



monarbre.be

Paul Gourgue - Arboriste conseil

Expert auprès de la Direction des
Monuments et Sites
pour les soins et la sécurité
des arbres d'ornement

Expert auprès du consortium
de validation des compétences de la
Fédération Wallonie-Bruxelles

Membre de :
ICOMOS
EAG-ISA-SAG Baumstatik
Arboresco-BAAs

TEST DE STABILITÉ SUR UN PIN



Place du Général de Gaulle
34290 Abeilhan
France

21 septembre 2020



Introduction

L'expert soussigné est chargé par Monsieur Jean Pierre ROUGEOT de réaliser un test de traction sur 1 arbre dont la stabilité pourrait être défailante.

Les relevés sont effectués le lundi 21 septembre 2020 avec l'aide du personnel communal.

Situation

L'arbre est identifié par un point rouge sur la vue zénithale ci-dessous



L'arbre faisant l'objet de l'analyse est un Pin parasol qui provoque de nombreux dégâts sur les différentes structures bâties dans sa zone d'influence.

La direction de la traction appliquée est représentée par la flèche rouge. La traction est effectuée dans la direction Sud, le point d'ancrage est un tractopelle.



Un test capacité résiduelle d'ancrage est effectué afin de confirmer ou d'infirmer les craintes quant à un basculement probable de l'arbre. La résistance à la rupture du tronc n'est pas évaluée, ce dernier ne présentant aucune déformation lors de l'observation visuelle, cette information ne serait donc pas pertinente dans le cas présent.



Méthode

TEST DE STABILITÉ - TREEQINEETIC PICUS® ET ARBOSTAT®

Pour l'arbre, comme pour toute structure soumise à des charges, cet équilibre dépend de trois facteurs qui s'inscrivent dans le triangle de la statique :

LES CHARGES

Deux types de charges sont à prendre en compte, celles qui sont dues à la gravité (le « poids propre » de l'arbre) et celles qui sont dues au vent.

La masse d'un arbre peut atteindre plusieurs dizaines de tonnes mais les charges dues à son poids propre (ou « poids mort ») interviennent de façon peu significative.

La résistance en pression du bois (de l'ordre de 2 kN/cm²) est en effet très largement supérieure à la pression exercée par le poids propre.

Les charges supplémentaires dues à la neige ou à la glace, qui ne sont pas négligeables dans nos régions, peuvent causer des dégâts importants.

Les charges les plus significatives pour les arbres sont celles dues aux vents, dont la poussée est à l'origine de contraintes qui peuvent dépasser le seuil de résistance du bois ou provoquer le déchaussement complet du socle racinaire.

Du point de vue mécanique, le vent peut être assimilé à une masse en mouvement (masse volumique de l'air = 1,2 kg/m³) dont la puissance d'impact variera en fonction de la vitesse au carré ($E = 1/2mv^2$).

Chaque site possède ses régimes de vents propres en fonction de sa situation géographique, sa situation topographique ou sa localisation en milieu protégé (ville, boisement) ou exposé (rase campagne).

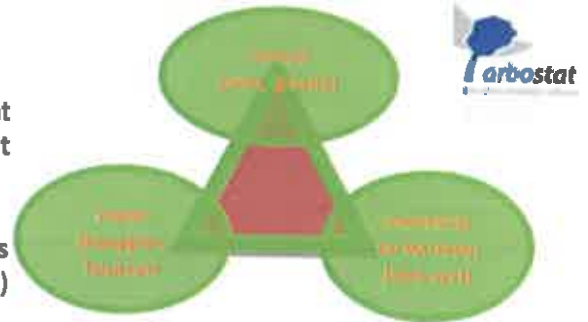
LE MATÉRIAU BOIS

Les propriétés mécaniques du bois sont principalement assurées par des cellules allongées dans l'axe longitudinal (fibres pour les feuillus, trachéides pour les conifères) dont les parois épaisses renferment cellulose et lignines, principaux constituants des tissus ligneux.

Lorsqu'un tronc fléchit sous la poussée du vent, les fibres s'allongent du côté du vent sous l'effet d'une traction et se rétrécissent à l'opposé sous l'effet d'une compression. Ce sont les fibres situées sous l'écorce à la périphérie du tronc qui sont le plus sollicitées, les contraintes diminuant vers l'intérieur du tronc jusqu'à s'annuler au niveau du centre (fibre neutre).

