant donné les faibles épaisseurs par rapport au diamètre, pour les gammes de valeurs habituelles des cheminées de la société, il est fort probable que les sections soient de classe 4. Cela a d'ailleurs été vérifié pour les deux cas d'étude. Il a alors été décidé d'entrer dans le programme les vérifications relatives aux sections de classe 4. Cependant, s'il s'avérait que les dimensions des cheminées varient et que les sections deviennent de classe 3, le programme serait tout de même sécuritaire.

Pour les sections tubulaires de classe 4, la norme conseille de suivre les recommandations relatives aux coques, et c'est ce qui a été réalisé. En effet, lorsque des classes 4 sont utilisées, il faut habituellement calculer une section réduite et effectuer les mêmes vérifications que pour les classes 3. Cependant, aucune information n'est donnée sur la manière de calculer les sections réduites dans le cas de section tubulaire. C'est pourquoi une autre méthode est utilisée, recommandée pour les coques, qui consistent à conserver la section totale dans les vérifications mais à limiter la contrainte de rupture pour prendre en compte le voilement.

7.2. Vérification d'ovalisation

Contrairement aux autres effets du vent, l'ovalisation de la coque est prise en compte comme une vérification, et non comme une force équivalente à intégrer dans l'analyse.

Tout comme la composante dynamique dans la direction transversale au vent, ce phénomène n'est pas toujours critique. L'équation (52) pose une limite, portant sur la vitesse moyenne du vent v_m et sur la vitesse critique du vent pour le mode « i » de vibration par ovalisation $v_{crit,i}$. Si le critère est satisfait, il n'est pas nécessaire de vérifier l'ovalisation.

$$v_{crit,ov,i} > v_m \quad (52)$$

La vitesse critique du vent pour le mode « i » de vibration par ovalisation se calcule selon la formule (53). Elle est définie comme la vitesse du vent à laquelle le double de la fréquence du détachement tourbillonnaire est égal à la fréquence propre du mode d'ovalisation « i » de la coque cylindrique, $n_{i,0}$.

$$v_{crit,ov,i} = \frac{D * n_{i,0}}{2 * S_t} \quad (53)$$

La fréquence fondamentale d'ovalisation, nécessaire à la détermination de la vitesse critique, peut être déterminée pour le premier mode à partir de l'équation (54). Cependant, cette formule n'est valable que pour les cheminées sans anneaux raidisseurs, et aucune indication n'est donnée pour les cheminées qui en sont équipées.

$$n_{1,0} = 0,492 * \sqrt{\frac{t^3 * E}{\mu_s * (1 - \nu_p^2) * D^4}} \quad (54)$$

Dans cette équation, E est le module de Young, t l'épaisseur de la coque, ν_p le coefficient de Poisson, et μ_s la masse de la coque par unité d'aire en kg/m².

Concernant les cheminées avec raidisseurs, une formule a été dérivée par la société Drever Interational S.A. à partir de simulations pour déterminer la fréquence fondamentale d'ovalisation du premier mode. Cette formule est présentée à l'équation (55).

$$n_{1,0} = \frac{8,146 * 10^{-3}}{L_r} * \sqrt{\frac{E * t}{\gamma * (1 - \nu_p^2) * D}} \quad (55)$$

Le coefficient γ est défini à l'équation (56), et L_r la distance entre les raidisseurs. Les valeurs du coefficient γ doivent être entrées par l'utilisateur du programme.

$$\gamma = \frac{\text{poids de l'isolation} + \text{poids de la paroi}}{\text{poids de la paroi}} \quad (56)$$

Si le critère (52) est satisfait, alors l'ovalisation n'est pas critique et il n'y a pas lieu de s'en inquiéter. Au contraire, si le critère n'est pas satisfait, alors l'ovalisation devient un phénomène important. Cependant, au lieu de déterminer les déformations pour vérifier si elles sont acceptables ou non, il a été décidé avec l'entreprise d'ajouter des raidisseurs jusqu'à ce que le critère soit satisfait.

7.3. Etats limites de service

L'Eurocode 3 partie 3-2 (Comité européen de normalisation, 2007) conseille de vérifier toute une série d'états limites de service pour les cheminées, à savoir :

- Déplacements dans la direction du vent et amplitudes des vibrations dans la direction transversale pour assurer une apparence correcte et une utilisation efficace de la structure;
- Vibrations et oscillations pour éviter d'alerter les spectateurs ;
- Déformations, déplacements, oscillations ou vibrations qui causent des dommages aux éléments non structurels.

Cependant, la norme ne donne de limites que pour les déplacements dans la direction du vent et l'amplitude des vibrations dans la direction transversale. Il a été décidé avec l'entreprise qu'il était suffisant de ne vérifier que ces deux états limites de service.

La valeur recommandée par l'Eurocode comme déplacement maximal au sommet des cheminées autoportantes dans la direction du vent, dû à la valeur caractéristique de la charge équivalente représentant le vent dans la direction du vent, est indiqué à l'équation (57).

$$\delta_{max} = \frac{H}{50} \quad (57)$$

La valeur maximale des amplitudes de vibrations induites par les tourbillons de Von Karman, conseillée par la norme, dépend de la classe de fiabilité. Il existe trois classes, dépendant des conséquences de

ruine de la cheminée. Elles sont définies à l'annexe A de l'Eurocode 3 partie 3-2 (Comité européen de normalisation, 2007). Les valeurs limites sont présentées au Tableau 11.

Classe de fiabilité	Limites de l'amplitude des vibrations dans la direction transversale au vent
1	0,15*D
2	0,10*D
3	0,05*D

Tableau 11 : Recommandations d'amplitudes maximales de vibrations dans la direction transversale au vent (Comité européen de normalisation, 2007)

7.4. Etats limites ultimes

Les différents états limites ultimes à vérifier sont la résistance en section, les instabilités locales (voilement), le flambement global élastique et la fatigue. L'Eurocode 3, partie 1-6 (Bureau de normalisation, 2007) conseille également de vérifier l'état limite de plasticité cyclique, mais cela ne concerne pas le cas présent car les classes 4 ne peuvent pas atteindre la plasticité.

Les états limites ultimes doivent être vérifiés en tout point de toute section de la cheminée. Cela n'est évidemment pas réalisable et seules certaines sections, jugées les plus critiques, seront vérifiées par le programme. Les sections vérifiées sont celles en base de chaque segment de construction, pour considérer chaque aire résistante avec la charge maximale qu'elle subit. Pour le tronçon contenant l'ouverture permettant l'entrée des fumées, la section résistante est prise égale à l'aire là où l'ouverture est la plus grande. Les sections comportant une ouverture sont susceptibles d'être critiques car la section résistante est plus faible, mais il faut noter qu'il n'y a pas de concentration de contraintes car des raidisseurs sont placés au niveau des ouvertures.

Les états limites ultimes traités ci-dessous vérifient uniquement la résistance de l'enveloppe structurelle. Les assemblages ne sont pas étudiés dans le cadre de ce travail mais nécessiteraient également des vérifications. La section, bien que de classe 4, est supposée pleinement efficace jusqu'à l'atteinte d'une contrainte réduite à cause du voilement.

7.4.1. Résistance en section

Cet état limite correspond à l'atteinte de la limite plastique. Il ne sera normalement jamais atteint puisque la section est de classe 4. Le voilement devrait donc être toujours plus restrictif. Le critère à vérifier pour la résistance en section est présenté à l'équation (58).

Le terme de droite de cette équation représente la résistance de calcul et est déterminée grâce à l'équation (59). Le paramètre γ_{M0} est un coefficient partiel relatif à la résistance des éléments structurels, lié à la résistance plastique f_y lorsqu'aucune instabilité locale ou globale n'a lieu. Il vaut 1 pour l'acier S235 et 1,1 pour l'acier inoxydable.

Le terme de gauche de l'équation (58) est la contrainte de calcul équivalente de Von Mises. L'Eurocode 3 partie 1-6 (Bureau de normalisation, 2007) conseille de la calculer à l'aide de l'équation (60), dans laquelle σ_x est une contrainte méridionale, σ_θ une contrainte circonférentielle, $\tau_{x\theta}$ une contrainte de cisaillement dans le plan, τ_{xn} et $\tau_{\theta n}$ des contraintes de cisaillement transversale, respectivement méridionale et circonférentielle, associées à la flexion. Cependant, puisqu'une analyse de type poutre est utilisée, cette formule peut être simplifiée en supprimant toutes les contraintes qui sont nulles

dans ce type d'analyse. La formule simplifiée est présentée à l'équation (61), elle est identique à la contrainte de comparaison de Von Mises calculée habituellement pour les poutres.

$$\sigma_{VM,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (58)$$

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (59)$$

$$\sigma_{VM,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} * \sigma_{\theta,Ed} + 3 * (\tau_{x,\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (60)$$

$$\sigma_{VM,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3 * \tau_{xn,Ed}^2} \quad (61)$$

7.4.2. Voilement

Cet état limite considère l'apparition d'instabilités locales, c'est-à-dire le développement soudain de grands déplacements perpendiculaires à la surface du cylindre. Dans cette vérification, les imperfections géométriques et tolérances d'exécution sont considérées, ainsi que les conditions aux limites.

L'Eurocode 3 partie 1-6 (Bureau de normalisation, 2007) présente six exemples de conditions aux limites relatives aux instabilités locales. Ces schémas sont rapportés à la figure 8.1 de la norme. La première étape a été de déterminer quels cas se rapportent aux cheminées de la société Drever International S.A.. Etant donné la présence de raidisseurs et d'assemblages espacés de manière régulière sur la hauteur, il est assez intuitif de choisir la configuration *f* pour les différents tronçons, hormis celui en contact avec la fondation. Pour ce dernier, le cas le plus ressemblant est l'exemple *d*. L'extrémité supérieure est considérée ouverte car la hauteur du premier raidisseur ou assemblage est importante, et son effet est donc atténué. Les conditions aux limites considérées sont donc les BC1f et BC2f, qui correspondent toutes deux à des restreintes radiales, des rotations libres mais, respectivement, des restreintes dans la direction méridionales tandis que cette direction est libre pour BC2f.

Pour tenir compte des imperfections géométriques et tolérances de fabrication, la norme recommande de classer la structure selon trois classes de tolérance (A : excellent, B : haut ou C : normal). Le classement se fait selon les tolérances permises concernant le défaut de rotondité, l'excentrement fortuit, et les fossettes. Chaque type de tolérance doit être classé séparément, et la classe de la structure doit être prise égale à la classe la plus faible, correspondant à la plus grande tolérance. Le classement des structures doit être fait en amont du programme, par l'utilisateur. La classe entrera comme paramètre. Cela permet de s'adapter aux tolérances en vigueur dans différents pays.

Selon la partie 1-6 de l'Eurocode 3, l'état limite de voilement est respecté lorsque les conditions (62) à (64) sont satisfaites. Si plus d'une des trois composantes de contrainte membranaire concernées par le flambement sont présentes sous les actions considérées, l'équation (65) doit également être vérifiée. Les paramètres k_x , k_θ , k_τ et k_i caractérisent l'interaction de voilement. Cependant, comme expliqué précédemment, seule la contrainte méridionale est non nulle puisqu'une analyse de type poutre est réalisée. Le seul critère à vérifier est donc celui de l'équation (62). Si les contraintes sont en traction dans les équations ci-dessous, elles doivent être prises égales à une valeur nulle.

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (62)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (63)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (64)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} - k_i * \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) * \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (65)$$

Les termes de gauche des équations (62) à (64) sont les contraintes présentes dans la section sous les différents cas de charges étudiés. Ce sont les mêmes contraintes que celles intervenant dans l'équation (60).

Les termes de droite des équations (62) à (64) représentent la résistance de calcul au voilement. Dans la suite, seul le calcul de la contrainte résistante méridionale de calcul $\sigma_{x,Rd}$ est détaillé. Celle-ci est obtenue à partir de l'équation (66), dans laquelle le numérateur est la contrainte méridionale caractéristique de voilement et le dénominateur le coefficient partiel γ_{M1} . Celui-ci est relatif à la résistance des éléments structuraux, liée à la contrainte de plastification f_y lorsque les instabilités locales ou globales sont considérées.

La contrainte caractéristique est calculée par le produit du facteur de réduction associé au voilement χ et de la limite plastique caractéristique, comme présenté à l'équation (67).

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{1,1} \quad (66)$$

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x * f_{yk} \quad (67)$$

Le facteur de réduction est déterminé à partir des équations (68) à (70), en fonction de l'élancement relatif de la coque $\bar{\lambda}$.

$$\chi = 1 \text{ quand } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (68)$$

$$\chi = 1 - \beta * \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right)^\eta \text{ quand } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \quad (69)$$

$$\chi = \frac{\alpha_{imp}}{\bar{\lambda}^2} \text{ quand } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (70)$$

Un certain nombre de paramètres intervient dans ces équations. Ils sont définis au Tableau 12 et doivent être déterminés à partir de l'annexe D de l'Eurocode 3 partie 1-6. (Bureau de normalisation, 2007)

$\bar{\lambda}$	Elancement relatif de la coque ;
$\bar{\lambda}_0$	Elancement relatif au palier plastique ;
$\bar{\lambda}_p$	Elancement relatif à la limite plastique ;

β	Facteur de gamme plastique ;
η	Exposant d'interaction ;
α_{imp}	Facteur de réduction d'imperfection élastique.

Tableau 12 : Paramètres intervenant dans les équations (68) à (70)

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (71)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} \quad (72)$$

Dans l'équation (71), $\sigma_{x,Rcr}$ est la contrainte critique de voilement élastique. Elle est également calculée à partir de l'annexe D de la norme.

Cette annexe D est scindée en quatre parties : coques cylindriques non-raïdiées d'épaisseur constante ; coques cylindriques non-raïdiées d'épaisseur variable par tronçons ; coques cylindriques non-raïdiées avec joints de recouvrement ; coques coniques complètes et tronquées non-raïdiées. Dans le cas présent, les cheminées sont des coques raidies d'épaisseur variable par tronçons, elles ne font donc partie d'aucune des catégories traitées. Cependant, puisque l'instabilité étudiée est locale, chaque tronçon de la cheminée compris entre deux raidisseurs et/ou assemblages par brides est étudié séparément. On se rapporte alors à la partie « Coques cylindriques non-raïdiées d'épaisseur constante ».

La contrainte critique de voilement élastique se calcule à l'aide de l'équation (73), dans laquelle C_x dépend des conditions aux limites et du paramètre de longueur adimensionnelle ω défini à l'équation (74). L'équation (75) permet d'obtenir le facteur de réduction d'imperfection élastique dans le cas méridional. Le paramètre Δw_k est l'amplitude d'imperfection caractéristique et dépend des caractéristiques géométriques et d'un paramètre de qualité de fabrication en compression méridionale, fonction de la classe de tolérance de fabrication.

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 * E * C_x * \frac{t}{r} \quad (73)$$

$$\omega = \frac{L_{troncon}}{D/2} * \sqrt{\frac{D/2}{t}} \quad (74)$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 * (\Delta w_k/t)^{1,44}} \quad (75)$$

Finalement, la valeur des derniers paramètres $\bar{\lambda}_{x0}$, β , et η est donnée. Ils valent respectivement 0,2, 0,6 et 1.

7.4.3. Flambement global élastique

Les instabilités d'ensemble sont prises en compte dans l'analyse au second ordre. Il faut donc uniquement vérifier le flambement global élastique, c'est-à-dire que l'effort normal maximum ne dépasse pas la charge critique d'Euler.

En général, des logiciels d'analyse tels que BeamZ réalisent le calcul de charge critique. Cependant, celui-ci étant toujours en développement, cette partie n'est pas encore disponible. Une alternative a donc été mise en place à l'aide de formules approchées.

De telles formules sont difficiles à trouver pour les structures à inertie variable par tronçons. Mais une solution a été trouvée dans le livre « Statik und Stabilität der Baukonstruktionen » (Petersen, 1982). Ce document fournit des expressions permettant d'établir la charge critique de différentes structures dans une multitude de configurations.

Sur les cheminées étudiées, seules deux charges verticales sont appliquées : le poids propre de la structure résistante, et le poids de l'enveloppe intérieure qui est modélisé comme une force concentrée. L'ouvrage de Petersen recommande de calculer la charge critique de la structure soumise à chaque charge verticale prise séparément, puis de calculer la résultante à partir de ces deux résultats intermédiaires. Dans le cas des cheminées simple enveloppe, seul le poids propre agit sur la structure et il n'est pas nécessaire de combiner deux expressions.

L'équation (76) présente la formule correspondant au cas de la cheminée soumise uniquement à son poids propre. Le paramètre ϵ est défini à l'équation (77) et le paramètre γ_{Ki} doit être pris dans la table 6.5 de l'ouvrage de référence, il dépend de ϵ et δ , qui est défini à l'équation (78). L'inertie doit être évaluée à la section en base, après linéarisation, l'indice « B » représente cette section. Pour utiliser cette formule, deux hypothèses sont prises en considération : l'inertie est linéarisée et le poids par mètre courant également. Les paramètres g_A et g_B représentent ce poids, respectivement à la section au sommet et à celle en base.

L'équation (79) fournit l'expression adaptée pour la structure soumise uniquement à une force concentrée. Le paramètre β doit provenir de la table 5.57 de l'ouvrage, il dépend du rapport des épaisseurs des sections en base et au sommet, et d'un paramètre décrivant l'évolution de l'inertie sur la hauteur. Puisque l'ouvrage conseille, pour le cas traité dans le paragraphe ci-dessus, de linéariser l'inertie, celle-ci sera également supposée varier de manière linéaire. Le paramètre « h » représente la hauteur. Il n'est pas indiqué en majuscule car dans ce cas, la hauteur à considérer est celle des deux premiers tronçons, sur lesquelles s'appuie l'enveloppe intérieure, et non celle de la cheminée complète. L'inertie à prendre en compte est cette fois celle de la section au sommet de la portion de cheminée considérée, d'où l'indice « A ».

Finalement, l'équation (80) permet de calculer la charge critique totale, sous l'action du poids propre et de la charge concentrée.

$$N_{crit}^{pp} = \frac{1}{2} * \left(1 + \frac{1}{\epsilon}\right) * \gamma_{Ki} * \frac{E * I_B}{H^2} \quad (76)$$

$$\epsilon = \frac{g_B}{g_A} \quad (77)$$

$$\delta = \frac{I_B}{I_A} = \frac{t_B}{t_A} \quad (78)$$

$$N_{crit}^P = \frac{1}{\beta^2} * \pi^2 * \frac{E * I_A}{h^2} \quad (79)$$

$$N_{crit}^{tot} = (1 + \chi) * \frac{N_{crit}^{pp} * N_{crit}^P}{\chi * N_{crit}^{pp} + N_{crit}^P} \quad (80)$$

La validité de ces équations a été vérifiée en comparant les résultats obtenus sur quelques exemples, à l'aide des formules présentées ci-dessus et en utilisant le logiciel Ossa2D. Les détails de ces exemples peuvent être trouvés à l'annexe 3.

Le Tableau 13 montre que les erreurs relatives entre les résultats obtenus en utilisant les formules approchées et ceux obtenus avec le logiciel Ossa2D sont très faibles, excepté lorsque l'épaisseur est variable. Les erreurs maximales sont obtenues lorsque seulement deux tronçons sont considérés. Ces erreurs viennent sans doute de l'hypothèse de linéarisation de l'inertie. En effet, plus le nombre de tronçons d'inertie différente est important, plus l'erreur réalisée en la linéarisant est faible, et cette hypothèse est donc valide. Mais lorsque le nombre de tronçons est faible, elle introduit de trop grosses erreurs.

Multiplicateur critique Formule approchée	Multiplicateur critique Ossa2D	Erreur relative [%]
1 : Cheminée d'épaisseur constante soumise uniquement à son poids propre		
103,07	103,53	0,44
2 : Cheminée d'épaisseur variable (2 tronçons) soumise uniquement à son poids propre		
148,55	138,54	-7,23
3 : Cheminée d'épaisseur variable (4 tronçons) soumise uniquement à son poids propre		
168,05	160,03	-5,01
4 : Cheminée d'épaisseur constante soumise uniquement à une force concentrée		
2 045,41	2 045,41	0
5 : Cheminée d'épaisseur variable (2 tronçons) soumise uniquement à une force concentrée		
1 441,7	1 956	26,29
6 : Cheminée d'épaisseur constante soumise à son poids propre et à une force concentrée		
98,12	98,99	0,88
7 : Cheminée d'épaisseur variable (4 tronçons) soumise à son poids propre et à une force concentrée appliquée sur le deuxième tronçon		
150,5	148,99	-1,01

Tableau 13 : Multiplicateur critique calculé à l'aide de la formule analytique, du logiciel Ossa2D, et erreur relative entre ces deux valeurs

Etant donné que la force concentrée provenant de l'enveloppe intérieure des cheminées double enveloppe est toujours appliquée au niveau du sommet du deuxième tronçon, cela risque d'engendrer des erreurs importantes. Toutefois, une formule analytique plus précise est disponible dans le cours de construction métallique de Monsieur Jaspart pour les structures à deux tronçons d'inertie variable soumises à une force concentrée. Cette formule est présentée à l'équation (81). Dans ce cas, c'est l'inertie maximale qui intervient, et une hauteur critique doit être calculée, selon l'équation (82). Le

paramètre « n » de cette équation vaut 2 dans le cas de structure encastree-libre, et le paramètre ρ doit être pris dans la figure 5-17 du document de référence. Il est fonction du rapport des longueurs des deux tronçons. (Jaspart, 2015-2016)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_{max}}{H_{cr}^2} \quad (81)$$

$$H_{cr} = \frac{n * H}{\sqrt{\rho}} \quad (82)$$

Le Tableau 14 présente les valeurs obtenues pour le même cas 5 que celui du Tableau 13, mais cette fois, calculé avec la formule analytique provenant du cours de Monsieur Jaspart. L'erreur réalisée en utilisant cette formule est beaucoup plus faible, c'est pourquoi elle sera utilisée pour évaluer la charge critique lorsqu'une force concentrée est appliquée au-dessus de deux tronçons.

Multiplicateur critique Formule analytique	Multiplicateur critique Ossa2D	Erreur relative [%]
5 : Cheminée d'épaisseur variable (2 tronçons) soumise uniquement à une force concentrée		
2 045,41	1 956	-4,57

Tableau 14 : Multiplicateur critique calculé à l'aide de la formule analytique, du logiciel Ossa2D, et erreur relative entre ces deux valeurs

7.4.4. Vérification à la fatigue

La fatigue est un endommagement structural dû à la propagation de fissures provoquées par des variations répétées de contraintes. Les chargements dynamiques risquent donc de provoquer ce phénomène. Dans les actions appliquées à la cheminée, seules deux sont de nature dynamique : l'action du vent dans la direction du vent, et l'action du vent dans la direction transversale.

Dans le cas particulier des cheminées, l'Eurocode 3 partie 3-2 (Comité européen de normalisation, 2007) informe que seule l'action du vent dans la direction transversale à la direction du vent gouverne le dimensionnement en fatigue. La norme permet alors d'effectuer cette vérification uniquement pour ce cas de charge, et de négliger les risques de fatigue dus aux étendues de contraintes provoquées par la composante dynamique du vent dans sa direction. Evidemment, effectuer la vérification pour les deux cas de charge est plus précis, mais ce ne sera pas réalisé dans ce travail, en accord avec les normes européennes.

Le phénomène de fatigue est traité dans l'Eurocode 3 partie 1-9 (Bureau de normalisation, 2005). Il y est recommandé de déterminer les étendues de contraintes provoquées par les charges fréquentes à l'état limite de service. Le coefficient à appliquer à la valeur caractéristique de la charge pour obtenir sa valeur fréquente est ψ_1 , il vaut 0,2 pour l'action du vent. A partir de ces étendues de contrainte, un nombre de cycles maximal est déterminé à partir des équations (83) et (84). Pour s'assurer que la structure ne présente pas de problème de fatigue, il faut alors vérifier que le nombre de cycles de chargement subi sur la durée de vie prévue est inférieur au nombre de cycles maximal. S'il y a combinaison de plusieurs étendues de contraintes, l'équation (85) prend en compte leur interaction. Les équations (86) et (87) doivent également être satisfaites.

Dans les équations (83) et (84), le paramètre γ_{Mf} est le facteur partiel de résistance à la fatigue. Sa valeur dépend de la méthode utilisée pour la vérification et des conséquences de la ruine. Les deux méthodes proposées dans la norme sont la méthode de la tolérance de l'endommagement et la

méthode de la durée de vie sûre. La première doit être utilisée lorsqu'une procédure précise d'inspection et de maintenance est mise en place pour la durée de vie prévue. Au contraire, la seconde est appliquée si cette procédure n'est pas instaurée pour détecter les endommagements dus à la fatigue. En général, aucune procédure d'inspection des dommages dus à la fatigue n'est prévue pour les cheminées de la société Drever International S.A.. La méthode de la durée de vie sûre devrait donc être utilisée. Cependant, le programme développé laisse le choix à l'utilisateur de la méthode de vérification utilisée, ainsi que de l'importance des conséquences de ruine.

Les paramètres $\Delta\sigma_c$ et $\Delta\tau_c$ représentent la résistance à la fatigue correspondant à deux millions de cycles de chargement. Leur valeurs sont données dans la partie 1-9 de l'Eurocode 3 pour une série de détails constructifs typiques. Chaque détail est associé à une courbe de résistance liant l'étendue de contrainte au nombre de cycles de chargement, et est caractérisé par sa résistance à deux millions de cycles.