Les contraintes dues au vent s'exercent principalement au niveau du bois vivant. Le matériau considéré est le bois « vert » dont les propriétés diffèrent de celle du bois « sec », en raison de sa forte humidité.

Le bois est un matériau plus résistant en traction qu'en compression. Son seuil de résistance varie pour les bois verts de 1,4 kN/cm² (marronnier) à 2,8 kN/cm² (chêne). Les propriétés des bois verts des essences les plus communes sont répertoriées dans la table de résistance des bois verts de Stuttgart.





LA FORME DE L'ARBRE

La forme de l'arbre conditionne largement la poussée du vent à l'image de la voile d'un bateau. Les paramètres les plus importants sont :

LA SURFACE DU HOUPPIER

Plus cette surface est importante, plus elle offre d'appui au vent et plus la charge reçue par l'arbre est importante.

LA HAUTEUR

La vitesse du vent augmente avec l'altitude selon un coefficient α variable.

La hauteur détermine également l'importance du moment (bras de levier) appliqué à l'arbre (M moment = F force du vent x h hauteur).

Un calcul intégrant ces deux paramètres montre qu'à surfaces de houppier égales un arbre plus haut de 30% peut subir une poussée de vent deux fois plus forte.

L'AÉRODYNAMISME PROPRE DE L'ARBRE

Les arbres tendent à se replier sous l'effet du vent, ce qui diminue la surface de la « voile ». Cette capacité est exprimée par le coefficient de traînée C_x .

En plus de la forme générale de l'arbre, la dimension et la morphologie du tronc et des axes porteurs (charpentières, racines de support) sont d'une grande importance pour la résistance mécanique.

Dans le cas du cylindre (auquel le tronc est assimilé), le moment de résistance aux contraintes de flexion W varie en résistance des matériaux avec le diamètre de la section élevé à la puissance trois ($W = \pi/32 \times d^3$).

Du fait que les contraintes de flexion dues au vent s'exercent principalement vers l'extérieur du tronc, le rôle des parties intérieures est peu significatif, ce qui conduit à relativiser l'importance des cavités internes. La résistance en flexion d'un tube diminue par exemple de 25% seulement lorsque celui-ci est creux avec un rapport épaisseur de paroi/rayon de 1/3.

Les structures techniquement optimisées pour des économies de matière sont d'ailleurs des structures creuses, que ce soit celles que l'on observe dans les constructions (tubes, poutres métalliques...) ou dans la nature, bambous, os, plumes etc.

Ouvrage naturel, l'arbre est une structure complexe en évolution constante, qui se construit avec un matériau hétérogène susceptible de se dégrader, le bois.

Les notions de résistance des matériaux évoquées très succinctement ici sont donc à appliquer avec prudence mais paraissent néanmoins d'une grande importance pour le diagnostic de solidité de l'arbre.



LE TEST

Le test est basé sur l'évaluation des charges que peut subir un arbre et l'analyse de l'impact de ces charges sur sa structure.

Cette méthode permet d'évaluer la résistance en flexion du tronc et la capacité d'ancrage dans le sol du socle racinaire. Elle donne en outre la possibilité de détecter des défauts internes non décelés visuellement.

Le test de traction procède en deux étapes, une première étape de mesures sur l'arbre et une seconde étape de calculs consistant à évaluer les charges que produirait un vent violent (force 12 sur l'échelle Beaufort, 120 km/h).

Ce calcul intègre de nombreux paramètres dont la vitesse du vent, des données géométriques (hauteur précise mesurée avec un dendromètre, surface du houppier, diamètre du tronc), la limite de résistance du bois et son module de Young, la topographie du site, le coefficient de traînée...

Il aboutit au coefficient de sécurité globale de l'arbre.



Une traction est exercée à l'aide d'un treuil, un dynamomètre contrôlant en permanence les charges appliquées.



Pour étudier l'ancrage de l'arbre, quatre inclinomètres, fixés au niveau du collet mesurent, en millièmes de degrés l'inclinaison, que présente le socle racinaire sous la contrainte exercée.

Ces valeurs sont portées sur la courbe générale de basculement, courbe de référence établie par déracinement de plusieurs centaines d'arbres. La courbe générale de basculement donne la charge limite de basculement à partir d'angles d'inclinaison très faibles.

L'évaluation de la sécurité de basculement (*limite de basculement*) des arbres est impossible en utilisant uniquement des méthodes d'évaluation visuelle.

Les fouilles radicales fournissent également des informations insuffisantes et peuvent causer des perturbations importantes à la rhizosphère (*région du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés qui font partie du microbiote des végétaux*).

Une détermination fiable de la sécurité de basculement des arbres peut être obtenue en soumettant un arbre à des conditions similaires à celles créées par les rafales de vent (Inclino Method, SINN, 1983).

La recherche scientifique (BADER 2000, WESSOLLY 1998, SINN, 1985b, SINN 1985c) a montré que seules les racines situées à proximité du tronc étaient fortement sollicitées lorsque l'arbre était soumis à des forces de traction.

Un risque grave de déracinement apparaît lorsque les racines sont sectionnées à environ 1 mètre à 1,3 mètre du tronc de l'arbre.



La courbe générale de basculement a été établie scientifiquement à partir de tests de traction destructifs effectués sur plus de 400 arbres de différentes espèces dans différentes conditions de sol.

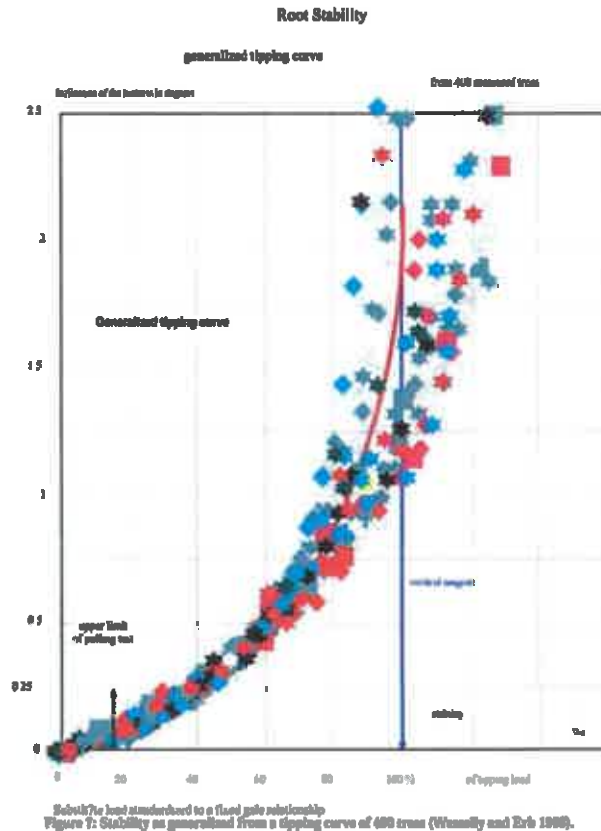
Cette courbe de basculement montre que la principale défaillance du processus de déracinement se produit déjà entre 2,5 et 4 degrés d'inclinaison (rupture primaire).

À partir de 4 degrés d'inclinaison, plus aucune augmentation de la force de traction n'est nécessaire jusqu'à ce qu'une inclinaison de 45 à 60 degrés soit atteinte (WESSOLLY, 1998).

De 45 à 60 degrés, le poids propre de l'arbre supporte le processus de chute (rupture secondaire).

L'influence de la pourriture des racines sur la stabilité de l'arbre peut être déterminée en utilisant la fonction mathématique de cette courbe (figure 7) dans les calculs.

Les valeurs recueillies et les calculs donnent pour chaque arbre un coefficient de sécurité de rupture du tronc et un coefficient de sécurité d'ancrage du système racinaire. Ces coefficients sont donnés pour un vent de force 12.



Lorsque le coefficient est supérieur à 1,5 l'arbre est considéré comme très fiable, les valeurs entre 1,5 et 1 engageront le gestionnaire à analyser précisément l'ensemble des éléments constituant le risque afin de déterminer la possibilité de réduire celui-ci. Lorsque les valeurs sont inférieures à 1, l'arbre n'est plus considéré comme fiable.

LES LIMITES DE LA MÉTHODE

La méthode prend en compte les aspects physiques de la sécurité d'un arbre face à une charge de vent donnée.

La méthode permet d'évaluer la sécurité de rupture du tronc (emplacement des sondes) et la sécurité de l'ancrage dans le sol d'un arbre. Elle ne permet pas d'évaluer la résistance des parties supérieures du tronc, des fourches, des branches charpentières et du houppier en général.

Les résultats obtenus permettent la recommandation de travaux de mise en sécurité le cas échéant, ils ne peuvent cependant suffire à une gestion à long terme du patrimoine arboré, celle-ci étant soumise à l'état physiologique, mécanique et environnemental de l'arbre étudié.