La fatigue se vérifie donc en des endroits précis de la structure, où une fissure est susceptible de se développer. Typiquement, les assemblages doivent être vérifiés. Cependant, étant donné que ce travail ne se concentre que sur l'enveloppe structurelle, les assemblages ne seront pas considérés. Les détails vérifiés sont les suivants : soudures liant les différentes parties d'un même tronçon, connexion du cintre au raidisseur placé au niveau des brides boulonnées, et passage d'un tronçon à l'autre au niveau des brides. La répartition exacte des contraintes entre le raidisseur et le cintre nécessiterait une analyse approfondie, qui ne sera pas réalisée dans le cadre de ce travail. Il a donc été décidé de considérer l'état de contrainte maximale pour le dernier détail de la liste ci-dessus, c'est-à-dire celui correspondant à une situation sans raidisseur. Le choix de la catégorie exacte des détails sera laissé à l'utilisateur, via l'entrée dans le programme de leur résistance à deux millions de cycles.

Le nombre de cycles de chargement à comparer au nombre maximal, représenté par la lettre N dans l'équation (85), est déterminé dans la partie 4.2.2 relative au calcul de l'action du vent dans la direction transversale à celle du vent.

$$\Delta\sigma^2 * N_{max} = \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \right)^3 * 2 * 10^6 \quad (83)$$

$$\Delta\tau^5 * N_{max} = \left(\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}} \right)^5 * 2 * 10^6 \quad (84)$$

$$\left(\frac{N}{N_{max}} \right)_s + \left(\frac{N}{N_{max}} \right)_t \leq 1 \quad (85)$$

$$\Delta\sigma \leq 1,5 * f_y \quad (86)$$

$$\Delta\tau \leq 1,5 * \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (87)$$

Dans le logiciel créé, seules les contraintes normales sont prises en compte dans la vérification à la fatigue. En effet, les contraintes de cisaillement sont largement inférieures aux contraintes normales. De plus, ce ne sont pas les contraintes en tant que telles mais les étendues de contraintes qui sont considérées ici. Ces dernières sont prises égales au double de la contrainte sous chargement statique, puisque la force alternera dans un sens puis dans l'autre, provoquant des contraintes négatives puis positives. La différence de grandeur entre les étendues de contraintes normales et de cisaillement est

donc d'autant plus marquée. Les ordres de grandeurs des contraintes normales et tangentielles pourront être examinés dans la partie 8 où le programme est appliqué à un exemple.

8. Utilisation du logiciel pour le cas d'étude

A présent que toutes les étapes du logiciel ont été expliquées, ce dernier va être utilisé pour la cheminée simple enveloppe présentée dans la partie cas d'étude. Ce chapitre est structuré de la même manière que l'organigramme présenté, c'est-à-dire de la même manière que le programme.

8.1. Paramètres d'entrée et modélisation

Les paramètres entrés dans le programme sont indiqués au Tableau 15. Le calcul sera effectué pour deux cas. Dans le premier, la cheminée est à l'état de service, c'est-à-dire que l'acier en contact avec les fumées est à haute température, tandis que dans le deuxième, la structure est supposée à température ambiante (présumée à 20°C). Ce dernier cas correspond à l'état de construction et de maintenance.

Tous les paramètres géométriques proviennent des plans de la cheminée, et ont été détaillés dans la section 1.2.1. Le facteur multiplicatif du poids est considéré constant sur toute la hauteur de la cheminée car les plans fournis pour ce cas d'étude ont été réalisés il y a de nombreuses années et ne donnaient pas accès au poids de tous les éléments séparément. L'explication du calcul de ce facteur est réalisée dans la section ci-dessous relative à l'évaluation du poids propre. Les paramètres relatifs au vent correspondent à un emplacement à Dunkerque (France), car c'est le lieu pour lequel la cheminée a été dimensionnée.

A l'aide de ces paramètres, la cheminée est modélisée par des éléments finis de type poutre de longueur variable. Puisque la structure est composée de quatre tronçons d'épaisseur différente, il a été décidé de découper chacun de ces tronçons en dix éléments, pour avoir une bonne précision. Ainsi, la limite entre deux tronçons d'épaisseur différente coïncide avec la limite entre deux éléments finis.

Paramètres	Valeurs
Nombre d'éléments	40
Longueurs des éléments	10 éléments de 0,98 m ; 10 éléments de 1 m ; 10 éléments de 0,97 m ; 10 éléments de 0,93 m.
Altitude d'entrée des fumées	19,8 m
Diamètre extérieur	1,6 m
Epaisseur des éléments	10 éléments d'épaisseur 10 mm ; 10 éléments d'épaisseur 8 mm ; 10 éléments d'épaisseur 7 mm ; 10 éléments d'épaisseur 5 mm.
Facteur multiplicatif du poids	1,02 pour tous les éléments
Température au niveau d'entrée des fumées	1 ^{er} cas : 300°C 2 ^{ème} cas : 20°C
Température au niveau de sortie des fumées	1 ^{er} cas : 80°C 2 ^{ème} cas : 20°C
Catégorie de terrain	0
Valeur de base de la vitesse de référence du vent	26 m/s
Rapport de la somme du poids de l'isolation et de la paroi sur le poids de la paroi	1
Classe de fiabilité	2
Nombre de passerelles	1
Surface des passerelles	7,2 m ²
Altitude des passerelles	35,9 m
Durée de vie prévue	30
Classe de qualité	B
Méthode d'évaluation de la fatigue	Durée de vie sûre
Conséquences de la ruine	Importantes
Catégorie du détail correspondant aux soudures	112
Catégorie du détail correspondant à l'attache du raidisseur de la bride au niveau de la coque	80
Catégorie du détail correspondant à l'attache de la coque et de la bride	71

Tableau 15 : Paramètres d'entrée du programme

8.2. Prise en compte des imperfections

Les imperfections globales sont intégrées dans l'analyse via l'ajout de forces équivalentes horizontales, obtenues par le produit d'une force verticale et d'un facteur d'imperfection. Pour l'exemple traité, le défaut global d'aplomb et le facteur d'imperfection sont obtenus aux équations (88) et (89).

Pour la charge répartie représentant le poids propre, il a été décidé de calculer une force équivalente d'imperfection par élément, et de la positionner au sommet de cet élément.

$$\Delta = \frac{H}{500} * \sqrt{1 + \frac{50}{H}} = \frac{38,8}{500} * \sqrt{1 + \frac{50}{38,8}} = 0,12 \text{ m} \quad (88)$$

$$\Phi_{\text{imp}} = \frac{\Delta}{H} = \frac{0,12}{38,8} = 3,03 * 10^{-3} \quad (89)$$

8.3. Poids propre

Le poids propre du cintre est calculé automatiquement par le logiciel BeamZ, mais il est multiplié par un facteur tenant compte des divers accessoires et passerelles. Le calcul de ce facteur pour l'exemple considéré est présenté aux équations (90), (91), et (92). Dans ces équations, le poids du cintre est calculé en prenant en compte l'augmentation du diamètre en base. En effet, le poids total avec accessoires est donné pour la cheminée réelle avec cet élargissement, et cela n'aurait donc pas de sens de comparer ce dernier au poids du cintre modifié. Toutefois, le poids du silencieux étant détaillé dans les plans, il a été retiré du poids total de la cheminée.

Poids du cintre

$$\begin{aligned} &= 7850 \\ &* \left[9,8 * \pi * \left(\frac{2,25^2}{4} - \frac{(2,25 - 2 * 0,01)^2}{4} \right) + 10 * \pi \right. \\ &* \left. \left(\frac{1,6^2}{4} - \frac{(1,6 - 2 * 0,008)^2}{4} \right) \right] + 7920 \\ &* \left[(3,7 + 6) * \pi * \left(\frac{1,6^2}{4} - \frac{(1,6 - 2 * 0,007)^2}{4} \right) + 9,3 * \pi \right. \\ &* \left. \left(\frac{1,6^2}{4} - \frac{(1,6 - 2 * 0,005)^2}{4} \right) \right] = 13\,091,26 \text{ kg} \end{aligned} \quad (90)$$

$$\text{Poids total avec équipements} = 13\,395,90 \text{ kg} \quad (91)$$

$$\xi = \frac{\text{Poids total avec équipements}}{\text{Poids des cintres}} = \frac{13\,395,90}{13\,091,26} = 1,02 \quad (92)$$

Le poids total de la cheminée considérée comme cas d'étude, c'est-à-dire après la modification du diamètre, vaut 11 754 kilogrammes.

8.4. Calcul du premier mode propre et de la première fréquence propre

La fréquence propre et le mode propre des cheminées sont calculés précisément grâce au programme BeamZ utilisant la méthode des éléments finis, et ce sont ces valeurs qui seront utilisées dans la suite du programme. Cependant, comme annoncé précédemment, l'Eurocode donne des formules permettant de déterminer une approximation de ces deux paramètres.

Les formules de l'Eurocode vont être confrontées aux résultats obtenus avec le logiciel BeamZ. Les fréquences propres obtenues par les deux méthodes sont présentes au Tableau 16, ainsi que l'erreur relative effectuée lorsque la formule est utilisée à la place de la valeur provenant de BeamZ. Les modes

propres sont représentés à la Figure 14. Une erreur de 17% est tout de même assez importante mais la forme du mode propre suit relativement bien celle donnée par BeamZ.

	Première fréquence propre [Hz]
Logiciel BeamZ	1,27
Formule Eurocode	1,05
Erreur relative	-17,32 %

Tableau 16 : Comparaison de la première fréquence propre calculée avec BeamZ et avec la formule de l'Eurocode

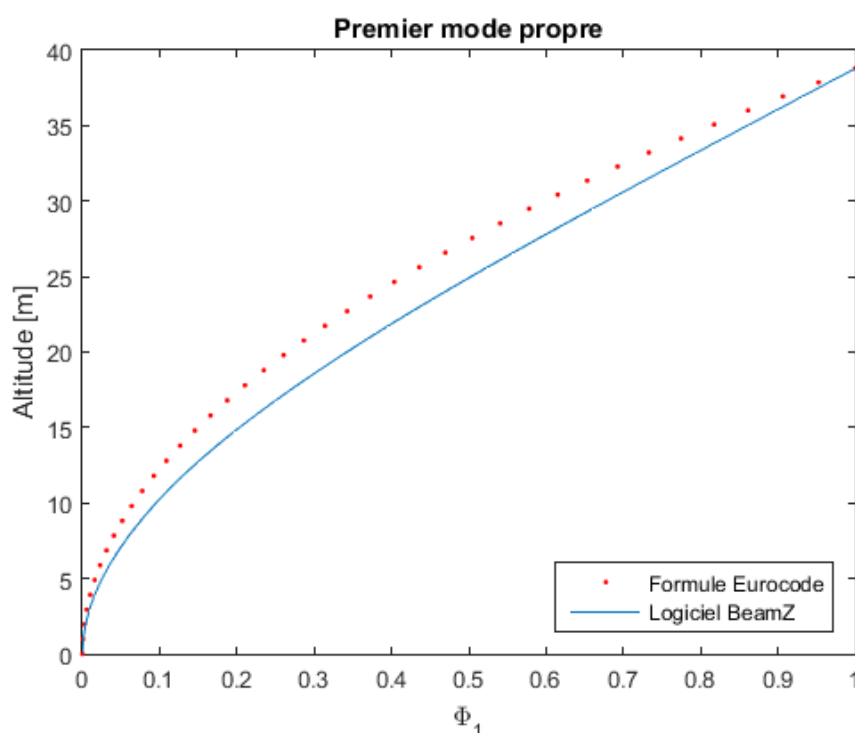


Figure 14 : Comparaison du premier mode propre calculé avec BeamZ et avec la formule de l'Eurocode

8.5. Charges de vent

8.5.1. Composante statique et composante dynamique dans la direction du vent

La première étape dans la détermination de la force équivalente du vent dans le sens longitudinal est le calcul de la pression dynamique de pointe. Les résultats obtenus pour ce paramètre sont présentés graphiquement à la Figure 15.

Il peut être observé sur cette figure que la pression est minimale près du sol et augmente avec la hauteur. Cette augmentation ralentit lorsque la hauteur augmente et la pression tend à se stabiliser vers une valeur constante. En général, un autre phénomène peut être observé sur l'évolution de ce paramètre en fonction de la hauteur : la pression est constante jusqu'à une hauteur minimale. En fait, cette hauteur correspond à la hauteur minimale prise en compte dans le calcul de la pression dynamique de pointe, via la catégorie de terrain. Elle reflète l'existence d'une pression induite par les turbulences du vent près du sol, à la base de la cheminée. D'ailleurs, plus le sol est rugueux et plus les turbulences sont importantes, ce qui implique que la hauteur minimale sera plus importante également. C'est la raison pour laquelle ce phénomène n'est pas visible sur la Figure 15, la catégorie de terrain utilisée correspond à une hauteur minimale très faible, inférieure à celle du second élément.

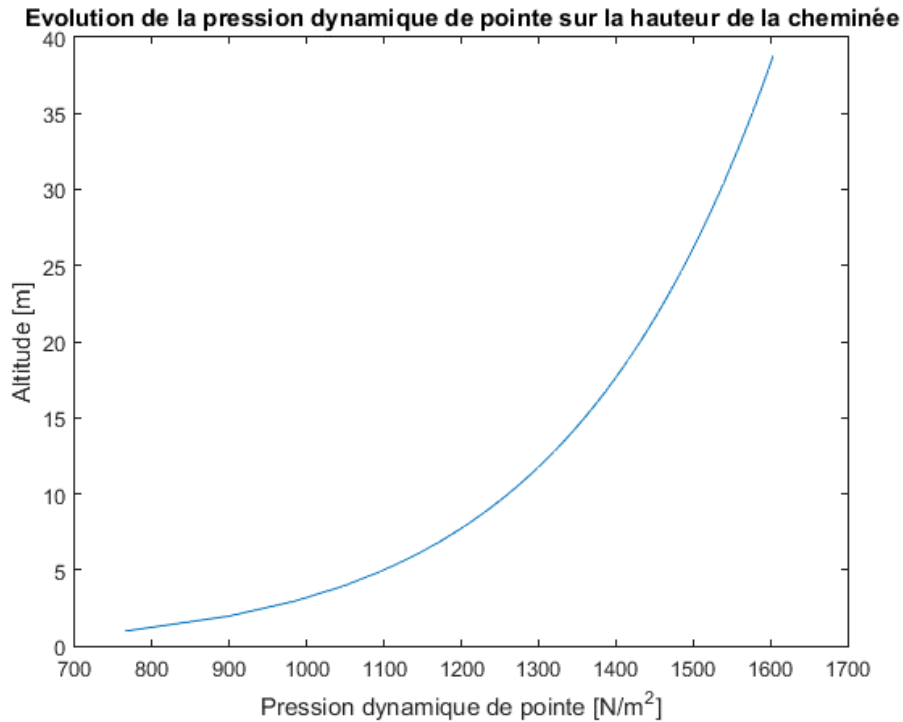


Figure 15 : Pression dynamique de pointe correspondant au cas d'étude

Ensuite, le coefficient de force est déterminé à l'aide du facteur de rugosité équivalente, de la vitesse de pointe du vent, et du nombre de Reynolds. Le facteur de rugosité équivalente est déterminé à l'équation (93). Les deux autres paramètres et le coefficient de force varient en fonction de la hauteur. Les intervalles de valeurs prises par ces paramètres sont présentés au Tableau 17, la valeur la plus faible correspondant au pied de la cheminée tandis que la valeur la plus élevée correspond à l'élément le plus haut. Le nombre de Reynolds permet de déterminer le régime d'écoulement. Dans ce cas, puisqu'il est très élevé, le régime est turbulent.

$$\frac{k}{D} = \frac{0,05}{1600} = 3,125 * 10^{-5} \quad (93)$$

Paramètres	Intervalles de valeurs
$v(z_e)[m/s]$	[35,00 – 50,66]
$Re [-]$	[3,73 – 5,40]*10 ⁶
$c_f [-]$	[0,47 – 0,49]

Tableau 17 : Résultats obtenus pour la vitesse de pointe du vent, le nombre de Reynolds, et le coefficient de force

Le paramètre suivant est le coefficient structural. Pour rappel, il est composé du coefficient de dimension et du coefficient dynamique. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 18. Comme il était attendu, sa valeur est proche de l'unité.

c_s	c_d	$c_s c_d$
0,93	1,13	1,05

Tableau 18 : Coefficient structural

A partir de la pression dynamique de pointe, du coefficient de force, du coefficient structural et de l'aire de référence de chaque élément, la force équivalente est calculée. Le Tableau 19 donne l'intervalle des valeurs prises par la force sur chaque tronçon et par mètre de hauteur.

Force équivalente	Force équivalente par mètre
$[0,59 - 1,23] \cdot 10^3 \text{ N}$	$[0,6 - 1,32] \cdot 10^3 \text{ N/m}$

Tableau 19 : Force équivalente

8.5.2. Composante dynamique dans la direction transversale

Cette composante de l'action du vent n'est à considérer que sous deux conditions. Dans l'exemple étudié, celles-ci sont vérifiées, comme indiqué aux équations (94) et (95).

$$\frac{H}{D} = \frac{38,8}{1,6} = 24,25 > 6 \quad (94)$$

$$v_{crit} = 11,29 \text{ m/s} < 1,25 * \max(v_m) = 48,01 \text{ m/s} \quad (95)$$

Puisque cette composante doit être prise en compte, la force équivalente est calculée. Pour rappel, celle-ci dépend de la masse en vibration de la construction par unité de longueur, de la fréquence propre, du mode propre, et du déplacement maximal caractéristique au point de plus grand déplacement. La masse de la construction est obtenue à partir des propriétés géométriques et mécaniques, tandis que la fréquence et le mode propre ont été discutés ci-avant.

Le déplacement maximal dépend de plusieurs facteurs, dont le nombre de Reynolds évalué à la vitesse critique et le nombre de Scruton. Les valeurs obtenues pour ces deux paramètres, ainsi que pour le déplacement maximal, sont présentées au Tableau 20.

$Re(v_{crit})$	S_c	y_{max}
$1,20 \cdot 10^6$	1,74	0,84 m

Tableau 20 : Déplacement maximal et paramètres intermédiaires à son calcul

Finalement, les intervalles de valeurs obtenus pour la force équivalente par élément, et pour la même force mais par mètre courant, sont présentés au Tableau 21.

Intervalle correspondant à la force équivalente par élément	Intervalle correspondant à la force équivalente par mètre courant
$[22 - 1,01 \cdot 10^4] \text{ N}$	$[22 - 1,09 \cdot 10^4] \text{ N}$

Tableau 21 : Forces équivalentes

8.6. Calcul des efforts internes et déplacements

A présent que toutes les forces agissant sur la structure sont évaluées, l'analyse peut être réalisée. Les efforts internes en base de la cheminée sont donnés, pour les trois combinaisons à l'état limite ultime considérées, au Tableau 22 (état de service) et au Tableau 23 (état de maintenance). Les efforts entre

les deux tableaux ne sont pas exactement identiques, mais la différence est faible et la température de l'acier ne joue donc pas un rôle fondamental dans l'analyse.

Combinaison	Effort axial [kN]	Effort tranchant [kN]	Moment [kNm]
ELU 1	-124,72	61,76	-1327,2
ELU 2	-144,88	0,49	-8,95
ELU 3	-124,72	288,94	-7844,7

Tableau 22 : Efforts internes en base (état de service)

Combinaison	Effort axial [kN]	Effort tranchant [kN]	Moment [kNm]
ELU 1	-124,72	61,69	-1325,8
ELU 2	-144,88	0,45	-8,93
ELU 3	-124,72	292,21	-7924,1

Tableau 23 : Efforts internes en base (état de maintenance)

Les déplacements au sommet de la cheminée obtenus pour les trois combinaisons à l'état limite de service sont présentés au Tableau 24. La différence entre ceux obtenus à l'état de service et ceux obtenus à l'état de maintenance est trop faible pour être considérée.

Combinaison	Déplacement au sommet [m]
ELS 1	0,14
ELS 2	10^{-3}
ELS 3	0,89

Tableau 24 : Déplacement au sommet de la cheminée

8.7. Classification

Il a été expliqué dans la partie « Vérifications » que le programme est réalisé pour des classes de section 4. Avant d'entrer réellement dans les vérifications de la cheminée, il est vérifié que ses différentes sections sont effectivement de classe 4. Les conditions de classement proviennent de l'Eurocode 3, partie 1-1 (Bureau de normalisation, 2005) et partie 1-4 (Bureau de normalisation, 2007). Les différentes sections sont effectivement de classe 4.

Les équations (96) et (97) correspondent aux sections se trouvant sous l'entrée des fumées, faites d'acier S235.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1 \quad (96)$$

$$\left(\frac{D}{t}\right) = \frac{1,6}{[10 - 8] * 10^{-3}} = [160 - 200] > 90 * \epsilon^2 = 90 \quad (97)$$

Les équations (98) à (100) correspondent aux sections se trouvant au-dessus de l'entrée des fumées, c'est-à-dire celles faites en acier inoxydable. Etant donné que le module de Young varie avec la

température, un intervalle de valeurs du paramètre ϵ est calculé, en prenant les deux valeurs extrêmes du module de Young.

$$\epsilon = \left(\frac{235}{f_y} * \frac{E}{2,1 * 10^5} \right)^{0,5} \quad (98)$$

$$\epsilon = \left(\frac{235}{200} * \frac{[1,85 - 1,62] * 10^5}{2,1 * 10^5} \right)^{0,5} = [1,02 - 0,95] \quad (99)$$

$$\left(\frac{D}{t} \right) = \frac{1,6}{[5 - 7] * 10^{-3}} = [320 - 228,6] > 90 * \epsilon_{max}^2 = [93,16 - 81,58] \quad (100)$$

8.8. Vérification d'ovalisation

L'ovalisation de la coque ne doit être considérée que si la vitesse critique d'ovalisation de la coque est supérieure à la vitesse moyenne du vent. La vitesse critique d'ovalisation de la coque dépend du diamètre, du nombre de Strouhal, et de la fréquence propre d'ovalisation. Les deux premiers paramètres sont déjà connus mais la fréquence propre doit être calculée. La formule permettant d'obtenir une valeur approchée de cette fréquence est différente suivant qu'il y a des raidisseurs ou non. Dans un premier temps, il est supposé qu'aucun raidisseur n'est présent.

La fréquence propre d'ovalisation varie en fonction de l'élément considéré car elle dépend de l'épaisseur et du module de Young. L'intervalle de fréquence obtenu sur la hauteur de la cheminée est présenté au Tableau 25.

Intervalle de fréquence propre d'ovalisation sans raidisseur	Vitesse critique
[9,68 – 4,66] Hz	[43,04 – 20,71] m/s

Tableau 25 : Fréquences propres d'ovalisation et vitesses critiques correspondantes

La Figure 16 représente simultanément la vitesse d'ovalisation de la coque, obtenue en considérant l'absence de raidisseur sur toute la hauteur de la cheminée, et la vitesse moyenne du vent, toutes deux en fonction de la hauteur. Cela permet d'identifier rapidement les zones pour lesquelles il est nécessaire d'ajouter des raidisseurs. En effet, il apparaît clairement que pour toute altitude supérieure à 14,8 mètres, la vitesse critique d'ovalisation de la coque est inférieure à la vitesse moyenne. Il y a alors un risque d'ovalisation.

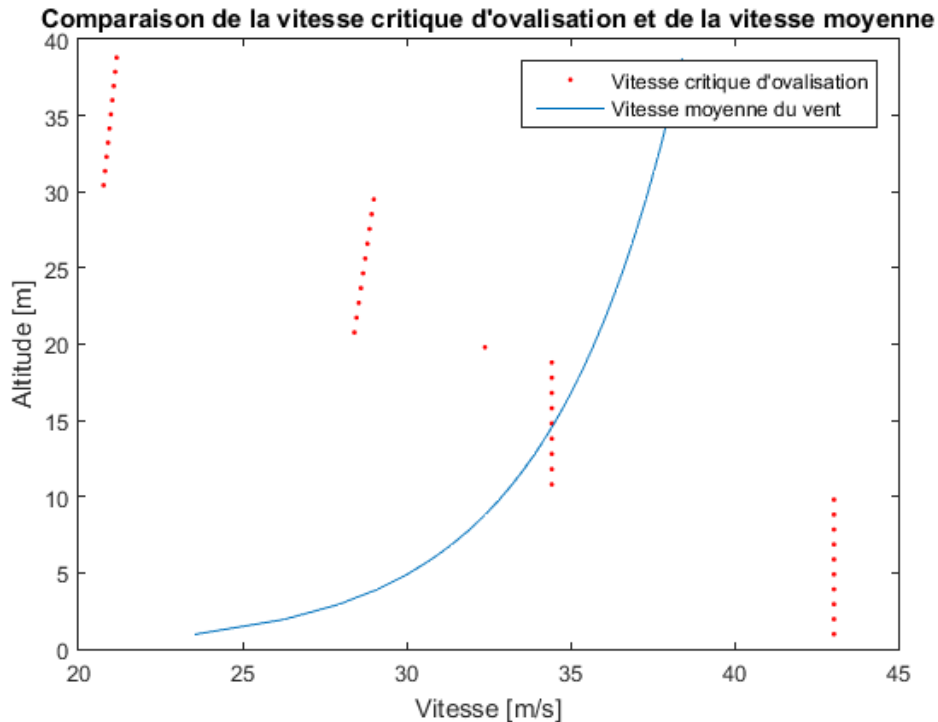


Figure 16 : Comparaison de la vitesse critique d'ovalisation sans raidisseur et de la vitesse moyenne du vent

Puisque l'ovalisation doit être considérée, des raidisseurs vont être ajoutés jusqu'à ce que la condition sur les vitesses soit satisfaite. Tout d'abord, les assemblages faits de brides boulonnées contribuent à raidir la coque, et vont donc être considérés comme des raidisseurs. Ensuite, si cela n'est toujours pas suffisant, des raidisseurs seront ajoutés. La Figure 17 compare les vitesses critiques d'ovalisation calculées sans raidisseur, celles obtenues en considérant les assemblages de brides boulonnées comme des raidisseurs, et la vitesse moyenne du vent. Cette figure montre qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter des raidisseurs supplémentaires.

Pour calculer la vitesse critique d'ovalisation en prenant en compte les raidisseurs, il a été nécessaire de déterminer la valeur du coefficient γ défini à l'équation (56). Pour le cas d'étude considéré, il n'y a pas d'isolation prévue, et il vaut donc l'unité.

Les valeurs présentées correspondent à l'état de service, pour lequel l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux est considéré. Cependant, les valeurs obtenues pour l'état de maintenance diffèrent si peu qu'il n'a pas été jugé nécessaire de les présenter ici.

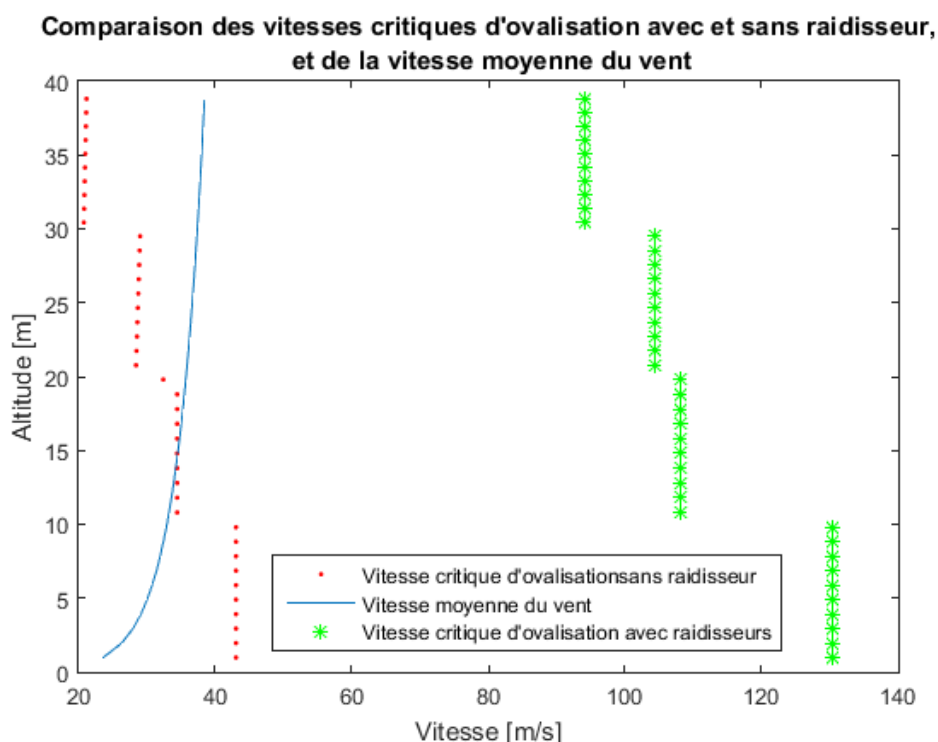


Figure 17 : Comparaison des vitesses critiques d'ovalisation avec et sans raidisseurs, et de la vitesse moyenne du vent

8.9. Etats limites de service

Deux états limites de service sont vérifiés par le programme : le déplacement en tête de cheminée dans la direction du vent, et celui dans la direction transversale engendré par les vibrations. Les déplacements obtenus après analyse de la structure, dans les deux directions en tête de cheminée, ainsi que les limites maximales, sont présentés au Tableau 26. Les valeurs calculées correspondent aux cas de charge de vent non combinés. Les déplacements dans la direction du vent sont inférieurs à la limite. Cependant, dans la direction transversale, ils la dépassent fortement. Des solutions permettant de réduire le déplacement dans la direction perpendiculaire au vent seront étudiées plus loin.

Déplacement dans la direction du vent		Déplacement dans la direction transversale au vent	
Calculé	Limite maximale	Calculé	Limite maximale
0,14	0,78	0,89	0,16

Tableau 26 : Déplacements dans la direction du vent et dans la direction transversale

8.10. Etats limites ultimes

8.10.1. Vérification de la résistance en section

Les contraintes obtenues, pour chaque combinaison à l'état limite ultime au pied de la cheminée et au niveau de l'ouverture par laquelle arrivent les fumées, sont données au Tableau 27 (état de service), au Tableau 28 (état de maintenance), au Tableau 29 (état de service) et au Tableau 30 (état de maintenance). Au niveau de la base de la cheminée, la contrainte de comparaison de Von Mises est supérieure à la limite élastique de calcul pour les combinaisons 3 (état de service et de maintenance), correspondant à la prise en compte du vent transversal. La section n'est donc pas vérifiée et il faut la renforcer. Au niveau de l'arrivée des fumées, la section est vérifiée malgré la grande ouverture à l'état

de maintenance mais pas à l'état de service. Cela montre l'importance de considérer l'influence de la température sur la résistance de l'acier.

Combinaison	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{VM} [MPa]	f_{yd} [MPa]
ELU 1	-69,75	-9,77	71,78	235
ELU 2	-3,35	-0,07	3,36	235
ELU 3	-400,05	-45,72	407,81	235

Tableau 27 : Contraintes en base de la cheminée (état de service)

Combinaison	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{VM} [MPa]	f_{yd} [MPa]
ELU 1	-69,68	-9,76	71,71	235
ELU 2	-3,35	-0,07	3,36	235
ELU 3	-404,08	-46,23	411,94	235

Tableau 28 : Contraintes en base de la cheminée (état de maintenance)

Combinaison	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{VM} [MPa]	f_{yd} [MPa]
ELU 1	-18,52	-2,53	18,99	87,05
ELU 2	-4,03	-0,02	4,03	87,05
ELU 3	-114,57	-16,2	117,96	87,05

Tableau 29 : Contraintes au niveau de l'ouverture (état de service)

Combinaison	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{VM} [MPa]	f_{yd} [MPa]
ELU 1	-18,51	-2,42	18,98	181,82
ELU 2	-4,03	-0,02	4,03	181,82
ELU 3	-115,49	-16,36	118,91	181,82

Tableau 30 : Contraintes au niveau de l'ouverture (état de maintenance)

8.10.2. Vérification au voilement

Le Tableau 31 (état de service), le Tableau 32 (état de maintenance), le Tableau 33 (état de service) et le Tableau 34 (état de maintenance) présentent les contraintes en base et au niveau de l'ouverture, ainsi que la contrainte résistante au voilement. A nouveau, c'est la troisième combinaison qui n'est pas vérifiée pour la section en base et pour la section au niveau de l'ouverture en état de service.

Combinaison	σ_{Ed} [MPa]	σ_{Rd} [MPa]
ELU 1	-69,75	-177,61
ELU 2	-3,35	-177,61
ELU 3	-400,05	-177,61

Tableau 31 : Contraintes en base de la cheminée (état de service)

Combinaison	σ_{Ed} [MPa]	σ_{Rd} [MPa]
ELU 1	-69,68	-177,61
ELU 2	-3,35	-177,61
ELU 3	-404,08	-177,61

Tableau 32 : Contraintes en base de la cheminée (état de maintenance)

Combinaison	σ_{Ed} [MPa]	σ_{Rd} [MPa]
ELU 1	-18,52	-77,65
ELU 2	-4,03	-77,65
ELU 3	-114,57	-77,65

Tableau 33 : Contraintes au niveau de l'ouverture (état de service)

Combinaison	σ_{Ed} [MPa]	σ_{Rd} [MPa]
ELU 1	-18,51	-140,84
ELU 2	-4,03	-140,84
ELU 3	-115,49	-140,84

Tableau 34 : Contraintes au niveau de l'ouverture (état de maintenance)

8.10.3. Vérification au flambement global élastique

Cette vérification s'effectue simplement en s'assurant que l'effort normal maximal est inférieur à la charge critique élastique de la structure. Cette charge vaut 14 634 kN à l'état de service et 16 388 kN à l'état de maintenance. Elle est donc largement supérieure à l'effort axial maximal valant 144,88 kN à l'état limite ultime (en service et en maintenance).

8.10.4. Vérification à la fatigue

Pour vérifier la structure à la fatigue, trois endroits sont considérés : la soudure environ 2 mètres au-dessus de la fondation, la connexion avec la bride boulonnée au niveau de l'assemblage des deux tronçons inférieurs, et la connexion avec le raidisseur au niveau de ce même assemblage. Les détails les plus proches de la fondation ont été choisis pour la vérification car c'est à cet endroit que les efforts sont les plus importants. Les courbes choisies pour ces trois détails sont respectivement la courbe 112, la 80 et la 71.

L'étendue de contrainte est considérée valoir le double de la contrainte calculée, puisque l'action va changer de direction et donc provoquer une contrainte de la même valeur mais de signe opposé. Les étendues de contraintes obtenues et le nombre de cycles maximal correspondant sont présentés au Tableau 35 (état de service) et au Tableau 36 (état de maintenance).

	Détail 1	Détail 2	Détail 3
Etendue de contrainte [MPa]	108,43	72,23	72,23
Nombre de cycles maximal	$8,96 \cdot 10^5$	$1,10 \cdot 10^6$	$7,72 \cdot 10^5$

Tableau 35 : Etendue de contraintes et nombre de cycles maximal (état de service)

	Détail 1	Détail 2	Détail 3
Etendue de contrainte [MPa]	109,62	72,99	72,99
Nombre de cycles maximal	$8,67 \cdot 10^5$	$1,07 \cdot 10^6$	$7,48 \cdot 10^5$

Tableau 36 : Etendue de contraintes et nombre de cycles maximal (état de maintenance)

Le nombre de cycles engendrés par l'action du vent sur la durée de vie prévue pour la structure est de $7,08 \cdot 10^7$ cycles (en service) et $7,03 \cdot 10^7$ cycles (en maintenance). Il est donc supérieur à tous les nombres de cycles maximaux des détails considérés. La structure n'est alors pas vérifiée à la fatigue.

8.11. Conclusion

L'étude de cette cheminée montre qu'elle ne résiste pas aux sollicitations imposées.

Concernant les états limites de service, le déplacement dans la direction perpendiculaire au vent est largement supérieur à la limite autorisée. Il est aussi beaucoup plus important que le déplacement dans la direction parallèle au vent, ce qui pose problème par rapport à l'hypothèse prise pour le calcul du coefficient structural nécessaire à la détermination de la force dans la direction du vent. En effet, la méthode utilisée est fondée sur l'hypothèse que « seules les vibrations dans la direction du vent selon le mode fondamental sont significatives, et la déformée de ce mode a un signe constant ». (Comité européen de normalisation, 2005)

Lors des vérifications aux états limites ultimes, il apparaît que tous les états posent problème, excepté le flambement élastique. De plus, c'est à chaque fois la même combinaison qui ne permet pas de vérifier les conditions, celle contenant l'effet des tourbillons de Von Karman.

Le nombre de cycles de chargement provoqués par le vent dans la direction transversale est également 10 à 100 fois trop important et la fatigue est donc critique.

Les résultats sont étonnants puisque cette cheminée est un projet réel déjà construit. Cependant, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été prises. Les bâtiments présents à proximité ont notamment été négligés, alors qu'ils auraient tendance à diminuer la force du vent. Mais la raison principale est sans doute que les normes européennes ont évolué au fil des années, particulièrement dans le dimensionnement au vent et dans la prise en compte des effets dynamiques. La norme utilisée dans ce travail date de 2005, alors que les plans de la cheminée étudiée ont été réalisés en 1997.

Il est alors plus que nécessaire de modifier la structure pour réduire les vibrations dues au détachement tourbillonnaire. Plusieurs solutions seront étudiées dans les paragraphes suivants. Notamment, l'Eurocode 1 partie 1-4 donne quelques pistes à suivre, tels que des dispositifs aérodynamiques ou d'amortissement. (Comité européen de normalisation, 2005) Cependant, il n'y a pas d'explications concernant ces dispositifs, la norme recommande de se tourner vers des spécialistes.

8.12. Pistes d'amélioration

La première possibilité pour réduire le déplacement maximal est de modifier la méthode de calcul. En effet, il a été expliqué au point 4.2.2 que deux méthodes sont proposées dans la norme, mais que la seconde est plus spécifique aux cheminées. Un travail de fin d'étude, réalisé en 2011 par P. Andreou, compare les deux méthodes proposées dans la norme pour une cheminée. Il apparaît clairement que la méthode plus générale donne un résultat très faible par rapport à celle spécifique aux cheminées.

En effet, le déplacement obtenu par la méthode 1 est de 1,006 mètre contre 2,671 mètres pour celui obtenu avec la méthode 2. (Andreou, 2011) Cependant, l'annexe nationale belge (Comission NBN E250 - E25001, 2010) indique que la première méthode sous-estime fortement les amplitudes des vibrations perpendiculaires au vent, et interdit son utilisation en Belgique. Un autre article a également étudié les différences obtenues entre les deux méthodes, il s'agit de « Cross-wind vibrations of steel chimneys – A new case history » de J.Kawecki et J.A. Zuranski. Dans cet article, un graphique représente les résultats obtenus en fonction du nombre de Scruton. Il apparaît que pour des nombres de Scruton faibles, le déplacement obtenu avec la première méthode est trois à quatre fois inférieur que celui obtenu avec la seconde. Mais, pour des nombres de Scruton supérieurs à dix, la différence devient négligeable. Ce document considère également les résultats de la première méthode comme des sous-estimations, après avoir étudié le comportement réel d'une cheminée et l'avoir comparé avec les calculs. (Kawecki, et al., 2007) Cette solution pourrait donc permettre de réduire le déplacement maximal, mais n'est pas pertinente étant donné l'insécurité qu'elle amène. C'est pourquoi elle ne sera pas étudiée en détail dans ce travail.

Ensuite, la section résistante a été modifiée pour chercher des dimensions qui permettent de satisfaire toutes les vérifications. La première configuration étudiée est d'augmenter l'épaisseur. Pour cela, une épaisseur constante sur toute la hauteur est considérée. La résistance la plus difficile à obtenir est celle à la fatigue, elle requiert une épaisseur de 40 millimètres, ce qui est bien au-delà de la gamme acceptable. Si l'épaisseur est maintenue identique à la configuration de base, le diamètre est alors augmenté jusqu'à ce que tous les critères soient satisfaits. Le diamètre nécessaire est de 3,4 mètres, ce qui est également excessif. Ce diamètre permet en fait d'obtenir une vitesse critique assez élevée que pour ne plus considérer les effets des tourbillons de Von Karman. Faire varier les deux paramètres en même temps ne permet pas d'obtenir un dimensionnement plus raisonnable satisfaisant les vérifications.

Ces modifications de section mettent en avant une incohérence de la méthode de calcul proposée dans la norme. En effet, la partie 1-4 de l'Eurocode 1 (Comité européen de normalisation, 2005) conseille de ne considérer les effets des tourbillons de Von Karman que lorsque la vitesse critique est inférieure à 1,25 fois la vitesse moyenne du vent. Cela signifie que lorsque l'on passe d'un côté à l'autre de cette condition, une force apparaît ou disparaît. Cependant, la transition ne se fait pas de manière douce, la force apparaissant lorsque la condition sur la vitesse critique est tout juste satisfaite est très importante. Par exemple, lorsque le diamètre du cas d'étude est augmenté à 3,3 mètres, la force représentant l'effet des tourbillons de Von Karman vaut 169,99 kN au sommet de la cheminée, alors qu'elle passe à 0 lorsque le diamètre vaut 3,4 mètres.

La troisième solution envisagée est d'ajouter des dispositifs aérodynamiques pour casser les tourbillons, comme conseillé dans la partie 1-4 de l'Eurocode 1. Etant donné que cette partie de la norme ne donne pas d'explications pour ces dispositifs, l'annexe nationale belge correspondante (Comission NBN E250 - E25001, 2010) est utilisée car elle apporte des précisions sur la manière de les considérer dans le calcul. Ces solutions ne sont évidemment pas générales puisqu'elles sont spécifiques à la Belgique, mais permettent de tester ces pistes pour l'amélioration du comportement de la structure sous les sollicitations dynamiques. Ceci ne sera donc pas intégré au code de calcul développé, c'est une modification que l'utilisateur devra faire lui-même. Lorsque ces dispositifs aérodynamiques sont ajoutés, sur le tiers supérieur de la cheminée, le coefficient de force intervenant dans le calcul de la force dans la direction du vent doit être augmenté à 1,4 sur cette même hauteur.

Le premier dispositif aérodynamique proposé par l'annexe nationale belge pour diminuer les vibrations d'un facteur 4 environ consiste à placer trois ailettes hélicoïdales en relief d'une hauteur de 0,09 fois le diamètre et de pas égal à 5 fois le diamètre. Cette situation est représentée sur le côté

gauche de la Figure 18. Le deuxième dispositif se compose de quatre ailettes verticales, à 90° l'une de l'autre, en relief d'une hauteur de 0,09 fois le diamètre par segment de cylindre de longueur comprise entre 0,75 fois le diamètre à 0,9 fois le diamètre. Les ailettes d'un segment doivent être décalées de 30° par rapport au précédent. Cela permet de réduire les oscillations d'un facteur 3 environ. Cette dernière solution est présentée sur le côté droit de la Figure 18. (Comission NBN E250 - E25001, 2010)

Etant donné le déplacement obtenu correspondant à la combinaison prenant en compte les effets du vent dans la direction transversale, le diviser par 3 ou 4 n'est pas suffisant pour respecter la limite. En plus d'ajouter les ailettes hélicoïdales qui permettent une diminution maximale, la section de la cheminée va donc également être modifiée.

Cependant, malgré les modifications de section, il n'est pas possible de respecter le déplacement limite en restant dans des dimensions raisonnables. Lorsque l'épaisseur est augmentée à une valeur constante sur la hauteur de 20 mm et que trois ailettes hélicoïdales sont ajoutées, le déplacement est encore de 0,18 m. Si c'est le diamètre qui est modifié, il faut en fait le diminuer pour que le déplacement soit également réduit. Cependant, il n'est pas possible de le diminuer car c'est déjà le diamètre minimum, imposé par les conditions d'utilisation.

La dernière solution pour obtenir une cheminée qui résiste est de placer un amortisseur. Pour l'exemple considéré, c'est cette solution qui doit être choisie puisqu'aucune des autres solutions considérées ci-dessus ne fonctionne. C'est aussi la conclusion à laquelle sont arrivés plusieurs auteurs ayant étudié le comportement au vent des cheminées métalliques. Notamment, dans l'article « Cross-wind vibrations of steel chimneys—A new case history » (Kawecki, et al., 2007), et dans le rapport « Dynamic Behaviour under Wind Loading of a 90 m Steel Chimney » (Tranvik, et al., 2002), les auteurs concluent également qu'un amortisseur est nécessaire pour diminuer les vibrations dans le sens perpendiculaire au vent.

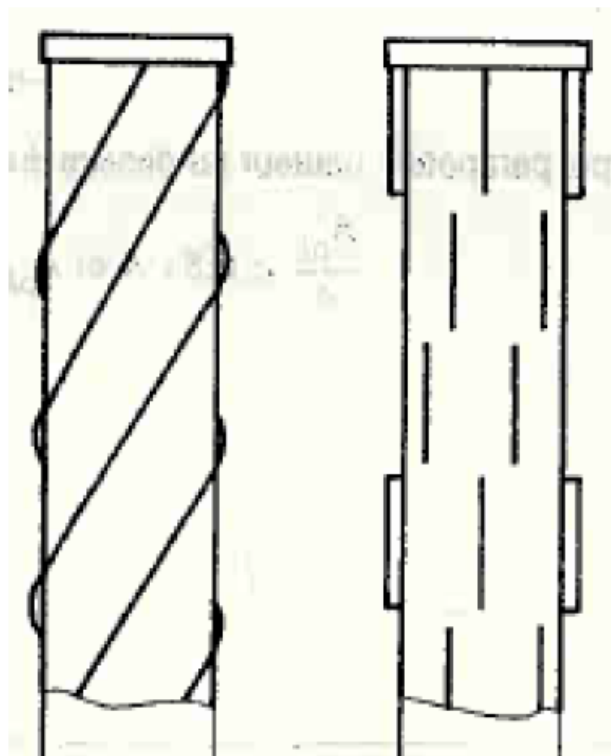


Figure 18 : Deux solutions permettant de réduire les vibrations perpendiculaires au vent (Comission NBN E250 - E25001, 2010)

9. Etudes paramétriques

L'objectif de cette section est d'étudier l'influence de deux paramètres sur le dimensionnement. Pour cela, des variations vont leur être imposées pour mettre en évidence les modifications engendrées. Ces deux paramètres sont le diamètre et l'épaisseur. Leurs effets seront analysés sur le poids de la cheminée, les efforts internes transmis à la fondation, et les déplacements. Les efforts et déplacements considérés sont ceux correspondant aux combinaisons intégrant les effets du vent, dans la direction parallèle et perpendiculaire à celle du vent, à l'état limite ultime pour les efforts et à l'état limite de service pour les déplacements.

La configuration de base, à partir de laquelle les deux paramètres seront tour à tour modifiés, est celle du cas d'étude traité ci-dessus. Les paramètres d'entrée du programme utilisés seront donc identiques à ceux du Tableau 15, hormis la valeur du ou des paramètres étudiés.

Il est maintenant connu que la cheminée dans cette configuration ne résiste pas aux sollicitations induites par les tourbillons de Von Karman. Cependant, elle est tout de même utilisée pour étudier les effets d'une variation de diamètre ou d'épaisseur puisque seul l'ajout d'un amortisseur permettrait de respecter les vérifications, et que cela n'est pas intégré dans le programme. De plus, le fait que la cheminée ne résiste pas n'empêche en aucun cas d'analyser les variations de poids, efforts internes et déplacements.

Le Tableau 37 rappelle le poids total, les efforts en base, et les déplacements en tête obtenus pour le cas d'étude dans sa configuration initiale. La première ligne correspond aux combinaisons intégrant l'effet du vent dans sa direction, et la deuxième, aux combinaisons considérant les effets des tourbillons de Von Karman.

Configuration initiale					
	Poids [kg]	Efforts axiaux [kN]	Efforts tranchants [kN]	Moments [kNm]	Déplacements en tête [m]
1	11 753,59	-124,72	61,76	-1 327,2	0,14
2		-124,72	288,94	-7 844,7	0,89

Tableau 37 : Poids de la cheminée, efforts en base et déplacements en tête dans la configuration initiale

9.1. Influence du diamètre

Pour cette première étude paramétrique, le diamètre est modifié par pas de 0,2 mètre. La valeur initiale est de 1,6 mètre et elle est augmentée jusqu'à 3,6 mètres. Le diamètre minimal de 1,6 mètre est imposé par les conditions d'utilisation. Le diamètre maximal est exagérément grand mais il a été choisi pour mettre en évidence le passage de la condition de prise en compte du vent dans la direction transversale.

La Figure 19 présente l'évolution du poids et des efforts en base de la cheminée en fonction du diamètre. Le poids et les efforts internes ont été normalisés à partir de leur valeur correspondant au diamètre de la configuration de base. Les efforts sont ceux obtenus pour la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 20 représente l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction du diamètre. Le déplacement représenté est celui correspondant à la combinaison à l'état limite de service prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 21 présente également l'évolution du poids et des efforts en base normalisés, en fonction du diamètre. Cependant, les efforts correspondent cette fois à la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet des tourbillons de Von Karman.

La Figure 22 montre l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction du diamètre, correspondant à la combinaison à l'état limite de service intégrant l'effet du vent dans la direction perpendiculaire.

Tout d'abord, sur la Figure 19 et la Figure 21, il peut être observé que le poids augmente avec le diamètre. Cela est évidemment logique puisque la section augmente. L'effort normal évolue de la même manière que le poids puisqu'il ne dépend que du poids et de la charge d'exploitation, qui reste constante.

Sur la Figure 19, il apparaît également que le moment et l'effort tranchant augmente linéairement avec le diamètre. Ces efforts sont liés à la force de vent dans la direction parallèle à celle du vent et aux forces équivalentes représentant les imperfections. Pour rappel, la force de vent se calcule à l'aide de l'équation (101). Le coefficient structural et le coefficient de force sont légèrement impactés par la variation de diamètre, mais de manière non significative. La pression dynamique de pointe est indépendante de ce paramètre et reste donc constante quelle que soit sa valeur. Enfin, l'aire de référence est définie comme le produit du diamètre par la longueur du tronçon considéré. Elle varie donc linéairement avec le diamètre et c'est ce paramètre qui engendre des variations importantes de la force de vent. Les forces horizontales équivalentes représentant les imperfections augmentent également, proportionnellement au poids.

$$F_{w1} = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (101)$$

Concernant les déplacements induits par ces forces, la Figure 20 montre qu'ils diminuent lorsque le diamètre augmente. Cela peut paraître étonnant puisqu'il vient d'être expliqué que les forces appliquées augmentaient. Cependant, la raideur de la structure est beaucoup plus importante, ce qui compense largement ces augmentations.