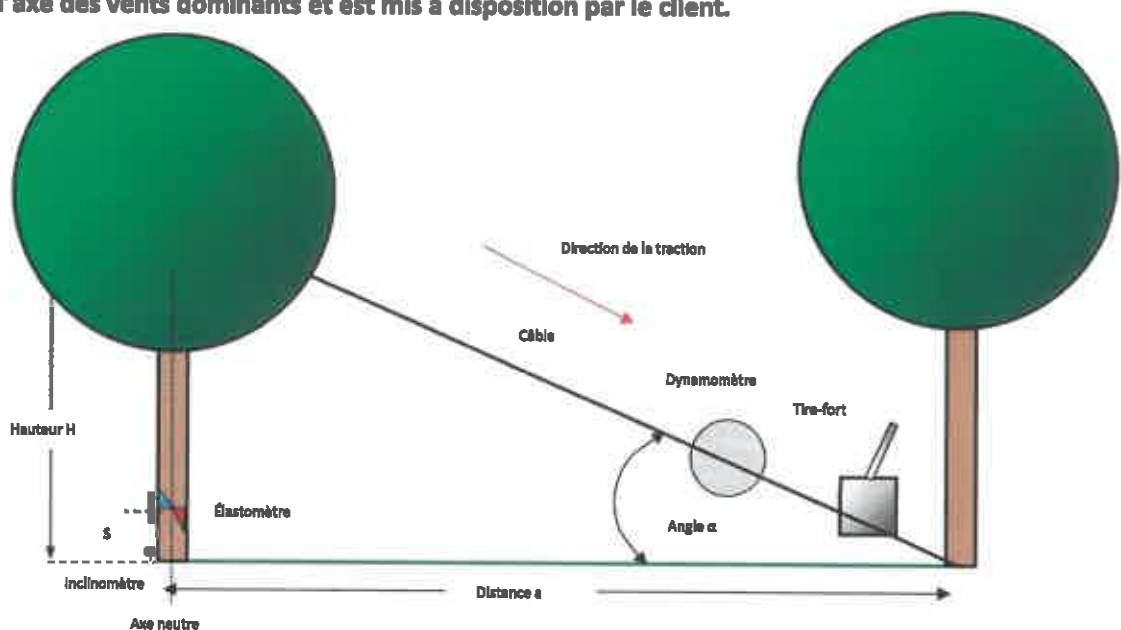
La méthode évalue un risque de rupture ou de basculement sous une force de vent de force 12 (échelle de Beaufort) mais ne peut donner précisément les conditions climatiques dans lesquelles la rupture se produirait.



EN PRATIQUE

Les tests de traction sont effectués dans les conditions suivantes :

- Un grimpeur élagueur est mis à disposition par le client lors de la prise de données, ce dernier est sollicité pour le placement des câbles dans les arbres ainsi que la manipulation du tirefort.
- Au minimum une traction est effectuée par sujet (4 inclinomètres et 4 élastomètres)
- Toutes les autorisations, signalisations, gestion de la circulation, etc. ... sont mises en œuvre par le client.
- Le point d'ancrage de chaque test de traction est soit un autre arbre, soit un véhicule dont la masse minimale au sol est de 7.5 tonnes ; il est situé lorsque la configuration du site le permet dans l'axe des vents dominants et est mis à disposition par le client.



Les tests sont réalisés grâce à la méthode développée par Lothar Wessolly (*) ; les données sont prises sur le terrain avec les outils électroniques (Picus TreeQinetic®) développés par la société Argus Electronic gmbh de Rostock, elles ont ensuite analysées et interprétées par le logiciel Arbostat® (Arbo safe – Gauting)

(*) Professeur Lothar Wessolly,
Inventeur méthode SIM/SIA, évaluation statique des arbres, Université de Stuttgart

Une charge maximale de 15kN (cette charge correspond approximativement à une brise de vent de 20km/h) est appliquée sur chaque arbre. Cette charge est mise en œuvre grâce à l'utilisation d'un câble en Dyneema® placé dans l'arbre ; ce câble est relié à un tirefort qui est fixé sur un engin d'une masse minimale au sol de 7.5 tonnes ou au pied d'un autre arbre à proximité.

Des sondes sont posées le collet (basculement).

Basculement : enregistrement de l'angle d'inclinaison du plateau racinaire sous la charge appliquée, en millième de degré. Des valeurs limites sont prises en considération, celle-ci correspondent approximativement à 10% de la limite de basculement.