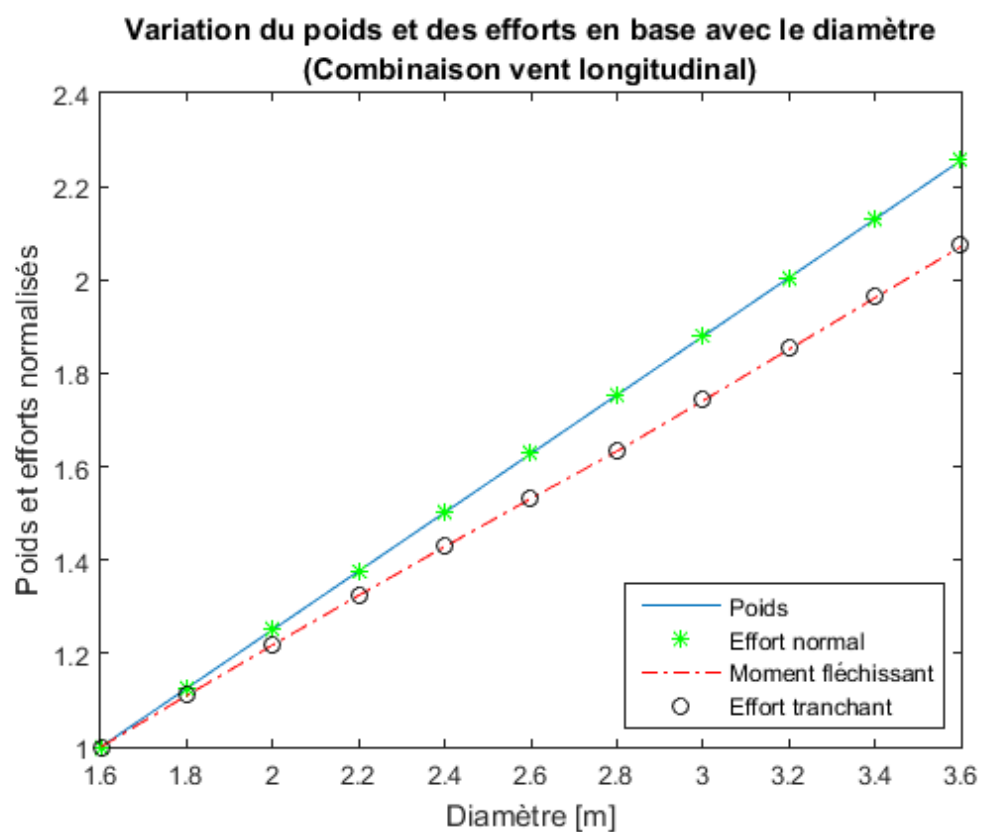


Figure 19 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction du diamètre

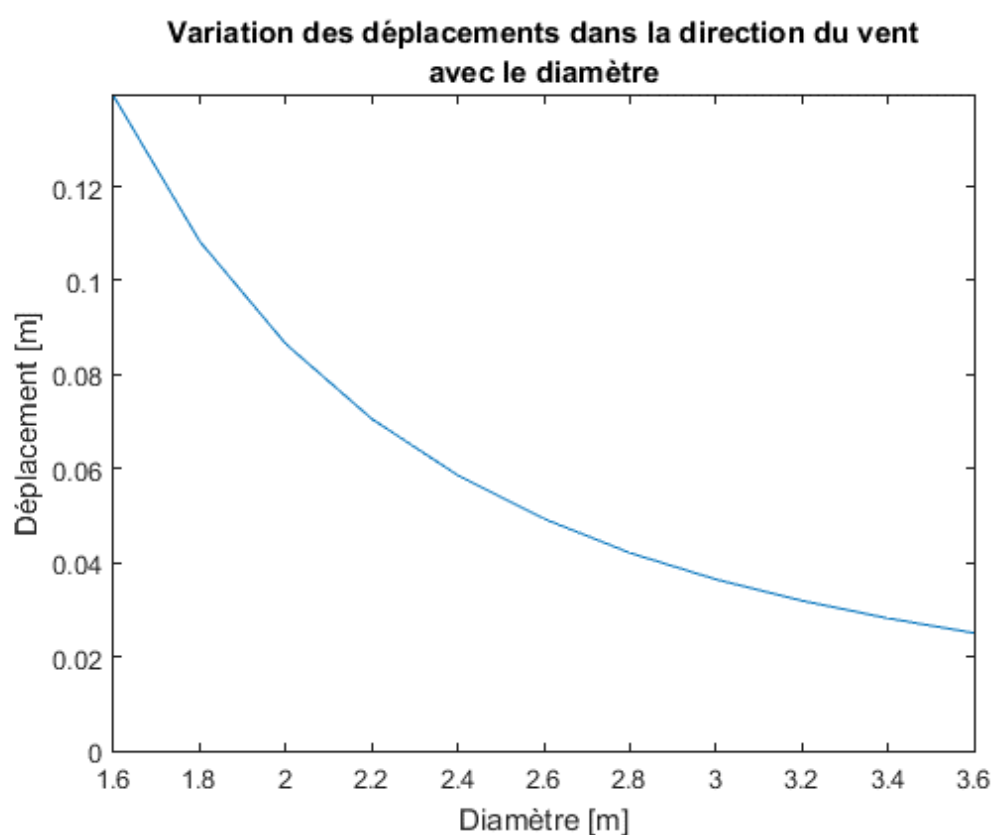


Figure 20 : Déplacements en tête en fonction du diamètre

La Figure 21 et la Figure 22 montrent que le comportement de la structure dans la direction perpendiculaire au vent s'adapte de manière complètement différente à l'augmentation du diamètre.

Sur la Figure 22, l'augmentation du poids et de l'effort normal (sur la première partie de la figure) est identique à celle de la Figure 20. En effet, seules les forces horizontales considérées sont différentes entre ces deux figures, il n'y a donc aucune raison que cela change.

Sur cette même figure, les trois efforts internes deviennent brusquement nuls, entre les diamètres 3,2 et 3,4 mètres. En fait, le diamètre intervient dans le calcul de la vitesse critique, qui augmente donc aussi. Si les efforts tombent à zéro, c'est parce que, au passage entre ces deux valeurs du paramètre étudié, la vitesse critique devient supérieure à 1,25 fois la vitesse moyenne. Lorsque cette condition est remplie, la norme recommande de ne pas tenir compte des effets des tourbillons de Von Karman, et c'est ce qui a été implémenté dans le programme. L'effort normal devient nul également car le logiciel ne prend plus en compte la combinaison considérée puisque son action principale n'existe plus.

Cependant, avant d'atteindre cette limite, le moment de flexion et l'effort tranchant augmentent fortement. Cela est surprenant puisqu'ils augmentent jusqu'à un peu plus de 16 fois leur valeur initiale avant que la combinaison ne soit plus considérée. Cette incohérence de la méthode Eurocode a déjà été évoquée au point 8.12. Cela est dû au fait que, lorsque le diamètre augmente, le nombre de Scruton diminue. Cela reflète une plus grande sensibilité aux vibrations et donc la force de vent équivalente et le déplacement maximal augmentent. La Figure 22 montre effectivement une augmentation du déplacement maximal, jusqu'à ce que la condition sur les vitesses soit satisfaite. Alors, les effets des tourbillons de Von Karman ne sont plus considérés et le déplacement est supposé nul.

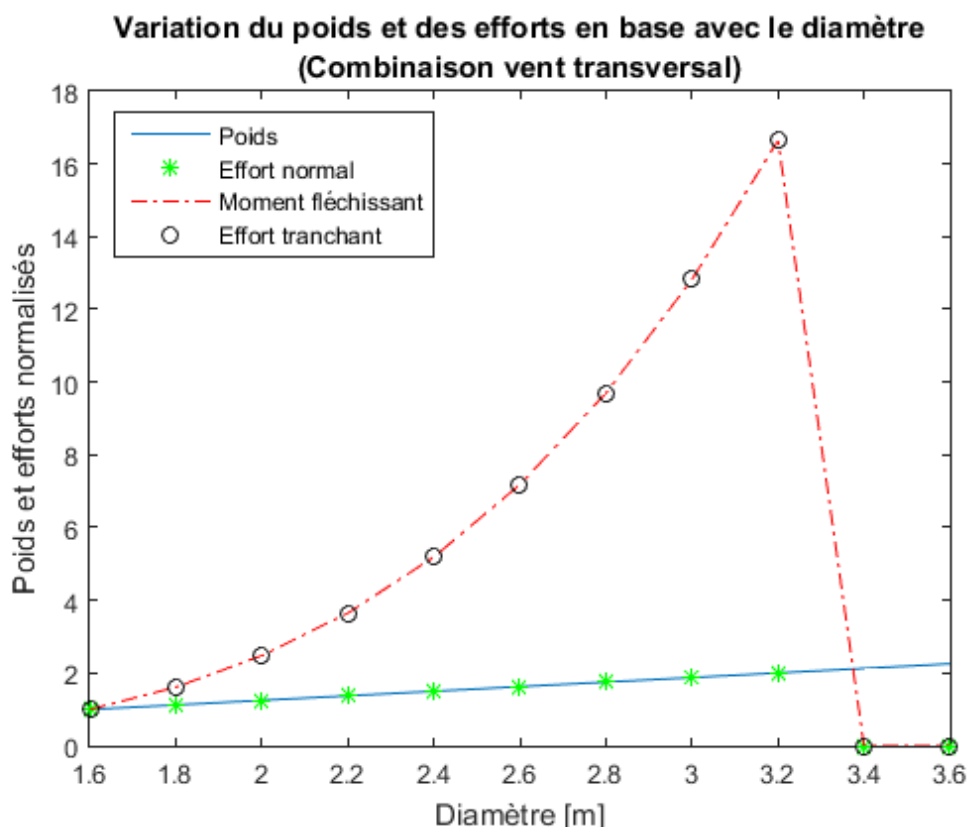


Figure 21 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction du diamètre

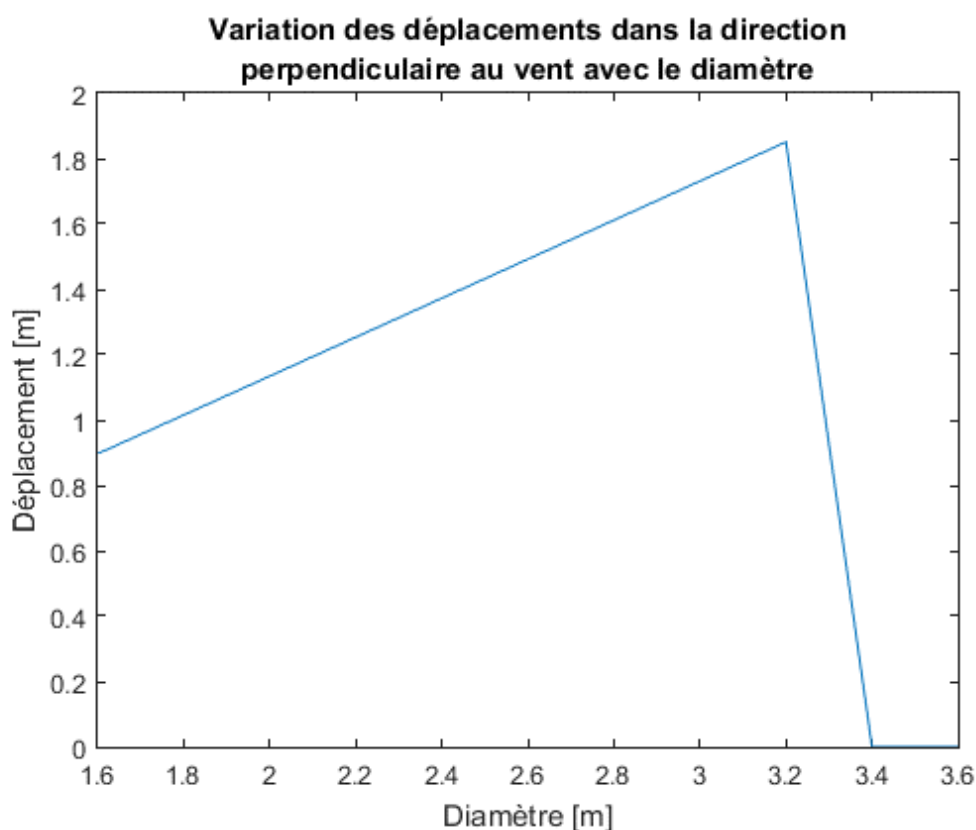


Figure 22 : Déplacements en tête en fonction du diamètre

9.2. Influence de l'épaisseur

Pour analyser l'influence de l'épaisseur, deux cas sont considérés : épaisseur constante sur toute la hauteur, et épaisseur variable par tronçons. De manière à rester réaliste, des bornes minimales et maximales sont fixées. L'épaisseur ne sera donc pas prise inférieure à 5 millimètres, ni supérieure à 20 millimètres.

9.2.1. Epaisseur constante sur la hauteur

Les épaisseurs considérées varient de 5 millimètres à 20 millimètres par pas de 5 millimètres. Cette configuration étant différente du cas d'étude, le poids, les efforts internes en base et les déplacements en tête, obtenus avec les combinaisons prenant en compte les effets du vent dans les deux directions, sont présentés au Tableau 38 pour une cheminée d'épaisseur constante de 5 millimètres.

Configuration à épaisseur constante de 5 millimètres					
	Poids [kg]	Efforts axiaux [kN]	Efforts tranchants [kN]	Moments [kNm]	Déplacements en tête [m]
1	7 819,41	-83,32	61,88	-1 330,9	0,25
2		-83,32	149,88	-4 277,2	0,90

Tableau 38 : Poids de la cheminée, efforts en base et déplacements en tête dans la configuration à épaisseur constante

La Figure 23 présente l'évolution du poids et des efforts en base de la cheminée en fonction de l'épaisseur. Le poids et les efforts internes ont été normalisés à partir leur valeur correspondant à une

épaisseur de 5 millimètres. Les efforts sont ceux obtenus pour la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 24 représente l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction de l'épaisseur. Le déplacement représenté est celui correspondant à la combinaison à l'état limite de service prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 25 présente également l'évolution du poids et des efforts en base normalisés, en fonction de l'épaisseur. Les efforts correspondent cette fois à la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet des tourbillons de Von Karman.

La Figure 26 montre l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction de l'épaisseur, correspondant à la combinaison à l'état limite de service intégrant l'effet du vent dans la direction perpendiculaire.

La Figure 23 et la Figure 25 montrent que le poids et l'effort normal augmentent avec l'épaisseur. A nouveau, cela était attendu puisque la section augmente, et donc aussi la quantité de matière utilisée.

La variation du moment et de l'effort tranchant sur la Figure 23 est très faible, par rapport à celle du poids et de l'effort normal mais aussi par rapport à celle provoquée par une variation du diamètre (pour une variation de poids égale). Bien sûr, puisque le poids augmente, les forces horizontales équivalentes prenant en compte les imperfections vont aussi augmenter et donc provoquer un moment et un effort tranchant plus important. Cependant, l'augmentation de ces efforts provoqués par la variation de diamètre était principalement due à l'augmentation de la force de vent. Dans ce cas, l'épaisseur influence très peu cette force. En effet, ni le coefficient de force, ni la pression dynamique de pointe, ni l'aire de référence ne sont modifiés. Seul le coefficient structural est influencé par l'épaisseur mais cela reste très faible.

La Figure 24 montre une diminution du déplacement en tête en fonction de l'épaisseur. En effet, non seulement la raideur de la structure augmente grâce à l'apport de matière, mais en plus les forces horizontales n'augmentent que faiblement.

Concernant le comportement dans la direction perpendiculaire au vent, la Figure 25 montre une augmentation du moment et de l'effort tranchant en base de la cheminée et la Figure 26, une diminution du déplacement en tête. L'accroissement des efforts est cependant beaucoup plus faible que lorsque le diamètre variait. En effet, l'augmentation de l'épaisseur provoque une augmentation de la masse en vibration de la construction, ce qui implique un nombre de Scruton plus important, et donc un déplacement maximal inférieur. La force équivalente de vent dans cette direction s'intensifie tout de même à cause de l'accroissement de la section. Cela est cependant beaucoup moins marqué que lors de la variation de diamètre puisque, dans le cas présent, le déplacement diminue. Il faut également noter qu'en augmentant l'épaisseur, la fréquence propre diminue, ce qui engendre une vitesse critique plus faible. Aussi, plus l'épaisseur est importante, plus l'on s'éloigne de la condition permettant de négliger les effets des tourbillons de Von Karman.

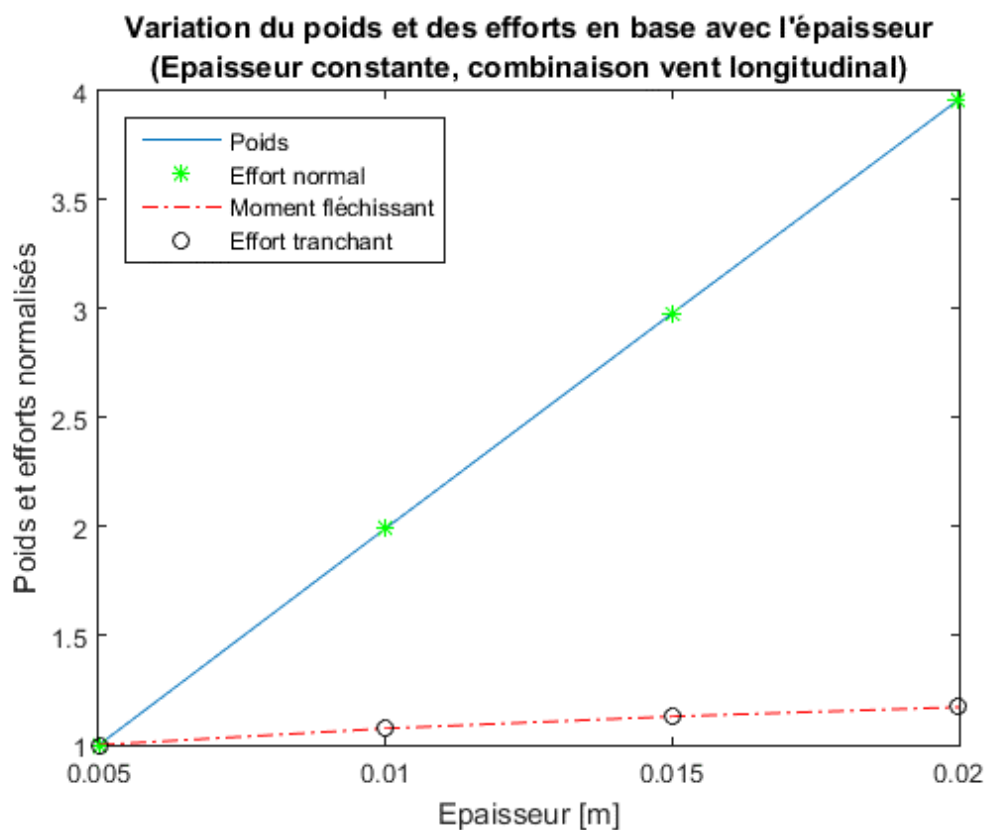


Figure 23 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur

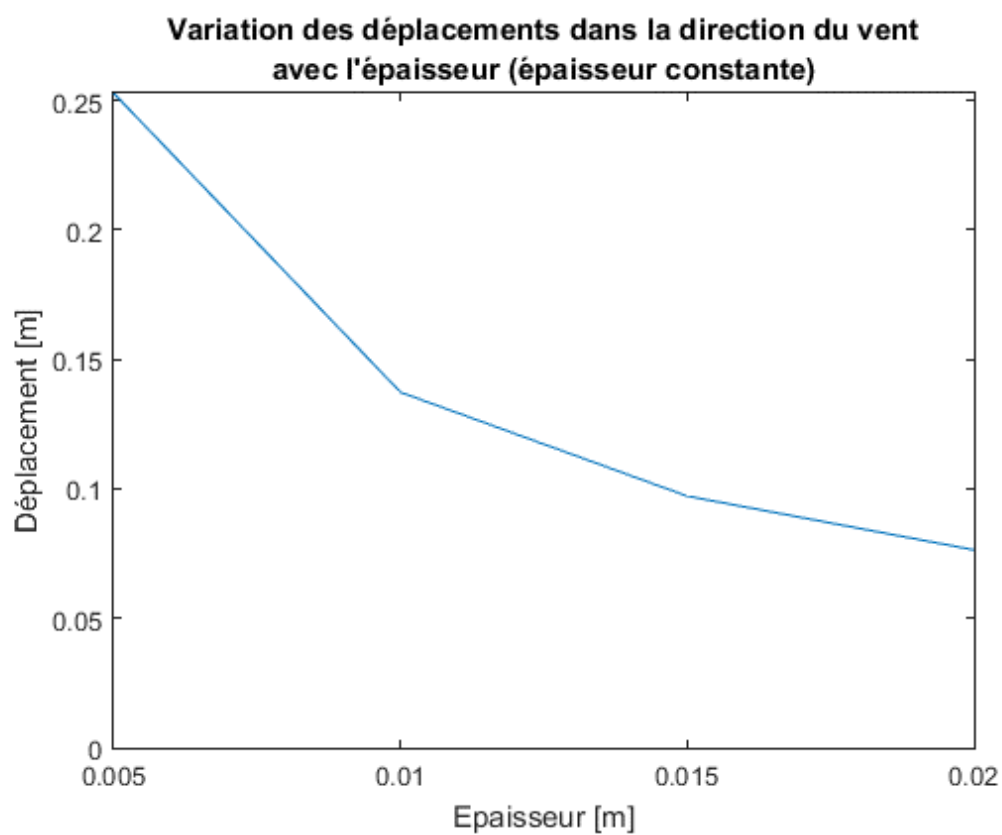


Figure 24 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur

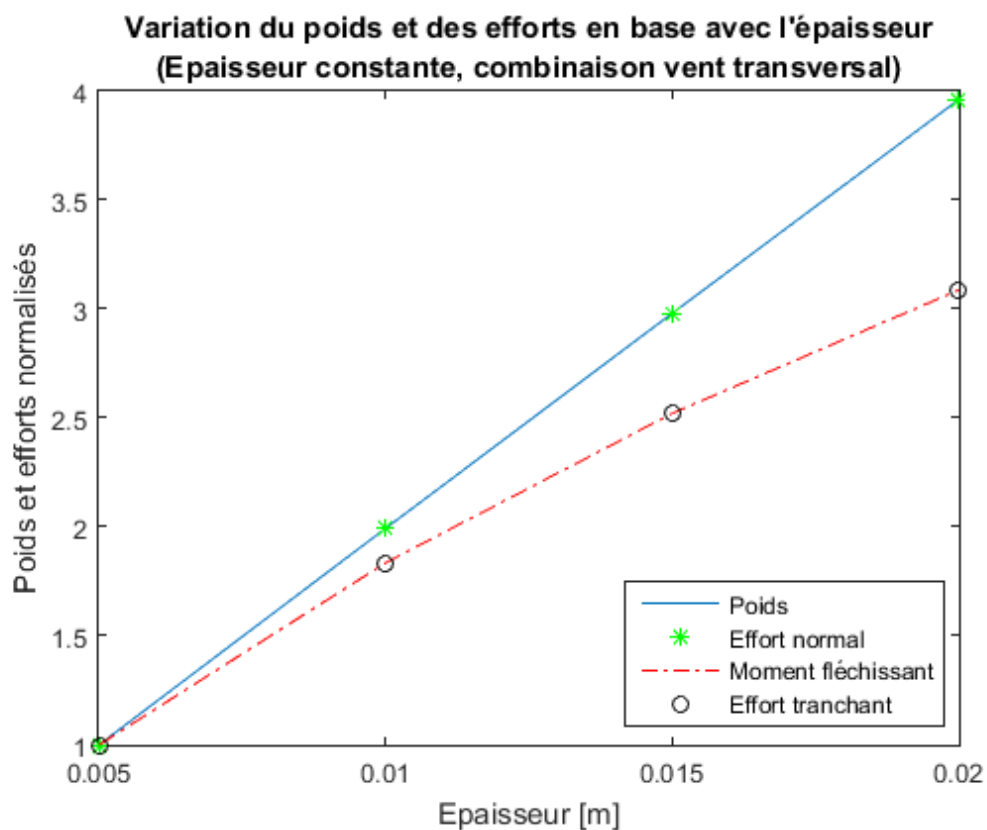


Figure 25 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur

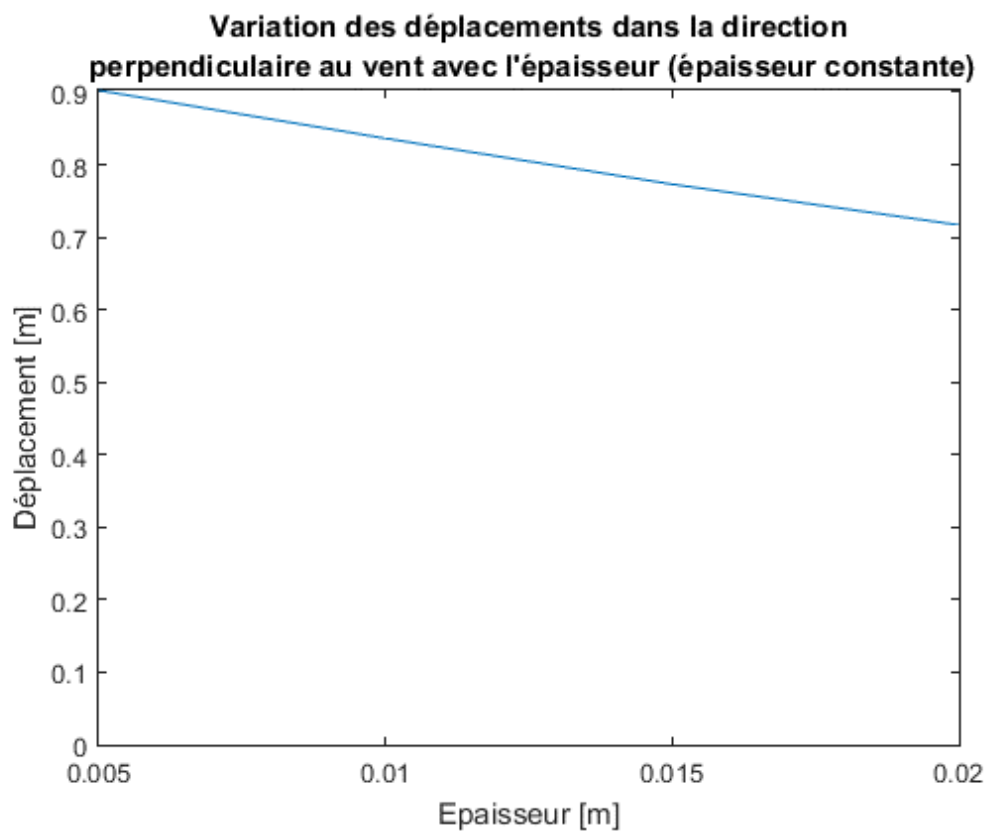


Figure 26 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur

9.2.2. Epaisseur variable par tronçons

Dans cette section, les proportions de l'épaisseur par rapport aux tronçons du cas d'étude sont gardées identiques. Pour les faire varier, l'épaisseur de chaque tronçon sera multipliée par un même facteur. Celui-ci varie de 0,5 à 2 par pas de 0,5. Bien sûr, lorsque cela donne une épaisseur inexistante en pratique de tôle d'acier, elle devrait normalement être arrondie à la valeur supérieure. L'épaisseur du tronçon supérieur valant initialement 5 millimètres, la diviser par deux mène à une valeur sous la limite inférieure raisonnable fixée précédemment. Cependant, cette configuration est tout de même étudiée dans un but d'analyse, pour permettre d'obtenir une gamme de variation plus importante.