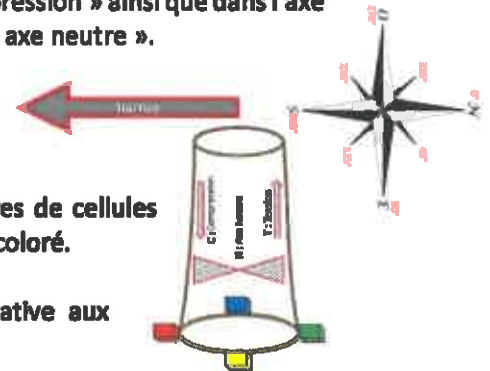
Ces tests ne portent pas préjudice aux arbres et les appareils utilisés permettent d'arrêter la charge appliquée bien avant que la limite d'élasticité ou de basculement ne soit atteinte.



TEST DE TRACTION

Les inclinomètres (basculement) sont positionnés en « tension et en compression » ainsi que dans l'axe perpendiculaire à la traction ; cet axe est nommé conventionnellement « axe neutre ».

La traction est effectuée selon les indications reprises sur le schéma à droite.



Dans les tableaux de présentation des résultats, la couleur des bordures de cellules représente la sonde utilisée, chaque sonde étant identifiée par un liseré coloré.

Les couleurs de remplissage des cellules donnent une indication relative aux résultats obtenus, soit :

Vert : fiable

Gris : peu fiable - évaluation précise du risque pour prise de décision

Rouge : non fiable - remplacement recommandé

NaN signifie qu'il n'y a pas d'appareil ou que les données recueillies n'étaient pas exploitables

ANALYSE DE LA CHARGE DES VENTS



Les propriétés du site sont définies en fonction de l'environnement général de l'arbre pour le facteur de voisinage et de l'environnement proche pour le facteur d'exposition.

Le facteur de voisinage pour le mouvement d'air proche du sol est 1,3.
Le facteur d'exposition est 1,0.

La sécurité globale calculée en fonction des paramètres de l'arbre et du site étudié est de 4,8 en tronc plein.

La paroi résiduelle requise (coque fermée) pour une sécurité globale de 100% est de 3 centimètres (cavité critique : 93%) à 1 mètre.

Projet	Date	Arbre	N°	Arbotag	Site	Commune/Ville			
ABEILHAN_2020	20200921	Pin parasol	02	NaN	Place du Général de Gaulle	34290 Abeilhan			
Sécurité globale calculée	4,8		Carte du tronc critique : 93%		Epaisseur critique de la paroi résiduelle en coque fermée en cm : 3				
	Sécurité d'ancrage		<i>(fiche technique présentée dans les annexes)</i>						
	Mesure	Direction de la charge	Sécurité ancrage selon Incline	Position Incline	Sécurité ancrage selon Incline	Position Incline	Sécurité ancrage selon Incline	Position Incline	
1	S	Rouge	N	Rouge	N	Rouge	C	Rouge	T

SECURITE D'ANCRAGE Les valeurs obtenues sont inférieures aux valeurs limites définies par la méthode ; les probabilités de basculement sont élevées.



Date	Diagnostic	Pronostic	Préconisation (hors intervention)	Date préconisation
21-09-2020	0,2 Fortement altéré	Nulle	Eloigner les cibles ou remplacer	21-09-2020

Cet arbre présente un risque important de basculement, y compris dans le cadre de facteurs déclenchants faiblement violents. Son remplacement est très vivement recommandé.

Il est souhaitable de ne pas le remplacer par un sujet d'un genre/espèce identique. Des conseils en termes de plantation de sujet mieux adapté à cet environnement particulièrement contraignant peuvent être sollicités auprès du CAUE 34.

En vous remerciant pour votre confiance, je suis à votre disposition pour toute information complémentaire.

Fait à Noville les Bois, le mercredi 23 septembre 2020.

Paul Gourgue





Réserves :

Les arbres étant des organismes vivants, les recommandations sont données, au moment de l'observation, pour des situations dites « normales ». La responsabilité de l'expert ne sera pas engagée pour les accidents faisant suite à des événements climatiques exceptionnels et/ou des travaux, effectués sur ou à proximité des arbres, pouvant affecter leur fonctionnement physiologique ou leur résistance mécanique.