La Figure 27 présente l'évolution du poids et des efforts en base de la cheminée en fonction du facteur multiplicatif de l'épaisseur. Le poids et les efforts internes ont été normalisés à partir de leur valeur correspondant à un facteur multiplicateur de 0,5. Les efforts sont ceux obtenus pour la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 28 représente l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction du facteur multiplicatif de l'épaisseur. Le déplacement représenté est celui correspondant à la combinaison à l'état limite de service prenant en compte l'effet du vent dans sa direction.

La Figure 29 présente également l'évolution du poids et des efforts en base normalisés, en fonction du facteur multiplicatif de l'épaisseur. Les efforts correspondent cette fois à la combinaison à l'état limite ultime prenant en compte l'effet des tourbillons de Von Karman.

La Figure 30 montre l'évolution du déplacement en tête de la cheminée en fonction du facteur multiplicatif de l'épaisseur, correspondant à la combinaison à l'état limite de service intégrant l'effet du vent dans la direction perpendiculaire.

Les résultats obtenus sur ces quatre figures sont semblables à ceux obtenus lorsque l'épaisseur est considérée constante sur toute la hauteur. Les différences observées entre ces deux cas vont alors être mises en avant.

Tout d'abord, le principal avantage de faire varier l'épaisseur sur la hauteur est de diminuer le poids total de la cheminée, tout en conservant une section résistante en base plus importante. Par exemple, lorsque l'épaisseur en base désirée est de 10 millimètres, le poids obtenu dans une configuration avec épaisseur constante est de 15 589,79 kg, contre 11 753,59 kg pour la configuration à épaisseur variable. Ces deux configurations permettent de satisfaire les vérifications, sauf pour les combinaisons prenant en compte les effets du vent dans la direction transversale. Cette diminution de poids implique une diminution des efforts, et facilite donc les vérifications en résistance.

La Figure 28 montre que les déplacements obtenus lorsque l'épaisseur est variable sont légèrement supérieurs à ceux de la Figure 24, correspondant à une épaisseur constante. Evidemment, cela est dû au fait que la raideur de la structure est plus importante dans le cas d'épaisseur constante puisque la cheminée ne s'affine pas en haut. Toutefois, la différence reste très faible.

Ensuite, l'augmentation de moment et d'effort tranchant correspondant au comportement dans la direction perpendiculaire à celle du vent se fait plus rapidement lorsque l'épaisseur est variable (Figure 29). En fait, puisque la masse de la structure est plus faible, le nombre de Scruton l'est également et donc le déplacement et la force équivalente sont quant à eux plus importants. Cela explique aussi pourquoi le déplacement dans la direction transversale est supérieur pour la configuration d'épaisseur variable (Figure 30).

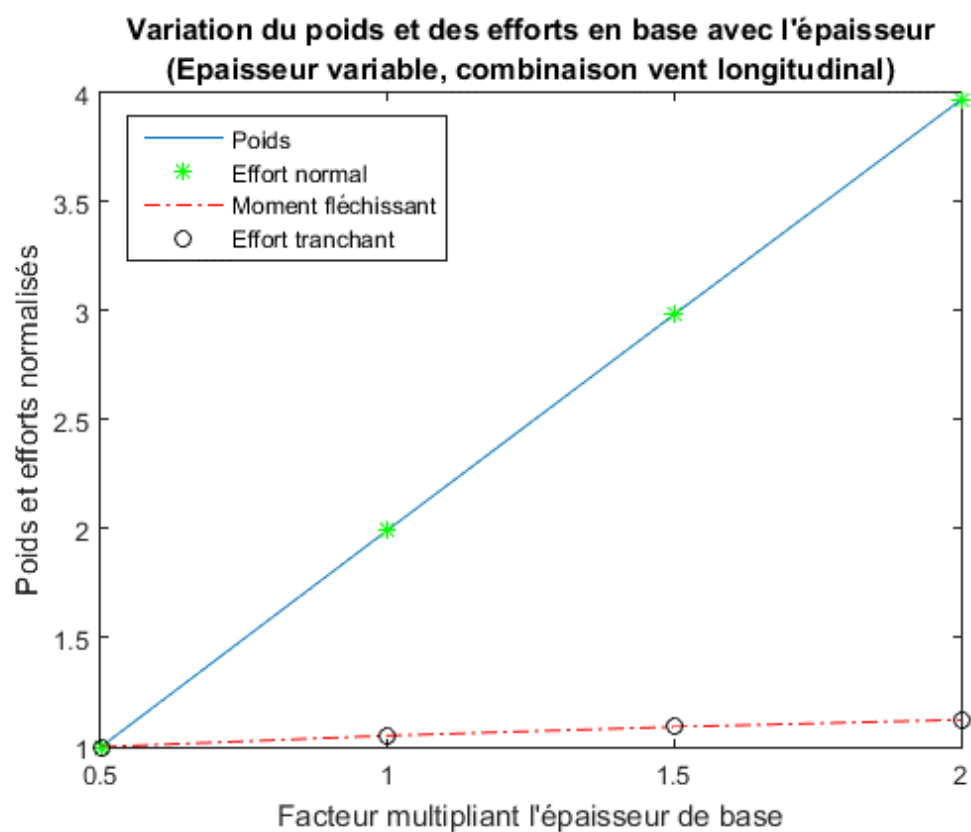


Figure 27 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur

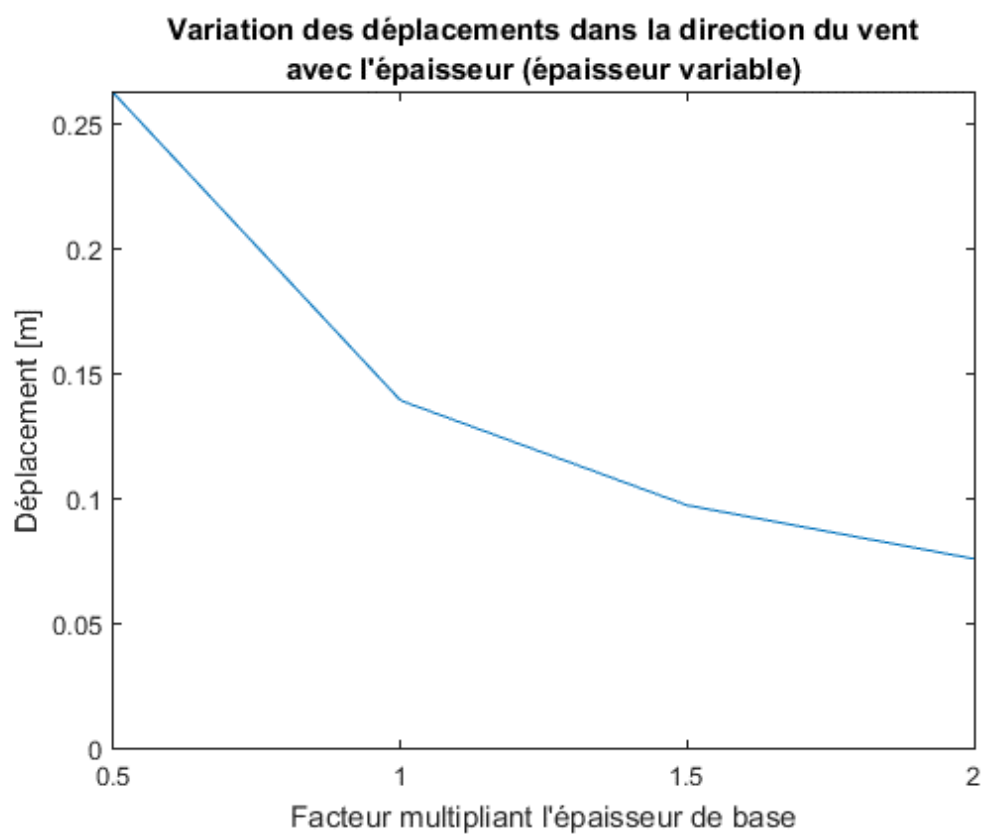


Figure 28 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur

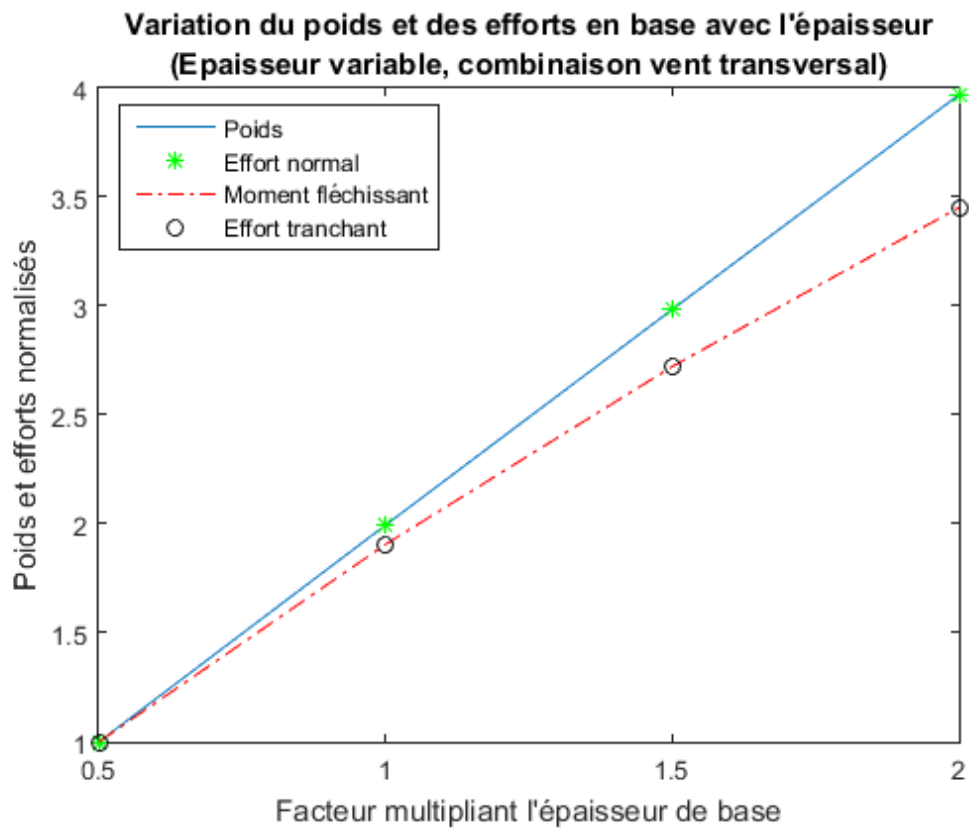


Figure 29 : Poids et efforts adimensionnels en base en fonction de l'épaisseur

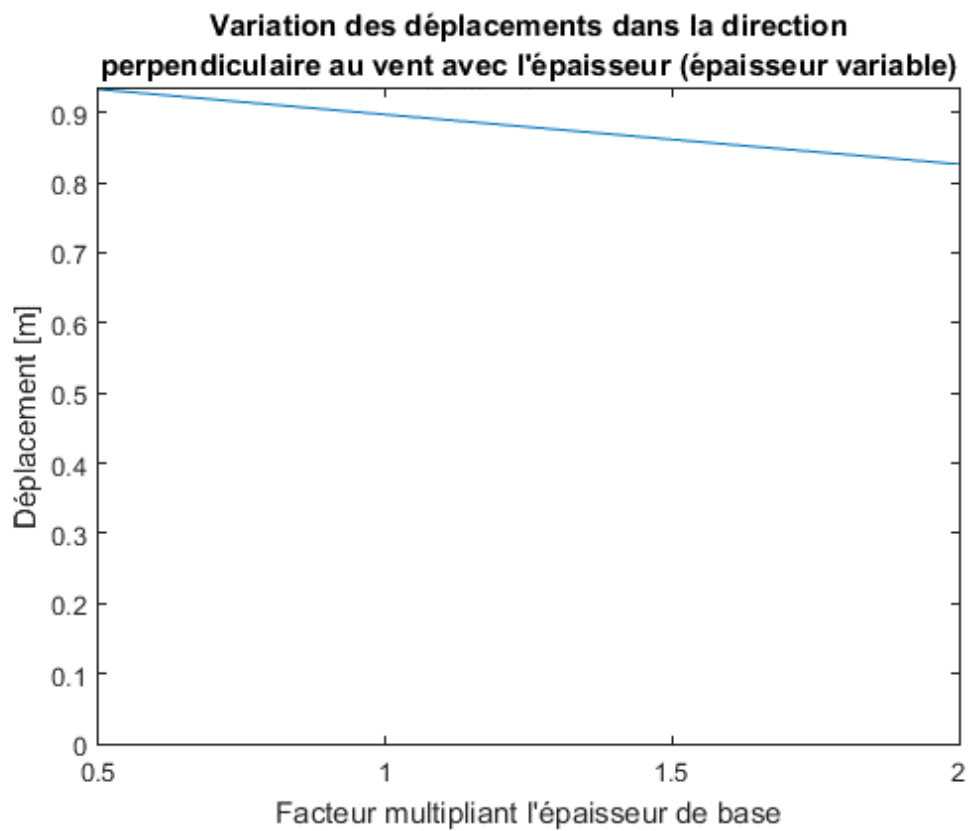


Figure 30 : Déplacements en tête en fonction de l'épaisseur

9.3. Utilisation des études paramétriques pour valider la formule approchée de la première fréquence propre donnée dans la partie 1-4 de l'Eurocode 1

Dans cette section, les fréquences propres obtenues à l'aide de la formule simplifiée fournie dans la norme vont être comparées à celles obtenues à l'aide de BeamZ, pour un grand nombre de cas. Dans chaque configuration considérée, l'erreur relative entre ces deux valeurs est calculée. Cela permettra de conclure sur la validité de cette formule approchée, et sur les erreurs introduites lorsqu'elle est utilisée.

Pour rappel, la formule fournie par la norme est présentée à l'équation (102) et les paramètres y intervenants sont définis au Tableau 39. Cette formule est spécifique aux cheminées. (Commission NBN E250 - E25001, 2010)

$$n_1 = \frac{\epsilon_1 * D}{h_{eff}^2} * \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz] \quad (102)$$

ϵ_1	Facteur de fréquence, valant 1000 pour les cheminées en acier ;
$h_{eff} = h_1 + \frac{h_2}{3} [m]$	Hauteur équivalente de la cheminée, h_1 et h_2 sont définis à la figure F.1 de l'Eurocode 1 partie 1-4 ;
W_s	Poids des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la cheminée ;
W_t	Poids total de la cheminée.

Tableau 39 : Paramètres intervenant dans l'équation (102)

Toutes les configurations utilisées ci-avant pour analyser l'influence du diamètre et de l'épaisseur vont être réexploitées pour comparer les fréquences propres obtenues au moyen des deux méthodes. Les cas correspondant à la modification de l'épaisseur variable par tronçon ne sont toutefois pas considérés car les variations de fréquence sont trop faibles pour être prises en compte (de l'ordre du millième).

Le Tableau 40 présente les valeurs obtenues pour la première fréquence propre à l'aide du logiciel BeamZ et avec la formule approchée de l'Eurocode 1 partie 1-4, ainsi que l'erreur réalisée en utilisant cette dernière.

Ce tableau permet de réaliser plusieurs observations. Tout d'abord, il apparaît que les erreurs obtenues pour toutes les configurations à épaisseur variable sont quasiment égales, quel que soit le diamètre, mais différentes des valeurs obtenues pour les configurations à épaisseur constante. Ces dernières présentent également une erreur presque invariable, quelle que soit l'épaisseur. Ensuite, il peut être observé que l'erreur est plus faible pour les configurations à épaisseur constante.

Pour s'assurer que les observations faites sur les cas à épaisseur constante ne dépendent pas du diamètre, deux configurations ont été ajoutées, correspondant à une épaisseur constante de 20 millimètres, et à un diamètre de 2 et 2,6 mètres. Les erreurs obtenues sont toujours semblables à celles des autres configurations à épaisseur constante.

Cela mène à la conclusion que la formule approchée fournie dans la norme donne de bons résultats pour des cheminées à épaisseur constante. Cependant, les valeurs obtenues lorsque l'épaisseur est variable par tronçon présentent une erreur relativement importante et il serait alors plus judicieux

d'évaluer la fréquence à l'aide d'un modèle plus précis. La formule de la norme est ainsi plus sensible à la distribution d'épaisseur sur la hauteur qu'au diamètre de la cheminée, qui ne modifie pas l'erreur réalisée de manière significative.

Epaisseur variable par tronçons – Influence du diamètre			
Diamètre [m]	Fréquence propre BeamZ [Hz]	Fréquence propre EC [Hz]	Erreur relative [%]
1,6	1,27	1,05	-17,32
1,8	1,43	1,18	-17,48
2	1,59	1,32	-16,98
2,2	1,75	1,45	-17,14
2,4	1,91	1,58	-17,28
2,6	2,07	1,71	-17,39
2,8	2,23	1,84	-17,49
3	2,39	1,97	-17,57
3,2	2,55	2,10	-17,64
3,4	2,71	2,24	-17,34
3,6	2,87	2,37	-17,42
Epaisseur constante – Influence de l'épaisseur			
Epaisseur [mm]	Fréquence propre BeamZ [Hz]	Fréquence propre EC [Hz]	Erreur relative [%]
5	1,00	1,05	5,00
10	1,00	1,05	5,00
15	0,99	1,05	6,06
20	0,99	1,05	6,06
Epaisseur constante – Influence du diamètre			
Diamètre [m]	Fréquence propre BeamZ [Hz]	Fréquence propre EC [Hz]	Erreur relative [%]
2,0	1,24	1,32	6,45
2,6	1,62	1,71	6,21

Tableau 40 : Comparaison des fréquences propres calculées avec le logiciel BeamZ et avec la formule approchée provenant de l'Eurocode 1 partie 1-4

9.4. Conclusion

Le principal avantage engendré par l'augmentation de diamètre est la possibilité de dépasser la limite sur la vitesse critique permettant de ne pas prendre en compte les effets des tourbillons de Von Karman. Cependant, le diamètre nécessaire est alors exagérément grand. Le second avantage est la diminution des déplacements dans le sens du vent due à l'augmentation de raideur.

Les inconvénients associés à un grand diamètre sont la forte augmentation de tous les efforts dans la fondation due à l'amplification des forces de vent, ainsi que du déplacement en tête dans la direction transversale.

Augmenter l'épaisseur semble plus avantageux puisque cela permet de diminuer les déplacements dans les deux directions, et que ce n'est accompagné que de faibles augmentations du moment fléchissant et de l'effort tranchant. Cependant, la diminution des déplacements est très limitée, principalement car la gamme d'épaisseur pouvant être utilisée est faible pour rester dans des limites raisonnables.

Enfin, la configuration avec épaisseur variable par tronçon est plus intéressante que celle avec épaisseur constante sur toute la hauteur, car elle permet de diminuer le poids, et donc les efforts en base de la cheminée. Les déplacements dans les deux directions et les efforts correspondant à la combinaison prenant en compte les tourbillons de Von Karman sont alors légèrement plus élevés mais la différence est très faible.

10. Conclusion et perspectives d'évolution

En conclusion, les différents objectifs décrits au début de ce travail ont tous été atteints. Les différentes étapes du dimensionnement des cheminées autoportantes ont été étudiées en détails et adaptées aux structures de la société Drever International S.A.. Un code de calcul a été développé, intégrant la modélisation de la structure et des forces qui lui sont appliquées, ainsi que les vérifications de résistance et de service. L'analyse et l'intégration au programme des étapes du dimensionnement ont permis de mettre en évidence les problèmes présents dans la norme européenne. Des études paramétriques ont évalué l'influence du diamètre et de l'épaisseur de la cheminée sur les efforts transmis à la fondation et les déplacements en tête de cheminée. Elles pourront guider leur choix lors du pré-dimensionnement.

Tout d'abord, une modélisation par éléments finis a été réalisée pour représenter les cheminées étudiées le plus précisément possible. Pour cela, certaines hypothèses ont été prises. Les raideurs des assemblages et de la fondation sont supposées infinies, la température est considérée varier de manière linéaire, et les éléments utilisés lors la modélisation sont de type poutre.

Ensuite, les effets de la température sur les propriétés mécaniques sont étudiés. En effet, l'une des caractéristiques spécifiques aux cheminées est l'élévation de température du matériau structural, engendrée par l'évacuation des fumées. Les températures usuelles dans le cas des cheminées de la société Drever International S.A. sont de 300°C au niveau d'entrée des fumées et environ 80°C au niveau de l'évacuation. Cela engendre une diminution des propriétés mécaniques. Des lois caractérisant l'évolution de ces propriétés ont alors été établies pour la gamme de température considérée. Il s'avère que la masse volumique reste constante, mais que le module de Young varie de manière linéaire. La limite d'élasticité est représentée avec une erreur acceptable par une loi du second degré. Cette étude a également montré que les lois établies sont fonctions du type d'acier.

La représentation du poids propre de la cheminée est traitée élément par élément. De cette manière, le poids des détails non structuraux peut être ajouté au modèle via une augmentation de la masse volumique de l'élément à l'altitude correspondante. Il ne sera cependant pas considéré comme une masse ponctuelle mais étalé sur toute la longueur de l'élément de modélisation. Pour plus de précision, des éléments plus petits devront être utilisés.

Lors de l'évaluation de l'action du vent sur la structure, seul le premier mode propre de vibration est considéré. La forme de ce mode et la fréquence correspondante sont déterminées par le logiciel BeamZ, qui donne des résultats plus précis que les formules approchées fournies par la partie 1-4 de l'Eurocode 1. L'application de la méthode présentée dans cette partie de la norme afin d'évaluer les actions du vent a soulevé certains problèmes et nécessité des prises de position. Pour l'action du vent dans la direction parallèle à celle du vent, le tableau donnant les formules permettant de calculer l'élancement présente des lacunes dans la version française de la norme, et fournit des valeurs en opposition avec celles de l'annexe nationale belge. Aussi, le facteur d'extrémité n'est pas donné comme une fonction continue du taux de remplissage, et il a donc été choisi de ne considérer que les valeurs correspondant à un taux unitaire. Plusieurs solutions étaient possibles pour la détermination du coefficient structural, mais c'est le calcul précis qui est utilisé. L'action du vent dans la direction perpendiculaire au vent se base principalement sur la détermination du déplacement maximal dans le temps à l'endroit où la déformée est maximale. Deux méthodes sont proposées dans la norme pour le calcul de ce déplacement et il a été mis en évidence que l'une d'elle sous-estime les résultats. C'est alors l'autre méthode qui est utilisée, mais il n'y a pas d'autres solutions pour calculer le nombre de cycles de chargement que d'utiliser la formule relative à la méthode insécuritaire.

Après avoir modélisé la structure et les forces qui lui sont appliquées, il a fallu choisir le type d'analyse à utiliser pour déterminer les efforts et déplacements. La norme européenne permet de réaliser une analyse élastique linéaire au premier ordre, qui est la plus simple de toutes et qui est aussi celle que le logiciel BeamZ utilise. Cependant, il a été décidé d'y ajouter les effets du second ordre pour éviter de devoir vérifier les instabilités globales. Cela s'est fait à l'aide d'un facteur correcteur appliqué aux forces horizontales et par l'ajout de forces supplémentaires représentant les imperfections.

La première vérification réalisée concerne l'ovalisation de l'enveloppe circulaire. Si elle n'est pas satisfaite, il a été choisi d'ajouter des raidisseurs. Puisque l'ovalisation est provoquée par l'action du vent, elle est traitée dans la partie 1-4 de l'Eurocode 1. Mais celui-ci n'est pas complet car il ne propose de formule pour le calcul de la fréquence propre d'ovalisation que lorsqu'il n'y a pas de raidisseur. Une formule a alors été développée à partir de simulations pour permettre d'intégrer l'effet des raidisseurs.

La seconde étape des vérifications porte sur les états limites de service. Deux états sont considérés, les déplacements dans la direction du vent, et ceux dans la direction perpendiculaire.

Finalement, la troisième et dernière étape s'intéresse aux états limites ultimes. Dans cette section, la méthode relative aux coques a été utilisée, mais il a fallu l'adapter aux éléments poutres et aux spécificités des cheminées. Malgré le fait que les sections étudiées soient de classe 4, cette méthode considère la section pleinement efficace, mais impose une résistance maximale limitée par le voilement. Le challenge le plus conséquent dans cette section a été de trouver une formule permettant de calculer la charge critique d'Euler adaptée aux cheminées à inertie variable par tronçon et soumise à leur poids propre ainsi qu'à une charge concentrée. Cette formule a été vérifiée à l'aide de simulations. La dernière des vérifications est celle de la résistance à la fatigue. Il a été décidé de ne vérifier que les étendues de contraintes normales et non les tangentielles. Trois détails susceptibles de provoquer la ruine par fatigue ont également été identifiés.

Une fois toutes les étapes du dimensionnement analysées et implémentées dans le code de calcul, celui-ci a été testé sur un cas d'étude. Cela a mis en évidence l'importance de l'action du vent due aux tourbillons de Von Karman. La structure testée ne résiste d'ailleurs pas à cette sollicitation. Pour trouver une solution à ce problème, divers pistes ont été envisagées : modifier la méthode de calcul, renforcer la section, ajouter des dispositifs aérodynamiques permettant de casser les tourbillons, et ajouter des amortisseurs. La seule solution permettant de vérifier tous les critères de résistance et de service est l'ajout d'un amortisseur, mais elle n'a pas été implémentée dans le code de calcul.

Finalement, ce travail se termine par les études paramétriques analysant l'influence du diamètre et de l'épaisseur. Une augmentation de diamètre permet de diminuer le déplacement dans la direction parallèle au vent, mais augmente les forces de vent dans les deux directions et donc les efforts dans la fondation. Elle provoque également une augmentation de la vitesse critique et permet donc de satisfaire la condition autorisant à ne pas prendre en compte l'action du vent due aux tourbillons de Von Karman pour de grands diamètres. Une augmentation d'épaisseur provoque quant à elle une diminution des déplacements dans les deux directions et une très faible augmentation des efforts en base. Il est donc plus intéressant d'adopter un petit diamètre et de grosses épaisseurs, à moins d'accepter un très grand diamètre permettant de ne plus considérer l'action des tourbillons de Von Karman. Les configurations d'épaisseurs constantes ou variables par tronçon ont également été comparées. La deuxième option est plus avantageuse puisqu'elle permet de diminuer le poids total de la structure sans engendrer une trop forte augmentation des déplacements en tête et des efforts en base. Ces études paramétriques sont ensuite utilisées pour évaluer la validité de la formule approchée fournie dans la norme pour calculer la fréquence propre des cheminées. Les valeurs obtenues à l'aide de cette formule sont comparées à celles obtenues avec le logiciel BeamZ. Il apparaît que les erreurs

réalisées sont acceptables pour des configurations à épaisseur constante, mais plus importantes pour les configurations à épaisseur variable par tronçon.

Pour finir, bien qu'ayant abordé de nombreux points relatifs au dimensionnement des cheminées autoportantes de la société Drever International S.A., ce travail peut évidemment encore être amélioré. En effet, seule l'enveloppe structurelle a été étudiée avec précision. Principalement, trois sujets nécessiteraient une étude plus poussée. Tout d'abord, la fondation a été modélisée par un encastrement. Il serait toutefois intéressant de caractériser sa raideur réelle, et de l'intégrer au code de calcul via l'ajout d'un ressort. Sa résistance devrait également être vérifiée. Ensuite, le calcul des assemblages nécessite également une attention particulière. Il faudrait vérifier leur résistance et leur raideur, supposée infinie jusqu'à présent. Aussi bien les assemblages que la fondation présentent un risque important de rupture en fatigue, et cette vérification devrait donc être réalisée attentivement. Enfin, le dernier aspect qui mérite d'être étudié est l'ajout d'un amortisseur. En effet, différentes sortes d'amortisseurs existent et il faudrait étudier leurs différents comportements, avantages et inconvénients, pour choisir de manière réfléchie le type le plus adéquat. Le comportement de cet amortisseur pourrait également être intégré au code de calcul.

Bibliographie

Andreou, Panayiotis. 2011. *Behaviour, analysis and design of steel chimneys*. Athènes : National technical university of Athens, 2011.

Bureau de normalisation. 2007. *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque*. Bruxelles : s.n., 2007. NBN EN 1993-1-6.

Bureau de normalisation. 2005. *Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments*. Bruxelles : s.n., 2005. NBN EN 1993-1-1.

Bureau de normalisation. 2007. *Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Partie 1-4: Règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables*. Bruxelles : s.n., 2007. NBN EN 1993-1-4.

Bureau de normalisation. 2005. *Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Partie 1-9: Fatigue*. Bruxelles : s.n., 2005. NBN EN 1993-1-9.

Bureau de normalisation. 2002. *Eurocodes structuraux - Eurocodes : Bases de calcul des structures*. Bruxelles : s.n., 2002. NBN EN 1990.

Comission NBN E250 - E25001. 2010. *Annexe nationale - Eurocode 1 : actions sur les structures, partie 1-4 : actions générales - actions du vent*. 2010.

Comité européen de normalisation. 2005. *Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-4: Actions générales - Actions du vent. EN 1991-1-4*. Bruxelles : s.n., 2005.

Comité européen de normalisation. 2007. *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 3-2 : Tours, mâts et cheminées - Cheminées. EN 1993-3-2*. Bruxelles : s.n., 2007.

Comité européen de normalisation. 2018. *First Draft EN 1991-1-4 Wind Actions"*. 2018. N1027.

Drever International S.A.

Drever International S.A.. 2016. *Annealing furnace & galvanizing tower*. Liège : s.n., 2016. 0537 322900.

Drever International S.A.. 1996. *Ligne de galvanisation - four de recuit*. Liège : s.n., 1996. 0297 04002.

Drever International S.A.. 2007. *Profil de la société. SMS Group Drever International*. [Online] 2007. [Cited: 22 Mars 2018.] <http://www.drever.be/doc.php?nd=o1&tid=1&lg=3&docid=1&site=1>.

Handa, Kamal. 2006. *European standard for wind loads*. Göteborg : s.n., 2006.

Institut allemand de normalisation. 2013. *Cheminée autoportante - Partie 7 : Spécifications de produits applicables aux fabrications cylindriques en acier pour cheminées en acier à paroi simple et parois intérieures en acier. DIN EN 13084-7*. Berlin, Allemagne : Berlin Beuth, mars 2013.

Jaspart, Jean-Pierre. 2015-2016. *Cours de calcul d'éléments métalliques*. Liège : Université de Liège, faculté des sciences appliquées, 2015-2016.

Kawecki, J. and Zuranski, J.A. 2007. *Cross-wind vibrations of steel chimneys - A new case history. Elsevier. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007.

21/02/2018. Material data sheet. *Material number 1.4301.* Allemagne : Stahlschlüssel Wegst GmbH, 21/02/2018.

Petersen. 1982. *Statik und stabilität der baukonstruktionen.* Wiesbaden : Vieweg, 1982.

Plumier, A. *Constructions en zone sismique.* Liège : Université de Liège, faculté des sciences appliquées.

Reid, Steven. *Wind actions and responses of steel chimneys.*

The american society of mechanical engineers. 2011. Steel stacks. *ASME STS-1-2011.* New-York : s.n., 2011.

Tranvik, Pär and Alpsten, Göran. 2002. *Dynamic Behaviour under Wind Loading of a 90 m Steel Chimney.* Alstom Power Sweden AB, et Stålbyggnadskontroll AB. Växjö et Solna : s.n., 2002.

Université de Liège, département M.S.M.; C.T.I.C.M. 1997. *Frame design including joint behaviour.* s.l. : Commission des communautés européennes, direction générale de la science, de la recherche et du développement, de la recherche technique sur l'acier, 1997. p. 268. Vol. 1. 93-F6.05.

Annexes

Annexe 1 : Calcul de la pression de pointe

La pression dynamique de pointe se calcule à l'aide de l'équation (103).

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (103)$$

Dans cette équation, $I_v(z)$ est l'intensité de turbulence du vent à la hauteur z , ρ est la masse volumique de l'air, prise égale à la valeur recommandée 1,25 kg/m³, et $v_m(z)$ est la vitesse moyenne du vent à la hauteur z .

La vitesse moyenne du vent à une hauteur z , $v_m(z)$, se calcule à l'aide de l'équation (104).

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (104)$$

Dans cette équation, $c_r(z)$ est le coefficient de rugosité, $c_0(z)$ est le coefficient orographique, pris égal à l'unité comme il est conseillé dans l'Eurocode, et v_b est la vitesse de référence du vent.

Le coefficient de rugosité tient compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la construction due à la hauteur au-dessus du niveau du sol et à la rugosité du terrain en amont de la construction dans la direction du vent considérée. Il est déterminé grâce à l'équation (105).

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ pour } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (105)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ pour } z \leq z_{min}$$

z_0 est la longueur de rugosité, dépendant de la catégorie de terrain. k_r est le facteur de terrain dépendant de la longueur de rugosité et est calculé à partir de l'équation (106).

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (106)$$

$z_{0,II}$ est un paramètre valant 0,05 mètre et correspondant à la longueur de rugosité d'un terrain de classe II. z_{min} est la hauteur minimale dépendant de la catégorie de terrain et z_{max} est la hauteur maximale considérée égale à 200 mètres. Les catégories de terrain sont définies au Tableau 41.

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 mètres.	1,0	10

Tableau 41 : Catégories et paramètres de terrain (Comité européen de normalisation, 2005)

La vitesse de référence du vent v_b est calculée à partir de l'équation (107). Cette vitesse est définie en fonction de la direction du vent et de la période de l'année à une hauteur de 10 mètres au-dessus d'un sol de catégorie de terrain II.

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (107)$$

Dans cette équation, $v_{b,0}$ est la valeur de base de la vitesse de référence du vent, c'est la vitesse moyenne sur 10 minutes caractéristiques, indépendamment de la direction du vent et de la période de l'année, à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol en terrain de catégorie II. c_{dir} est le coefficient de direction et c_{season} est le coefficient de saison. Ces deux derniers coefficients sont pris égaux à l'unité. En effet, ils permettent parfois de minorer la vitesse du vent en fonction de la direction dans laquelle souffle le vent et de la saison. Cependant, puisque les cheminées sont supposées se trouver en terrain dégagé et qu'elles sont circulaires, la direction du vent n'affecte pas la vitesse. De plus, étant donné que les cheminées sont des constructions durables, prévues pour rester en place plus d'une année complète, le pire des cas doit être considéré et la saison ne peut pas intervenir de manière favorable puisque les quatre saisons seront vécues par les cheminées.

L'intensité de turbulence $I_v(z)$ à la hauteur z est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent. La composante turbulente de la vitesse du vent a une valeur moyenne nulle et un écart type σ_v . L'écart type de la turbulence peut être déterminé à l'aide de l'équation (108).

$$\sigma_v = k_r * v_b * k_l \quad (108)$$

k_r est le facteur de terrain défini à l'équation (106), v_b , la vitesse de référence du vent, et k_l , le coefficient de turbulence, dont la valeur recommandée est l'unité. L'intensité de turbulence est calculée grâce à l'équation (109).

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ pour } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (109)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ pour } z < z_{min}$$

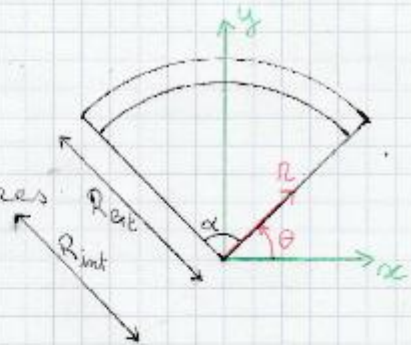
Annexe 2 : Etablissement d'une formule générale pour l'inertie d'une portion d'anneau de cercle

Calcul de l'inertie d'une portion d'anneau de cercle.

$$I = \int y^2 dA$$

Passage en coordonnées polaires

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases}$$



$$I = \int_0^\alpha \int_{R_{int}}^{R_{ext}} (r \sin \theta)^2 r dr d\theta$$

$$= \int_0^\alpha \int_{R_{int}}^{R_{ext}} r^3 \sin^2 \theta dr d\theta$$

$$= \int_0^\alpha \frac{(R_{ext}^4 - R_{int}^4)}{4} \sin^2 \theta d\theta$$

$$= \frac{R_{ext}^4 - R_{int}^4}{4} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{2} \right)$$

$$= \frac{D_{ext}^4 - D_{int}^4}{64} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{2} \right)$$

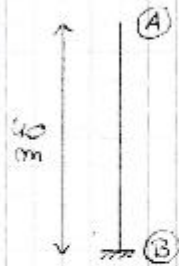
Cas particuliers :

$$\text{Si } \alpha = \pi \text{ et } D_{int} = 0 \rightarrow I = \frac{\pi D_{ext}^4}{128}$$

$$\text{Si } \alpha = 2\pi \rightarrow I = \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4)$$

Annexe 3 : Vérification des formules approchées de calcul de la charge critique par rapport aux valeurs obtenues avec Ossa2D

1) Cheminée d'épaisseur constante soumise uniquement à son poids propre



$$t = 10 \text{ mm}$$

$$D = 1,6 \text{ m}$$

$$A = 9,04995 \text{ m}^2$$

$$I = 0,01579 \text{ m}^4$$

$$E = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$q_i = \rho A_z g$$

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule:

$$S = \frac{I_B}{I_A} = 1$$

$$C = \frac{q_B}{q_A} = 1$$

$$\chi_{cr} = 7,8$$

$$N_{cr} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\chi} \right) \chi_{cr} \frac{I \cdot I_B}{H^2} = 16165,01 \text{ kN}$$

$$P_{tot} = 156,84 \text{ kN}$$

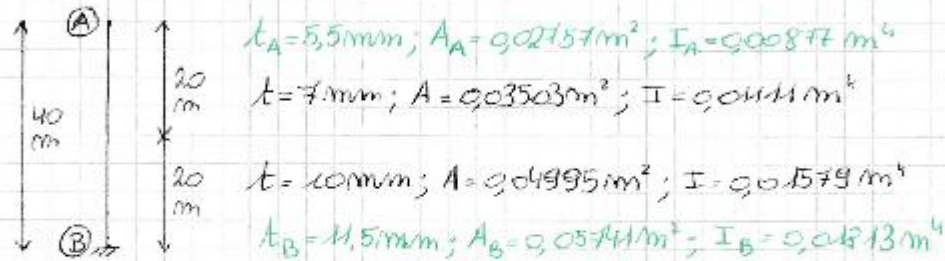
$$\text{Multiplicateur critique : } \alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{P_{tot}} = 103,07$$

Multiplicateur critique provenant d'Ossa2D.

$$\alpha_{cr} = 103,53$$

2) Cheminée d'épaisseur variable par tronçons (2)
soumise uniquement à son poids propre

Données linéarisées



$$D = 1.6 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$E = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$g_i = \rho A_i g$$

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule:

$$S = \frac{I_B}{I_A} = 2.06$$

$$E = \frac{g_B}{g_A} = 2.08$$

$$\chi_{K1} = 1.25$$

$$N_u = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{E} \right) \chi_{K1} \frac{E I_B}{l^2} = 19820 \text{ kN}$$

$$P_{crit} = 133.42 \text{ kN}$$

$$\text{Multiplicateur critique } \alpha_u = \frac{N_u}{P_{crit}} = 148.55$$

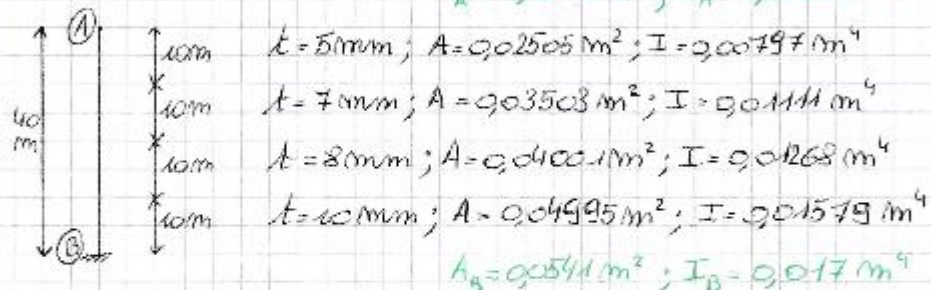
Multiplicateur critique provenant d'Os2D:

$$\alpha_{u2} = 138.54$$

3) Cheminée d'épaisseur variable par tronçon (4)
soumise uniquement à son poids propre

Données linéarisées

$$A_A = 0,0209 \text{ m}^2; I_A = 0,00667 \text{ m}^4$$



$$D = 1,6 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$E = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$q_i = \rho A_i g$$

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule :

$$S = \frac{I_B}{I_A} = 2,55 \quad E = \frac{q_B}{q_A} = 2,59 \quad \delta_{\text{rel}} = 12,8$$

$$N_{\text{rel}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{E} \right) \delta_{\text{rel}} \frac{E I_B}{I^2} = 19793 \text{ kN}$$

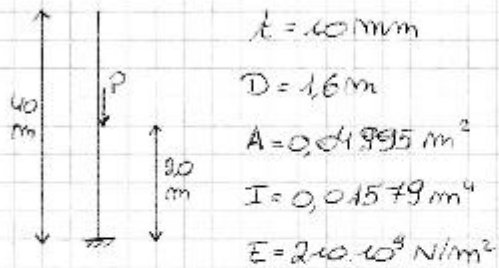
$$P_{\text{tot}} = 117,78 \text{ kN}$$

$$\text{Multiplicateur critique: } \alpha_{\text{cr}} = \frac{N_{\text{rel}}}{P_{\text{tot}}} = 168,05$$

Multiplicateur critique provenant d'Annex 2D :

$$\alpha_{\text{cr}} = 160,03$$

4) Cheminée d'épaisseur constante soumise uniquement à une force concentrée



Calcul de la charge critique à l'aide de la formule :

$$m = 1 \quad \beta = 2$$

$$N_{cr} = \frac{1}{\beta^2} \pi^2 \frac{E I A}{H^2} = 20454,11 \text{ kN}$$

$$P = 10 \text{ kN}$$

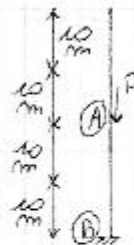
$$\text{Multiplicateur critique : } \alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{P} = 2045,41$$

Multiplicateur critique provenant d'Annex 20 :

$$\alpha_{cr} = 2045,41$$

5) Cheminée d'épaisseur variable par tronçon soumise uniquement à une force concentrée

Données linéarisées



$$t = 5 \text{ mm}; A = 0,02505 \text{ m}^2; I = 0,00797 \text{ m}^4$$

$$t = 7 \text{ mm}; A = 0,03503 \text{ m}^2; I = 0,01111 \text{ m}^4$$

$$A_A = 0,03504 \text{ m}^2; I_A = 0,01113 \text{ m}^4$$

$$t = 8 \text{ mm}; A = 0,04001 \text{ m}^2; I = 0,01263 \text{ m}^4$$

$$t = 10 \text{ mm}; A = 0,04995 \text{ m}^2; I = 0,01579 \text{ m}^4$$

$$A_B = 0,05492 \text{ m}^2; I_B = 0,01735 \text{ m}^4$$

$$D = 1,6 \text{ m}$$

$$E = 240 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule:

$$m = 1 \quad \beta = 2$$

$$N_{cr} = \frac{1}{\beta^2} \pi^2 \frac{EI_A}{L^2} = 144,17 \text{ kN}$$

$$P = 10 \text{ kN}$$

$$\text{Multiplicateur critique: } \alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{P} = 14,417$$

Multiplicateur critique provenant d'Annex 20:

$$\alpha_{cr} = 1956$$

6) Cheminée d'épaisseur constante soumise à son poids propre et à une force concentrée

Les résultats des cas 1 et 4 sont utilisés.

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule :

$$\chi = \frac{P}{P_{\text{tot}}} = \frac{10}{156,84}$$

$$N_u^C = 16\,165 \text{ kN}$$

$$N_u^P = 20\,454 \text{ kN}$$

$$N_u = (1+\chi) \frac{N_u^C N_u^P}{\chi N_u^C + N_u^P} = 16\,370,75$$

$$\text{Multiplicateur critique : } \alpha_u = \frac{N_u}{P_{\text{tot}} + P} = 98,12$$

Multiplicateur critique provenant d'Osca 2D :

$$\alpha_u = 98,99$$

7) Cheminée d'épaisseur variable par tronçon soumise à son poids propre et à une force concentrée

Les résultats des cas 3 et 5 sont utilisés.

Calcul de la charge critique à l'aide de la formule :

$$\chi = \frac{P}{P_{\text{tot}}} = \frac{10}{117,78} ; N_u^C = 19\,793 \text{ kN} ; N_u^P = 14\,417 \text{ kN}$$

$$N_u = (1+\chi) \frac{N_u^C N_u^P}{\chi N_u^C + N_u^P} = 19\,231 \text{ kN}$$

$$\text{Multiplicateur critique : } \alpha_u = \frac{N_u}{P_{\text{tot}} + P} = 159,5$$

Multiplicateur critique provenant d'Osca 2D :

$$\alpha_u = 148,99$$

Annexe 4 : Logiciel – première partie

```
function [ Nodes, Elements, Materials, Geometries, APPU, DreverData] =  
aaa_TFE_Part1_data  
  
%% Inputs  
% Données géométriques et matérielles  
N=input('Nombre de troncons par lesquels on divise la hauteur de la  
cheminée : ');  
for i=1:N  
    L_troncons(i)=input(['Longueur du tronçon ', num2str(i), ' [m] : ']);  
    %[m]  
end  
H=sum(L_troncons);  
if H>40  
    nb_env=2;  
else  
    nb_env=1;  
end  
d=input('Distance par rapport au sol d'entrée de la fumée [m] : '); %[m]  
D=input('Diamètre extérieur de la cheminée [m] : '); %[m]  
for i=1:N  
    e(i)=input(['Epaisseur de la tôle constituant l'enveloppe du tronçon  
, num2str(i), ' [mm] : '])*10^-3; %[m]  
    A(i)=pi*(D^2-(D-2*e(i))^2)/4; %[m^2]  
    I(i)=pi*(D^4-(D-2*e(i))^4)/64; %[m^4]  
    xi(i)=input(['Valeur du coefficient amplifiant le poids de l'enveloppe  
structurelle de l'élément ', num2str(i), ' : ']);  
end  
if nb_env==2  
    D_int=input('Diamètre extérieur de l'enveloppe intérieure de la  
cheminée [m] : '); %[m]  
    e_int=input('Epaisseur de l'enveloppe intérieure de la cheminée [mm] :  
)'*10^-3; %[m]  
    i=1;  
    while sum(L_troncons(1:i))<=d  
        i=i+1;  
    end  
    Node_d=i; %Noeud correspondant au bas du tronçon d'entrée des fumées  
end  
  
T_hot=input('Température moyenne sur l'épaisseur au niveau d arrivée de la  
fumée [°C] : ');  
T_cold=input('Température moyenne sur l'épaisseur au point haut de la  
cheminée [°C] : ');  
  
%Actions  
g=input('Accélération gravitaire [m/s^2] = '); %[m/s^2]  
cat_terr=input('Catégorie de terrain : \n 0: Mer ou zone côtière exposée  
aux vents de mer \n 1: Lacs ou zone plate et horizontale à végétation  
négligeable et libre de tous obstacles \n 2: Zone à végétation basse avec  
ou non quelques obstacles isolés séparés les uns des autres d'au moins 20  
fois leur hauteur \n 3: Zone avec une couverture végétale régulière ou des  
bâtiments, ou des obstacles isolés séparés d au plus 20 fois leur hauteur  
\n 4: Zone dont au moins 15% de la surface sont recouverts de bâtiments  
dont la hauteur moyenne est supérieure à 15m');  
v_b0=input('Valeur de base de la vitesse de référence du vent en m/s: ');  
%[m/s]
```

```

gamma=input('Rapport de la somme du poids de l''isolation et du poids de la
paroi sur le poids de la paroi');% Pour ovalisation Pour simple enveloppe,
1
RC=input('Classe de fiabilité : \n 1 : Cheminée construite en environnement
ouvert dont la rupture ne poserait pas de préjudice \n 2 : Toute cheminée
normale sur des sites industriels ou autres localisations qui ne peuvent
pas être définie de classe 1 ou 3 \n 3 : Des cheminées érigées dans des
endroits stratégiques, tels que des centrales nucléaires ou dans des zones
urbaines densément peuplées. Les cheminées principales dans les sites
industriels habités où les conséquences économiques et sociales de leur
échec seraient très élevées.');
```

%Pour les coeff GammaG et Q

```

NbPass=input('Nombre de passerelles : ');
APass=input('Surface des passerelles [m^2] : '); %[m^2]
for i=1:NbPass
    Pass(i)=input(['Altitude de la passerelle ', num2str(i), ' (doit
correspondre à un noeud du modèle) :']);
    j=1;
    while sum(L_troncons(1:j))<Pass(i)
        j=j+1;
    end
    Node_Pass(i)=j+1;
end

%Vérifications
TD=input('Durée de vie prévue en année : ');
Classe = input('Classe de qualité en fonction des tolérances de
fabrifications : \n 1 = Classe A (Excellente qualité), \n 2 = Classe B
(Qualité haute), \n 3 = Classe C (Qualité normale)');
```

Mf=input('Méthode d''évaluation de la fatigue : 1 = Méthode de la tolérance
de l''endommagement, 2 = Méthode de la durée de vie sûre.');

```

Cr=input('Conséquence de la ruine : \n 1 = Conséquences peu importantes, \n
2 = Conséquences importantes.');
```

sigma_d1=input('Catégorie de détail correspondant aux soudures : ')*10^6;
%[N/mm^2]
sigma_d2=input('Catégorie de détail correspondant à l''attache du
raidisseur de la bride au niveau de la coque : ')*10^6; %[N/m^2]
sigma_d3=input('Catégorie de détail correspondant à l''attache de la coque
et de la bride : ')*10^6; %[N/m^2]

% Sauvetage des données à passer de part 1 à part 2 et part 3

```

DreverData.N = N;
DreverData.L_troncons = L_troncons;
DreverData.d = d;
DreverData.D = D;
DreverData.e = e;
DreverData.A = A;
DreverData.I = I;
if nb_env==2
    DreverData.D_int=D_int;
    DreverData.e_int=e_int;
    DreverData.Node_d=Node_d;
end
DreverData.g=g;
DreverData.cat_terr=cat_terr;
DreverData.v_b0=v_b0;
DreverData.gamma=gamma;
DreverData.RC=RC;
DreverData.NbPass=NbPass;
DreverData.APass=APass;
if NbPass>0
    DreverData.Node_Pass=Node_Pass;
end

```

```

end
DreverData.TD=TD;
DreverData.Classe=Classe;
DreverData.Mf=Mf;
DreverData.Cr=Cr;
DreverData.sigma_d1=sigma_d1;
DreverData.sigma_d2=sigma_d2;
DreverData.sigma_d3=sigma_d3;

%% DO NOT EDIT -
if nb_env==1
    Nodes.XNOD=zeros(1,N+1);
    Nodes.YNOD=[0 cumsum(L_troncons)];
    for i=1:N+1
        Nodes.NODENAM{i}=['Noeud #', num2str(i)];
    end
    Elements.ELEMNOA=1:N;
    Elements.ELEMNOB=2:N+1;
    for i=1:N
        Elements.ELEMNAM{i}=['Elément ', num2str(i)];
        Elements.ELEMGeo(i)=i;
        Elements.ELEMMAT(i)=i;
        Elements.ELEMENTYP(i)=1;
        Elements.ELEMSP1(i)=NaN;
        Elements.ELEMSP2(i)=NaN;
    end
    APPU.nod=[0;1];
    APPU.n=zeros(8,1);
    APPU.n(2)=1;
    APPU.d=zeros(8,1);
    APPU.d(2)=NaN;

    for i=1:N
        if sum(L_troncons(1:i))<=d %hyp : 20°C
            T(i)=20;
            fy(i)=235*10^6; % [N/m^2]
            E(i)=mean([1.7*10^5 2*10^5])*10^6; % [N/m^2]
            rho_1(i)=7850*xi(i); % [kg/m^3]
            Materials(i).Name='Acier S235';
            Materials(i).isOk=1;
            Materials(i).Young=E(i);
            Materials(i).Density=rho_1(i);
            Materials(i).MaxStrs=fy(i);
        else
            T(i)=T_cold+(T_hot-T_cold)/(d-H)*(sum(L_troncons(1:i))-
L_troncons(i)/2-H);
            fy_0=200*10^6; % [N/m^2]
            E_0=185000*10^6; % [N/m^2]
            fy(i)=fy_0*(3*10^(-6)*T(i)^2-0.0027*T(i)+1.0136);
            E(i)=(mean([1.7*10^5 2*10^5])+(mean([1.385*10^5 1.65*10^5])-
mean([1.7*10^5 2*10^5]))/(500-20)*(T(i)-20))*10^6;
            rho_2(i)=7920*xi(i); % [kg/m^3]
            Materials(i).Name=['Acier Inox à température #',
num2str(T(i)), '°C'];
            Materials(i).isOk=1;
            Materials(i).Young=E(i);
            Materials(i).Density=rho_2(i);
            Materials(i).MaxStrs=fy(i);
        end
        Geometries(i).Name=['Géométrie', num2str(i)];
        Geometries(i).isOk=1;
    end
end

```

```

        Geometries(i).isEditable=1;
        Geometries(i).A=A(i);
        Geometries(i).I=I(i);
        Geometries(i).icon='none';
    end
end

if nb_env==2
    Nodes.XNOD=zeros(1,N+1);
    Nodes.YNOD=[0 cumsum(L_troncons)];
    for i=1:N+1
        Nodes.NODENAM{i}=['Noeud #', num2str(i)];
    end
    Elements.ELEMNOA=1:N;
    Elements.ELEMNOB=2:N+1;
    for i=1:N
        Elements.ELEMNAM{i}=['Elément ', num2str(i)];
        Elements.ELEMGeo(i)=i;
        Elements.ELEMMAT(i)=i;
        Elements.ELEMTYP(i)=1;
        Elements.ELEMSP1(i)=NaN;
        Elements.ELEMSP2(i)=NaN;
    end
    APPU.nod=[0;1];
    APPU.n=zeros(8,1);
    APPU.n(2)=1;
    APPU.d=zeros(8,1);
    APPU.d(2)=NaN;

    for i=1:N
        T(i)=20;
        fy(i)=235*10^6; % [N/m^2]
        E(i)=mean([1.7*10^5 2*10^5])*10^6; % [N/m^2]
        rho_1(i)=7850*xi(i); % [kg/m^3]
        Materials(i).Name='Acier S235';
        Materials(i).isOk=1;
        Materials(i).Young=E(i);
        Materials(i).Density=rho_1(i);
        Materials(i).MaxStrs=fy(i);
        Geometries(i).Name=['Géométrie', num2str(i)];
        Geometries(i).isOk=1;
        Geometries(i).isEditable=1;
        Geometries(i).A=A(i);
        Geometries(i).I=I(i);
        Geometries(i).icon='none';
    end
end
DreverData.Materials=Materials;

%% Calcul effort axial en pied
if H<=40
    Ptot=sum([Materials.Density].*L_troncons.*A)*g+NbPass*APass*2000;
else
    A_env_int=pi*(D_int^2-(D_int-2*e_int)^2)/4;
    rho_2=7920;
    P_env_int=A_env_int*rho_2*(H-d);
    DreverData.P_env_int=P_env_int;

Ptot=sum([Materials.Density].*L_troncons.*A)*g+P_env_int+NbPass*APass*2000;
end

```

```

%% Calcul Ncr
% Détermination du nombre de segments de construction
Nb_segment=1;
for i=1:N-1
    if e(i+1)==e(i)
        Nb_segment=Nb_segment;
    else
        Nb_segment=Nb_segment+1;
    end
end
L_segment=zeros(1,Nb_segment);
i=2;
for j=1:Nb_segment
    L_segment(j)=L_troncons(i-1);
    while (i<=N) && (e(i)==e(i-1))
        L_segment(j)=L_segment(j)+L_troncons(i);
        i=i+1;
    end
    i=i+1;
end

% Linéarisation de l'inertie de l'aire
I_top=I(end)+(I(end)-I(1))/(H-L_troncons(end)/2-L_troncons(1)/2)*(H-(H-L_troncons(end)/2));
I_bot=I(end)+(I(end)-I(1))/(H-L_troncons(end)/2-L_troncons(1)/2)*(0-(H-L_troncons(end)/2));
A_bot=A(end)+(A(end)-A(1))/(H-L_troncons(end)/2-L_troncons(1)/2)*(0-(H-L_troncons(end)/2));
A_top=A(end)+(A(end)-A(1))/(H-L_troncons(end)/2-L_troncons(1)/2)*(H-(H-L_troncons(end)/2));

% Calcul de Ncr sous pp seul
delta=I_bot/I_top;
disp(['Le paramètre delta servant au calcul de Ncr = ', num2str(delta)]);
eps=A_bot/A_top;
disp(['Le paramètre epsilon servant au calcul de Ncr = ', num2str(eps)]);
gamma_ki=input('Entrez la valeur du paramètre gamma_ki : ');
Ncr_pp=1/2*(1+1/eps)*gamma_ki*min(E)*I_bot/H^2; %[N]
if H>40
    % Calcul de Ncr sous P seul, hyp il n'y a que deux troncons en dessous
    ncr=2;
    rho=input('Entrez la valeur de rho provenant des abaques : ');

    Ncr_P=rho*pi^2*min(E)*max(I(1),I(2))/(ncr*(L_segment(1)+L_segment(2)))^2;
    chi=P_env_int/Ptot;
    Ncr=(1+chi)*Ncr_pp*Ncr_P/(chi*Ncr_pp+Ncr_P);
else
    Ncr=Ncr_pp;
end
DreverData.Ncr=Ncr;
alpha_cr=1/(1-Ptot/Ncr);

% Sauvetage des données pour passer de part 1 à part 2 et part 3
DreverData.Nb_segment=Nb_segment;
DreverData.L_segment=L_segment;
DreverData.Ncr=Ncr;
DreverData.alpha_cr=alpha_cr;

Poids=sum([Materials.Density].*L_troncons.*A);
disp(['Poids = ', num2str(Poids)]);

```

Annexe 5 : Logiciel – deuxième partie

```
function [ Loads, Combo, DreverData ] = aaa_TFE_Part2_loads(DreverData,
Materials,Geometries)

% Chargement des données de part 1
N = DreverData.N;
L_troncons = DreverData.L_troncons;
H=sum(L_troncons);
d = DreverData.d;
D = DreverData.D;
e = DreverData.e;
A = DreverData.A;
I = DreverData.I;
if H>40
    D_int=DreverData.D_int;
    e_int=DreverData.e_int;
    Node_d=DreverData.Node_d;
    P_env_int=DreverData.P_env_int;
end
g=DreverData.g;
cat_terr=DreverData.cat_terr;
v_b0=DreverData.v_b0;
gamma=DreverData.gamma;
RC=DreverData.RC;
NbPass=DreverData.NbPass;
APass=DreverData.APass;
if NbPass>0
    Node_Pass=DreverData.Node_Pass;
end
E=DreverData.Materials.Young;
Nb_segment=DreverData.Nb_segment;
L_segment=DreverData.L_segment;
Ncr=DreverData.Ncr;
alpha_cr=DreverData.alpha_cr;
phi = DreverData.phi;
n = DreverData.n;

% Propriétés de l'air
rho_air=1.25; %Masse volumique de l'air [kg/m^3]
nu_air=15*10^(-6); %viscosité cinématique de l'air [m^2/s]

%Imperfections
Delta=H/500*sqrt(1+50/H);
Phi=Delta/H;

%% Poids propre
Loads(1).Name='Poids propre';
Loads(1).IsEditbl=0;
Loads(1).F_elem=[];
Loads(1).F_node=[];
Loads(1).p_elem=[];
Loads(1).Mass_elem=[];
Loads(1).M_elem=[];
Loads(1).M_node=[];
Loads(1).DeltaT=[];
Loads(1).Mass_node=[];
Loads(1).mass_elem=[];
Loads(1).Settl=[];
Loads(1).hydroP=[];
```

```

Loads(1).h=[];
Loads(1).LoadScales.F=NaN;
Loads(1).LoadScales.M=NaN;
Loads(1).LoadScales.q=NaN;
Loads(1).LoadScales.m=NaN;
Loads(1).LoadScales.Mass=NaN;

% Imperfections poids propre
P_elem=[Materials.Density].*L_troncons.*A*g;
Loads(2).Name='Charges d''imperfection correspondant au poids propre';
Loads(2).IsEditbl=0;
Loads(2).F_elem=[];
for i=1:N
    Loads(2).F_node(i).node=i+1;
    Loads(2).F_node(i).loadX=Phi*P_elem(i);
    Loads(2).F_node(i).loadY=0;
    Loads(2).F_node(i).loadx=NaN;
    Loads(2).F_node(i).loady=NaN;
    Loads(2).F_node(i).magnitude=Phi*P_elem(i);
    Loads(2).F_node(i).direction='Global X';
end
Loads(2).p_elem=[];
Loads(2).Mass_elem=[];
Loads(2).M_elem=[];
Loads(2).M_node=[];
Loads(2).DeltaT=[];
Loads(2).Mass_node=[];
Loads(2).mass_elem=[];
Loads(2).Settl=[];
Loads(2).hydroP=[];
Loads(2).h=[];
Loads(2).LoadScales.F=max(Phi*P_elem);
Loads(2).LoadScales.M=NaN;
Loads(2).LoadScales.q=NaN;
Loads(2).LoadScales.m=NaN;
Loads(2).LoadScales.Mass=NaN;

% Poids de l'enveloppe intérieure
if H>40
    Loads(3).Name='Poids de l''enveloppe intérieure';
    Loads(3).IsEditbl=0;
    Loads(3).F_elem=[];
    Loads(3).F_node.node=Node_d;
    Loads(3).F_node.loadX=0;
    Loads(3).F_node.loadY=-P_env_int;
    Loads(3).F_node.loadx=NaN;
    Loads(3).F_node.loady=NaN;
    Loads(3).F_node.magnitude=-P_env_int;
    Loads(3).F_node.direction='Global Y';
    Loads(3).p_elem=[];
    Loads(3).Mass_elem=[];
    Loads(3).M_elem=[];
    Loads(3).M_node=[];
    Loads(3).DeltaT=[];
    Loads(3).Mass_node=[];
    Loads(3).mass_elem=[];
    Loads(3).Settl=[];
    Loads(3).HydroP=[];
    Loads(3).h=[];
    Loads(3).LoadScales.F=P_env_int;
    Loads(3).LoadScales.M=NaN;

```

```

Loads(3).LoadScales.q=NaN;
Loads(3).LoadScales.m=NaN;
Loads(3).LoadScales.Mass=NaN;

% Imperfection poids de l'enveloppe intérieure
Loads(4).Name='Charge d'imperfection correspondant au poids de
l'enveloppe intérieure';
Loads(4).IsEditbl=0;
Loads(4).F_elem=[];
Loads(4).F_node.node=Node_d;
Loads(4).F_node.loadX=Phi*P_env_int;
Loads(4).F_node.loadY=0;
Loads(4).F_node.loadx=NaN;
Loads(4).F_node.loady=NaN;
Loads(4).F_node.magnitude=Phi*P_env_int;
Loads(4).F_node.direction='Global X';
Loads(4).p_elem=[];
Loads(4).Mass_elem=[];
Loads(4).M_elem=[];
Loads(4).M_node=[];
Loads(4).DeltaT=[];
Loads(4).Mass_node=[];
Loads(4).mass_elem=[];
Loads(4).Settl=[];
Loads(4).HydroP=[];
Loads(4).h=[];
Loads(4).LoadScales.F=Phi*P_env_int;
Loads(4).LoadScales.M=NaN;
Loads(4).LoadScales.q=NaN;
Loads(4).LoadScales.m=NaN;
Loads(4).LoadScales.Mass=NaN;
end

%% Charges d'exploitation
if NbPass>0
    if H>40
        nn=5;
    else
        nn=3;
    end
    Loads(nn).Name='Charges d'exploitation sur les passerelles';
    Loads(nn).IsEditbl=0;
    Loads(nn).F_elem=[];
    for i=1:length(Node_Pass)
        if Node_Pass(i)>0
            Loads(nn).F_node(i).node=Node_Pass(i);
            Loads(nn).F_node(i).loadX=0;
            Loads(nn).F_node(i).loadY=-APass*2000;
            Loads(nn).F_node(i).loadx=NaN;
            Loads(nn).F_node(i).loady=NaN;
            Loads(nn).F_node(i).magnitude=-APass*2000;
            Loads(nn).F_node(i).direction='Global X';
        end
    end
    Loads(nn).p_elem=[];
    Loads(nn).Mass_elem=[];
    Loads(nn).M_elem=[];
    Loads(nn).M_node=[];
    Loads(nn).DeltaT=[];
    Loads(nn).Mass_node=[];
    Loads(nn).mass_elem=[];

```

```

Loads(nn).Settl=[];
Loads(nn).HydroP=[];
Loads(nn).h=[];
Loads(nn).LoadScales.F=APass*2000;
Loads(nn).LoadScales.M=NaN;
Loads(nn).LoadScales.q=NaN;
Loads(nn).LoadScales.m=NaN;
Loads(nn).LoadScales.Mass=NaN;

Loads(nn+1).Name='Charges d'imperfection correspondant aux charges
d'exploitation sur les passerelles';
Loads(nn+1).IsEditbl=0;
Loads(nn+1).F_elem=[];
for i=1:length(Node_Pass)
    if Node_Pass(i)>0
        Loads(nn+1).F_node(i).node=Node_Pass(i);
        Loads(nn+1).F_node(i).loadX=Phi*APass*2000;
        Loads(nn+1).F_node(i).loadY=0;
        Loads(nn+1).F_node(i).loadx=NaN;
        Loads(nn+1).F_node(i).loady=NaN;
        Loads(nn+1).F_node(i).magnitude=Phi*APass*2000;
        Loads(nn+1).F_node(i).direction='Global X';
    end
end
Loads(nn+1).p_elem=[];
Loads(nn+1).Mass_elem=[];
Loads(nn+1).M_elem=[];
Loads(nn+1).M_node=[];
Loads(nn+1).DeltaT=[];
Loads(nn+1).Mass_node=[];
Loads(nn+1).mass_elem=[];
Loads(nn+1).Settl=[];
Loads(nn+1).HydroP=[];
Loads(nn+1).h=[];
Loads(nn+1).LoadScales.F=Phi*APass*2000;
Loads(nn+1).LoadScales.M=NaN;
Loads(nn+1).LoadScales.q=NaN;
Loads(nn+1).LoadScales.m=NaN;
Loads(nn+1).LoadScales.Mass=NaN;
else
    if H>40
        nn=3;
    else
        nn=1;
    end
end
end
%% Charges équivalentes de vent
% 1) Composante statique et composante dynamique dans la direction du vent
c_dir=1;
c_season=1;
v_b=c_dir*c_season*v_b0; %vitesse de référence [m/s]
c_0=1;
z_02=0.05; %[m]
z_max=200; %[m]
z(1)=L_troncons(1);
for i=2:N
    z(i)=sum(L_troncons(1:i)); %[m]
end

if cat_terr==0
    z_0=0.003; %[m]

```

```

        z_min=1; %[m]
elseif cat_terr==1
    z_0=0.01;
    z_min=1;
elseif cat_terr==2
    z_0=0.05;
    z_min=2;
elseif cat_terr==3
    z_0=0.3;
    z_min=5;
elseif cat_terr==4
    z_0=1;
    z_min=10;
end
k_r=0.19*(z_0/z_02)^0.07;
k_l=1;
for i=1:N
    c_r(i)=k_r*log(max(z_min,min(z(i),z_max))/z_0);
    v_m(i)=c_r(i)*c_0*v_b; %[m/s]
    I_v(i)=k_l/(c_0*log(max(z_min,min(z(i),z_max))/z_0));
    q_p(i)=(1+7*I_v(i))*1/2*rho_air*v_m(i)^2;%Pression dynamique de pointe
    [N/m^2]
    nu(i)=sqrt(2*q_p(i)/rho_air);
end
Re=D*nu/nu_air;
k=10^-5;
[ c1,c2,c3,c4,c5,c6 ] = Coeff_Intrep_axelog();
if H<15
    lambda=min(H/D,70);
elseif H>=50
    lambda=min(0.7*H/D,70);
else
    lambda=min(6.43/D+0.57*H/D,70);
end

for i=1:N
    A_proj(i)=L_troncons(i)*pi*D;
    A_c(i)=L_troncons(i)*pi*D;
    remp(i)=A_proj(i)/A_c(i);
    if (1<=lambda) && (lambda<=10) && (remp(i)==1)
        psi_lambda(i)=1/c2*log10(c1*lambda);
    elseif (10<=lambda) && (lambda<=100) && (remp(i)==1)
        psi_lambda(i)=1/c4*log10(c3*lambda);
    elseif (100<=lambda) && (lambda<=200) && (remp(i)==1)
        psi_lambda(i)=1/c6*log10(c5*lambda);
    end
    if Re(i)<=1.8*10^5
        c_f0(i)=1.2;
    elseif (1.8*10^5<Re(i)) && (Re(i)<=4*10^5)
        c_f0(i)=0.11/(Re(i)/10^6)^1.4;
    elseif (4*10^5<Re(i)) && (Re(i)<=5.9*10^5)
        c_f0(i)=0.4;
    elseif 5.9*10^5<Re(i)
        c_f0(i)=1.2+(0.18*log10(10*k))/(1+0.4*log10(Re(i)/10^6));
    end
end
c_f=c_f0.*psi_lambda;
A_ref=L_troncons*D;
L_t=300; %[m]
z_t=200; %[m]
a=0.67+0.05*log(z_0);

```

```

L=L_t*(max(z_min,0.6*H)/z_t)^a;

%Propriétés a la hauteur zs=0.6*H :
c_rs=k_r*log(max(z_min,min(0.6*H,z_max))/z_0);
v_ms=c_rs*c_0*v_b; %[m/s]
I_vs=k_l/(c_0*log(max(z_min,min(0.6*H,z_max))/z_0));
q_ps=(1+7*I_vs)*1/2*rho_air*v_ms^2; %[N/m^2]
nus=sqrt(2*q_ps/rho_air);
Res=D*nus/nu_air;
if Res<=1.8*10^5
    c_f0s=1.2;
elseif (1.8*10^5<Res) && (Res<=4*10^5)
    c_f0s=0.11/(Res/10^6)^1.4;
elseif (4*10^5<Res) && (Res<=5.9*10^5)
    c_f0s=0.4;
elseif 5.9*10^5<Res
    c_f0s=1.2+(0.18*log10(10*k))/(1+0.4*log10(Res/10^6));
end
i=1;
while sum(L_troncons(1:i))<0.6*H
    i=i+1;
end
c_fs=c_f0s*psi_lambda(i);

B_c=1/(1+0.9*((D+H)/L)^0.63);
delta_s=0.012;
delta_d=0;
m_e=trapz([0 cumsum(L_troncons)], [0 Materials.Density].*[0
Geometries.A].*phi'.^2) / ...
    trapz([0 cumsum(L_troncons)], phi'.^2);
for j=1:length(n)
    f_l(j)=n(j)*L/v_ms;
    S_L(j)=6.8*f_l(j)/(1+10.2*f_l(j))^(5/3);
    delta_a(j)=c_fs*rho_air*D*v_ms/(2*n(j)*m_e);
    delta(j)=delta_s+delta_a(j)+delta_d;
    eta_h(j)=4.6*H/L*f_l(j);
    eta_b(j)=4.6*D/L*f_l(j);
    if eta_h(j)==0
        R_h(j)=1;
    else
        R_h(j)=1/eta_h(j)-1/(2*eta_h(j)^2)*(1-exp(-2*eta_h(j)));
    end
    if eta_b(j)==0
        R_b(j)=1;
    else
        R_b(j)=1/eta_b(j)-1/(2*eta_b(j)^2)*(1-exp(-2*eta_b(j)));
    end
    R_c(j)=pi^2/(2*delta(j))*S_L(j)*R_h(j)*R_b(j);
end
T=600; %[s]
ff=max(n.*sqrt(R_c./(B_c+R_c)),0.2); %fréquence de franchissement (nu dans
l'EC)
k_p=max(3,sqrt(2*log(ff*T))+0.6*ones(1,length(n))./sqrt(2*log(ff*T)));
c_s=ones(1,length(n))*(1+7*I_vs*sqrt(B_c))/(1+7*I_vs);
c_d=(1+2*k_p*I_vs.*sqrt(B_c+R_c))./(1+7*I_vs*sqrt(B_c));
for i=1:N
    for j=1:length(n)
        F_wl(i,j)=c_s(j)*c_d(j)*c_f(i).*q_p(i).*A_ref(i);
    end
end
end

```

```

% 2) Composante dynamique perpendiculaire à la direction du vent due au
% tourbillons de VK
S_t=0.18;
v_crit=D*n/S_t;
vt=0;
for j=1:length(n)
    if v_crit(j)<1.25*max(v_m)
        vt=1;
        Re_crit(j)=D*v_crit(j)/nu_air;
        S_c(j)=2*delta_s*m_e/(rho_air*D^2);
        if Re_crit(j)<=10^5
            K_a(j)=2;
            C_c(j)=0.02;
        elseif (10^5<Re_crit(j)) && (Re_crit(j)<=5*10^5)
            K_a(j)=2+(2-0.5)/(10^5-5*10^5)*(Re_crit(j)-10^5);
            C_c(j)=0.02+(0.05-0.005)/(10^5-5*10^5)*(Re_crit(j)-10^5);
        elseif (5*10^5<Re_crit(j)) && (Re_crit(j)<=10^6)
            K_a(j)=0.5+(0.5-1)/(5*10^5-10^6)*(Re_crit(j)-5*10^5);
            C_c(j)=0.005+(0.005-0.01)/(5*10^5-10^6)*(Re_crit(j)-5*10^5);
        elseif Re_crit(j)>10^6
            K_a(j)=1;
            C_c(j)=0.01;
        end
        a_L=0.4;
        c_1(j)=a_L^2/2*(1-S_c(j)/(4*pi*K_a(j)));
        kp(j)=sqrt(2)*(1+1.2*atan(0.75*(S_c(j)/(4*pi*K_a(j)))^4));
        for i=1:N
            c_2(j)=rho_air*D^2/m_e*a_L^2/K_a(j)*C_c(j)^2/S_t(j)^4*D/H;
            sigma_y(j)=D*sqrt(c_1(j)+sqrt(c_1(j)^2+c_2(j)));
            y_max(j)=kp(j)*sigma_y(j);

F_w2(i,j)=Materials(i).Density*Geometries(i).A*(2*pi*n(j))^2*phi(i+1,j)*y_m
ax(j)*L_troncons(i);
        end
    end
end
DrevertData.vt=vt;
%% Structures des forces pour BeamZ - Vent longitudinal
Loads(nn+2).Name='Force de vent dans la direction du vent';
Loads(nn+2).IsEditbl=0;
Loads(nn+2).F_elem=[];
for i=1:N
    Loads(nn+2).F_node(i).node=i+1;
    Loads(nn+2).F_node(i).loadX=F_w1(i);
    Loads(nn+2).F_node(i).loadY=0;
    Loads(nn+2).F_node(i).loadx=NaN;
    Loads(nn+2).F_node(i).loady=NaN;
    Loads(nn+2).F_node(i).magnitude=F_w1(i);
    Loads(nn+2).F_node(i).direction='Global X';
end
Loads(nn+2).p_elem=[];
Loads(nn+2).Mass_elem=[];
Loads(nn+2).M_elem=[];
Loads(nn+2).M_node=[];
Loads(nn+2).DeltaT=[];
Loads(nn+2).Mass_node=[];
Loads(nn+2).mass_elem=[];
Loads(nn+2).Settl=[];
Loads(nn+2).HydroP=[];
Loads(nn+2).h=[];
Loads(nn+2).LoadScales.F=max(F_w1(1:end));

```

```

Loads(nn+2).LoadScales.M=NaN;
Loads(nn+2).LoadScales.q=NaN;
Loads(nn+2).LoadScales.m=NaN;
Loads(nn+2).LoadScales.Mass=NaN;

%% Vent transversal
if v_crit(1)<1.25*max(v_m)
    Loads(nn+3).Name='Force de vent dans la direction perpendiculaire au
vent';
    Loads(nn+3).IsEditbl=0;
    Loads(nn+3).F_elem=[];
    for i=1:N
        Loads(nn+3).F_node(i).node=i+1;
        Loads(nn+3).F_node(i).loadX=F_w2(i);
        Loads(nn+3).F_node(i).loadY=0;
        Loads(nn+3).F_node(i).loadx=NaN;
        Loads(nn+3).F_node(i).loady=NaN;
        Loads(nn+3).F_node(i).magnitude=F_w2(i);
        Loads(nn+3).F_node(i).direction='Global X';
    end
    Loads(nn+3).p_elem=[];
    Loads(nn+3).Mass_elem=[];
    Loads(nn+3).M_elem=[];
    Loads(nn+3).M_node=[];
    Loads(nn+3).DeltaT=[];
    Loads(nn+3).Mass_node=[];
    Loads(nn+3).mass_elem=[];
    Loads(nn+3).Settl=[];
    Loads(nn+3).HydroP=[];
    Loads(nn+3).h=[];
    Loads(nn+3).LoadScales.F=max(F_w2);
    Loads(nn+3).LoadScales.M=NaN;
    Loads(nn+3).LoadScales.q=NaN;
    Loads(nn+3).LoadScales.m=NaN;
    Loads(nn+3).LoadScales.Mass=NaN;
end

%% Combinaison
if RC==1
    GammaG=1;
    GammaQ=1.2;
elseif RC==2
    GammaG=1.1;
    GammaQ=1.4;
elseif RC==3
    GammaG=1.2;
    GammaQ=1.6;
end

if H<=40
    Combo(1).Name='ELS 1';
    Combo(1).Type='Load combo';
    Combo(1).iCC=[1 2 (nn+2)];
    Combo(1).ampl=[1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

    if v_crit(1)<1.25*max(v_m)
        if NbPass>0
            Combo(2).Name='ELS 2';
            Combo(2).Type='Load combo';
            Combo(2).iCC=[1 2 nn (nn+1)];
            Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1];
        end
    end
end

```

```

Combo(3).Name='ELS 3';
Combo(3).Type='Load combo';
Combo(3).iCC=[1 2 (nn+3)];
Combo(3).ampl=[1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

Combo(4).Name='ELU 1';
Combo(4).Type='Load combo';
Combo(4).iCC=[1 2 (nn+2)];
Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];

Combo(5).Name='ELU 2';
Combo(5).Type='Load combo';
Combo(5).iCC=[1 2 nn (nn+1)];
Combo(5).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaQ alpha_cr*GammaQ];

Combo(6).Name='ELU 3';
Combo(6).Type='Load combo';
Combo(6).iCC=[1 2 (nn+3)];
Combo(6).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];

Combo(7).Name='Fatigue';
Combo(7).Type='Load combo';
Combo(7).iCC=[(nn+3)];
Combo(7).ampl=[0.2];
else
    Combo(2).Name='ELS 2';
    Combo(2).Type='Load combo';
    Combo(2).iCC=[1 2 (nn+3)];
    Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

    Combo(3).Name='ELU 1';
    Combo(3).Type='Load combo';
    Combo(3).iCC=[1 2 (nn+2)];
    Combo(3).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];

    Combo(4).Name='ELU 2';
    Combo(4).Type='Load combo';
    Combo(4).iCC=[1 2 (nn+3)];
    Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];

    Combo(5).Name='Fatigue';
    Combo(5).Type='Load combo';
    Combo(5).iCC=[(nn+3)];
    Combo(5).ampl=[0.2];
end
else
    if NbPass>0
        Combo(2).Name='ELS 2';
        Combo(2).Type='Load combo';
        Combo(2).iCC=[1 2 nn (nn+1)];
        Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1];

        Combo(3).Name='ELU 1';
        Combo(3).Type='Load combo';
        Combo(3).iCC=[1 2 (nn+2)];
        Combo(3).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];

        Combo(4).Name='ELU 2';

```

```

        Combo(4).Type='Load combo';
        Combo(4).iCC=[1 2 nn (nn+1)];
        Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaQ alpha_cr*GammaQ];
    else
        Combo(2).Name='ELU 1';
        Combo(2).Type='Load combo';
        Combo(2).iCC=[1 2 (nn+2)];
        Combo(2).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG alpha_cr*GammaQ];
    end
end
else
    Combo(1).Name='ELS 1';
    Combo(1).Type='Load combo';
    Combo(1).iCC=[1 2 3 4 (nn+2)];
    Combo(1).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

    if v_crit(1)<1.25*max(v_m)
        if NbPass>0
            Combo(2).Name='ELS 2';
            Combo(2).Type='Load combo';
            Combo(2).iCC=[1 2 3 4 nn (nn+1)];
            Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1];

            Combo(3).Name='ELS 3';
            Combo(3).Type='Load combo';
            Combo(3).iCC=[1 2 3 4 (nn+3)];
            Combo(3).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

            Combo(4).Name='ELU 1';
            Combo(4).Type='Load combo';
            Combo(4).iCC=[1 2 3 4 (nn+2)];
            Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];

            Combo(5).Name='ELU 2';
            Combo(5).Type='Load combo';
            Combo(5).iCC=[1 2 3 4 nn (nn+1)];
            Combo(5).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
GammaQ alpha_cr*GammaQ];

            Combo(6).Name='ELU 3';
            Combo(6).Type='Load combo';
            Combo(6).iCC=[1 2 3 4 (nn+3)];
            Combo(6).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];

            Combo(7).Name='Fatigue';
            Combo(7).Type='Load combo';
            Combo(7).iCC=[(nn+3)];
            Combo(7).ampl=[0.2];
        else
            Combo(2).Name='ELS 2';
            Combo(2).Type='Load combo';
            Combo(2).iCC=[1 2 3 4 (nn+3)];
            Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1 alpha_cr*1];

            Combo(3).Name='ELU 1';
            Combo(3).Type='Load combo';
            Combo(3).iCC=[1 2 3 4 (nn+2)];

```

```

        Combo(3).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];

        Combo(4).Name='ELU 2';
        Combo(4).Type='Load combo';
        Combo(4).iCC=[1 2 3 4 (nn+3)];
        Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];

        Combo(5).Name='Fatigue';
        Combo(5).Type='Load combo';
        Combo(5).iCC=[(nn+3)];
        Combo(5).ampl=[0.2];
    end
else
    if NbPass>0
        Combo(2).Name='ELS 2';
        Combo(2).Type='Load combo';
        Combo(2).iCC=[1 2 3 4 nn (nn+1)];
        Combo(2).ampl=[1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1 1 alpha_cr*1];

        Combo(3).Name='ELU 1';
        Combo(3).Type='Load combo';
        Combo(3).iCC=[1 2 3 4 (nn+2)];
        Combo(3).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];

        Combo(4).Name='ELU 2';
        Combo(4).Type='Load combo';
        Combo(4).iCC=[1 2 3 4 nn (nn+1)];
        Combo(4).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
GammaQ alpha_cr*GammaQ];
    else
        Combo(2).Name='ELU 1';
        Combo(2).Type='Load combo';
        Combo(2).iCC=[1 2 3 4 (nn+2)];
        Combo(2).ampl=[GammaG alpha_cr*GammaG GammaG alpha_cr*GammaG
alpha_cr*GammaQ];
    end
end
end
DreverData.v_m=v_m;

% Nested function
function [ c1,c2,c3,c4,c5,c6 ] = Coeff_Intrep_axelog()
%% Partie 1
x=[1 10];
y=[0.6 0.699];
syms c1 c2
[c1,c2]=solve([c2*y(1)-log10(c1*x(1))==0, c2*y(2)-log10(c1*x(2))==0],[c1
c2]);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
%% Partie 2
x=[10 100];
y=[0.699 0.95];
syms c3 c4
[c3,c4]=solve([c4*y(1)-log10(c3*x(1))==0, c4*y(2)-log10(c3*x(2))==0],[c3
c4]);
c3=double(c3);

```

```

c4=double(c4);
%% Partie 3
x=[100 200];
y=[0.95 1];
syms c5 c6
[c5,c6]=solve([c6*y(1)-log10(c5*x(1))==0, c6*y(2)-log10(c5*x(2))==0],[c5
c6]);
c5=double(c5);
c6=double(c6);

```

Annexe 6 : Logiciel – troisième partie

```
function [ELS, ELU1, ELU2, FAT] = TFE_Part3_Checks (DreverData, Axial,  
Bendi, Shear, Displ)
```

```
% Chargement des données de part 1 et part 2
```

```
N = DreverData.N;  
L_troncons = DreverData.L_troncons;  
H=sum(L_troncons);  
d = DreverData.d;  
D = DreverData.D;  
e = DreverData.e;  
A = DreverData.A;  
I = DreverData.I;  
Materials=DreverData.Materials;  
fy=[DreverData.Materials.MaxStrs];  
E=[DreverData.Materials.Young];  
if H>40  
    D_int=DreverData.D_int;  
    e_int=DreverData.e_int;  
    Node_d=DreverData.Node_d;  
    DreverData.P_env_int=P_env_int;  
end  
Nb_segment=DreverData.Nb_segment;  
g=DreverData.g;  
gamma=DreverData.gamma;  
RC=DreverData.RC;  
NbPass=DreverData.NbPass;  
TD=DreverData.TD;  
Classe=DreverData.Classe;  
Mf=DreverData.Mf;  
Cr=DreverData.Cr;  
sigma_d1=DreverData.sigma_d1;  
sigma_d2=DreverData.sigma_d2;  
sigma_d3=DreverData.sigma_d3;  
L_segment=DreverData.L_segment;  
Ncr=DreverData.Ncr;  
phi = DreverData.phi;  
n = DreverData.n;  
vt=DreverData.vt;  
v_m=DreverData.v_m;
```

```
for i=1:N  
    if H>40  
        gamma_M0(i)=1.1;  
    else  
        if sum(L_troncons(1:i))<=d  
            gamma_M0(i)=1;  
        else  
            gamma_M0(i)=1.1;  
        end  
    end  
end  
gamma_M1=1.1;  
if Mf==1  
    if Cr==1  
        gamma_Mf=1;  
    elseif Cr==2  
        gamma_Mf=1.15;  
    end  
end
```

```

elseif Mf==2
    if Cr==1
        gamma_Mf=1.15;
    elseif Cr==2
        gamma_Mf=1.35;
    end
end
W_el=I/(D/2);
fyd=fy./gamma_M0;

%% Emplacement et nombre de combinaison ELS
if H<=40
    if NbPass>0
        if vt==1
            cb=7;
            ncb=3;
        else
            cb=6;
            ncb=2;
        end
    else
        if vt==1
            cb=5;
            ncb=2;
        else
            cb=4;
            ncb=1;
        end
    end
end
else
    if NbPass>0
        if vt==1
            cb=9;
            ncb=3;
        else
            cb=8;
            ncb=2;
        end
    else
        if vt==1
            cb=7;
            ncb=2;
        else
            cb=6;
            ncb=1;
        end
    end
end
end

%% Vérification d'ovalisation
S_t=0.18;
p=0.3; %coefficient de poisson
L_raid=zeros(1,Nb_segment);
i=2;
for j=1:Nb_segment
    L_raid(j)=L_troncons(i-1);
    El(j,1)=[i-1];
    while (i<=N) && (e(i)==e(i-1))
        L_raid(j)=L_raid(j)+L_troncons(i);
        El(j,end+1)=i;
        i=i+1;
    end
end

```

```

        end
        i=i+1;
    end
    for i=1:N

        n_o(i)=0.492*sqrt(e(i)^3*Materials(i).Young/(Materials(i).Density*e(i)*(1-
        p^2)*D^4));
        v_crito(i)=D*n_o(i)/(2*S_t);
        raid=0;
        if v_crito(i)<v_m(i)
            raid=1;
        end
    end
    if raid==1
        for j=1:Nb_segment
            nz=nonzeros(E1(j,:));
            n_o(nz)=8.146*10^(-
            3)/L_raid(j)*sqrt(min(e(nz))*min([Materials(nz).Young]/(gamma*(1-p^2)*D));
            v_crito(nz)=D*n_o(nz)/(2*S_t);
            while v_crito(nz)<v_m(nz)
                L_raid(j)=L_raid(j)/2;
                n_o(nz)=8.146*10^(-
            3)/L_raid(j)*sqrt(min(e(nz))*min([Materials(nz).Young]/(gamma*(1-p^2)*D));
                v_crito(nz)=D*n_o(nz)/(2*S_t);
            end
            disp(['Sur le segment de construction ' num2str(j) ' doit être
            placé des raidisseurs espacés de ' num2str(L_raid(j)) ' m pour éviter
            l''ovalisation']);
        end
    end

    %% Vérification ELS
    % Déplacement dans le sens du vent dus a valeur caractéristique du vent
    ELS(1)=0;
    if NbPass>0
        if H>40
            vl=7;
        else
            vl=5;
        end
    else
        if H>40
            vl=5;
        else
            vl=3;
        end
    end
    if (Displ(3*N+1,vl)<=H/50)
        ELS(1)=1;
        disp('La cheminée est vérifiée à l''ELS pour les déplacements dans le
        sens du vent');
    else
        disp('La cheminée n''est pas vérifiée à l''ELS pour les déplacements
        dans le sens du vent, retour à la conception');
    end
    % Amplitudes des vibrations dues aux tourbillons de Von Karman
    if vt==1
        ELS(2)=0;
        if RC==1
            dep_max=0.15*D;
        elseif RC==2

```

```

        dep_max=0.1*D;
elseif RC==3
    dep_max=0.05*D;
end
if (Displ(3*N+1,vl+1)<=dep_max)
    ELS(2)=1;
    disp('La cheminée est vérifiée à l''ELS pour les déplacements dans
le sens transversal au vent');
else
    disp('La cheminée n''est pas vérifiée à l''ELS pour les
déplacements dans le sens transversal au vent, retour à la conception');
end
end

%% Calcul des contraintes maximales sur chaque segment de construction
m=1;
while d-sum(L_troncons(1:m))>0
    m=m+1;
end
m=m+1;
if H>40
    D_tuyau=D_int;
else
    D_tuyau=D;
end
teta=2*asin(D_tuyau/D);
A(m)=pi*(D^2-(D-2*e(m))^2)/4-((D/2)^2*teta/2-((D-2*e(m))/2)^2*teta/2);
edCG=(D/2-(D/2*sin(teta)/teta));
I(m)=pi*(D^4-(D-2*e(m))^4)/64*(teta/2-(sin(teta)*cos(teta))/2);
W_el(m)=I(m)/(D/2);
for i=1:length(L_segment)
    nz=nonzeros(El(i,:));
    nzb(i)=nz(1);
end
for j=1:length(L_segment)
    sigma(j,:)=Axial(nzb(j),cb+ncb:cb+2*ncb-
1)/A(nzb(j))+Bendi(nzb(j),cb+ncb:cb+2*ncb-1)/W_el(nzb(j));
    tau(j,:)=Shear(1,cb+ncb:cb+ncb*2-
1)*(A(nzb(j))/2)/(I(nzb(j))*e(nzb(j)));
end

%% Vérification en section, ELU
% Pour la base de chaque tronçon en considérant la section totale
for j=1:length(L_segment)
    VM(j,:)=sqrt(sigma(j,:).^2+3*tau(j,:).^2);
    ELU1(j,:)=zeros(length(VM(j,:)),1);
    for i=1:length(VM(j,:))
        if VM(j,i)<=fyd(nzb(j))
            ELU1(j,i)=1;
        end
    end
end
end

if ELU1==ones(length(L_segment),length(VM(1,:)))
    disp('Les vérifications en section sont satisfaites');
else
    disp('Les vérifications en section ne sont pas satisfaites, retour à la
conception');
end

%% Vérification au voilement, ELU

```

```

w=L_segment/(D/2).*sqrt((D/2)*ones(1,length(L_segment))./[e(nzb)]);
if Classe == 1, Q = 40; elseif Classe == 2, Q = 25; elseif Classe == 3, Q =
16; end

% En base
Cxb=3;
if w(1)<=1.7
    Cx=1;
elseif (1.7<w(1)) && (w(1)<=0.5*(D/2)/e(1))
    Cx=1.36-1.83/w(1)+2.07/w(1)^2;
elseif w(1)>0.5*(D/2)/e(1)
    Cx=max(0.6,1+0.2/Cxb*(1-2*w(1)*e(1)/(D/2)));
end
dw=1/Q*sqrt((D/2)/e(1))*e(1);
alpha=0.62/(1+1.91*(dw/e(1))^1.44);
lambda_0=0.2;
beta=0.6;
eta=1;
Scr=0.605*E*Cx.*e/(D/2);
lambda_p=sqrt(alpha/(1-beta));
lambda=sqrt(fy(1)/Scr(1));
if lambda<=lambda_0
    chi=1;
elseif (lambda_0<lambda) && (lambda<=lambda_p)
    chi=1-beta*((lambda-lambda_0)/(lambda_p-lambda_0))^eta;
elseif lambda> lambda_p
    chi=alpha/lambda^2;
end
Sk=fy(1)*chi;
Sd=Sk/gamma_M1;
ELU2(1,:)=zeros(length(ELU1(1,:)),1);
for i=1:length(ELU2(1,:))
    if -sigma(1,i)<=Sd
        ELU2(1,i)=1;
    end
end
% Pour les autres segments
Cxb=1;
for j=2:length(L_segment)
    if w(j)<=1.7
        Cx(j)=1;
    elseif (1.7<w(j)) && (w(j)<=0.5*(D/2)/e(nzb(j)))
        Cx(j)=1.36-1.83/w(j)+2.07/w(j)^2;
    elseif w(j)>0.5*(D/2)/e(j)
        Cx(j)=max(0.6,1+0.2/Cxb*(1-2*w(j)*e(nzb(j))/(D/2)));
    end
    dw(j)=1/Q*sqrt((D/2)/e(nzb(j)))*e(nzb(j));
    alpha(j)=0.62/(1+1.91*(dw(j)/e(nzb(j)))^1.44);
    lambda(j)=sqrt(fy(nzb(j))/Scr(nzb(j)));
    if lambda(j)<=lambda_0
        chi(j)=1;
    elseif (lambda_0<lambda(j)) && (lambda(j)<=lambda_p)
        chi(j)=1-beta*((lambda(j)-lambda_0)/(lambda_p-lambda_0))^eta;
    elseif lambda(j)> lambda_p
        chi(j)=alpha(j)/lambda(j)^2;
    end
    Sk(j)=fy(nzb(j))*chi(j);
    Sd(j)=Sk(j)/gamma_M1;
    ELU2(j,:)=zeros(length(ELU1(1,:)),1);
    for i=1:length(ELU2(j,:))
        if -sigma(j,i)<=Sd(j)

```

```

        ELU2(j,i)=1;
    end
end
end

if ELU2==ones(length(L_segment),length(ELU2(1,:)))
    disp('Les vérifications au voilement sont satisfaites');
else
    disp('Les vérifications au voilement ne sont pas satisfaites, retour à la conception');
end

%% Vérif flambement global
for i=cb+ncb:cb+2*ncb-1
    if Ncr>=Axial(1,i)
        ELU3(i-(cb+ncb)+1)=1;
    else
        ELU3(i-(cb+ncb)+1)=0;
    end
end
if ELU3(1:end)==1
    disp('La cheminée ne flambe pas de manière élastique');
else
    disp('La cheminée flambe de manière élastique, retour à la conception');
end

%% Vérification à la fatigue
% Calcul nombre de cycle du vent transversal
if vt==1
    T=3.2*10^7*TD;
    eps_0=0.15;
    v_crit=D*n(1)/S_t;
    v_0=0.2*v_m;
    N_vent=max(2*T*n(1)*eps_0*(ones(1,length(v_0))*v_crit/v_0)^2*exp(-(ones(1,length(v_0))*v_crit/v_0)^2));
end

FAT=ones(1,3);
V3a=2;
V3b=2;
V3c=2;
if vt==1
    % Soudure des sous-segments
    sigma=max(abs([Axial(2:end-2,cb+2*ncb)]./[A(2:end-1)]'+[Bendi(2:end-2,cb+2*ncb)]./[W_el(2:end-1)]'));
    dsigma=2*sigma;
    N_maxd1=2*10^6*((sigma_d1/gamma_Mf)/(dsigma))^3;
    if N_vent<=N_maxd1, FAT(1,1)=1; else FAT(1,1)=0; end
    if dsigma>=1.5*min(fy), FAT(1,1)=0; end

    % Bride boulonnée au niveau du raidisseur
    nz=nonzeros(E1(1,:));

    sigma=abs([Axial(nz(end)+1,cb+2*ncb)]./[A(nz(end))]' + [Bendi(nz(end)+1,cb+2*ncb)]./[W_el(nz(end))]'');
    dsigma=2*sigma;
    N_maxd2=2*10^6*((sigma_d2/gamma_Mf)/(dsigma))^3;
    if N_vent<=N_maxd2, FAT(1,2)=1; else FAT(1,2)=0; end
end

```

```

% Bride boulonnée au niveau de la bride en supposant qu'il n'y a pas de
% raidisseur
N_maxd3=2*10^6*((sigma_d3/gamma_Mf)/(dsigma))^3;
if N_vent<=N_maxd3, FAT(1,3)=1; else FAT(1,3)=0; end

if dsigma>=1.5*min(fy)
    FAT(1,2:3)=0; end
end

if FAT==ones(1,3)
    disp('Les vérifications en fatigue sont satisfaites');
else
    disp('Les vérifications en fatigue ne sont pas satisfaites, retour à la
conception');
end

```