Annexes

Charge du vent, 1 page

Sécurité d'ancrage calculée selon test de traction, 1 page

Bibliographie - Sont, entre autres, consultés pour l'établissement de nos rapports :

- La forêt – Ed du Perron - Anne Bary-Lenger, René Evrard, Pierre Gathy*
Le fichier écologique des essences -<https://www.fichierologique.be>
Guide Delachaux des arbres d'Europe – Ed Delachaux et Niestlé – Owen Johnson, David More
Arbres de France et d'Europe occidentale – Arthaud – Alan Mitchell, John Wilkinson
Les arbres feuillus – Ministère de la région Wallonne – Jean-Claude Baudouin
Dynamique de dégradation des arbres par les champignons lignivores – Hainaut Développement, Cellule technique
Les plantations d'alignement – IDF – Corinne Bourgerie, Dominique Castaner
L'élagage, la taille des arbres d'ornement – IDF – Emmanuel Michau
La taille des arbres d'ornement – IDF – Christophe Drénou
Guide pratique de défense des cultures – ACTA
Des soins pour les très vieux arbres – Ulmer – R. Bourdu
Diagnostic visuel et statique des arbres – Georges Lesnino, Lothar Wessoly
Diagnostic de tenue mécanique, notion de dangerosité – Pierre Aversenq
A New Tree Biology and Dictionary – Shigo and trees Associates llc – Alex Shigo
Modern Arboriculture – Shigo and trees Associates llc – Alex Shigo
Tree Anatomy – Shigo and trees Associates llc – Alex Shigo
Field guide for VTA – C. Mattheck
Tree mechanics – C. Mattheck
The face of failure in nature and engineering – C. Mattheck
Fungal Strategies of Wood Decay in Trees – F.W.M.R. – Schwarze, Engels, Mattheck
Diagnosis and Prognosis of the Development of Wood Decay in Urban Trees – Schwarze
Diseases of trees and shrubs – Cornell University press – Sinclair, Lyon, Johnson
La logique verte, un plan de gestion des arbres d'alignement – AED Direction des voiries - MRBC
Charte de l'arbre du grand Lyon – Communauté urbaine de Lyon
Guide de gestion contractuelle de l'Arbre des Hauts de Seine – Conseil général des Hauts de Seine
L'arbre un être vivant, comprendre et accompagner le développement des arbres d'ornement – Weyrich – SPW, arboresco
Up by roots – Healthy soils and trees in the built environment – ISA 2008 – J. Urban
L'Architecture des arbres des régions tempérées – Ed. MultiMondes – Jeanne Millet
Mycological Tree Assessment – Geen bomen zonder zwammen – Ed Inverde – Gerrit Jan Keizer

Analyse de la charge du vent conforme à DIN 1055-4



N° Arbre 20200921_02
Arbotag NaN

Projet

Nom du projet ABEILHAN_2020
Numéro du projet

Date du test 21-09-20

Site

Place du Général de Gaulle

34290 Abeilhan, France

Altitude du site 95 m

Données de l'arbre

Essence Pin parasol
Circonférence du tronc 250 cm
Diamètre du tronc à 1 m de hauteur 75 cm
Épaisseur de l'écorce 3 cm
Hauteur de l'arbre 13 m

Propriétés du matériau choisis

selon Pinus pinea
Source Stuttgart
Résistance à la compression 18 MPa
Module d'élasticité 8500 MPa
Limite d'élasticité 0,21 %
Densité 0,8 g/cm³

Forme de l'arbre



Direction de la charge S

Analyse de la surface

Base du houppier 4 m
Hauteur effective 9,4 m
Surface totale 87 m²
Excentricité du houppier 0,2 m

Paramètres structuraux estimés

Coefficient de traînée 0,2
Fréquence propre 1,25 Hz
Décrément d'amortissement 0,2
Facteur forme du poids propre 0,8

Propriétés du site choisis

Région climatique F 3
Valeur de base de la vitesse de référence du vent 26 m/s
Densité de l'air 1,17 kg/m³
Catégorie de terrain cité
Exposant pour profil de vent 0,3
Facteur de voisinage pour le mouvement d'air proche du sol 1,3
Facteur d'exposition 1,00

Résultat

Analyse de la charge du vent
Pression moyenne du vent 4,7 kN
Facteur de réaction de la rafale 3,39
Centre de la charge 8,1 m
Moment de torsion 3 kNm

Analyse statique de l'arbre
Poids propre de l'arbre 3,4 t
Cavité du tronc critique 93 %
Épaisseur critique du mur résiduel avec une coque fermée 3 cm

Charge du vent 131 kNm Sécurité de base 4,8

Généralités

Remarques

Sécurité d'ancrage calculée selon test de traction



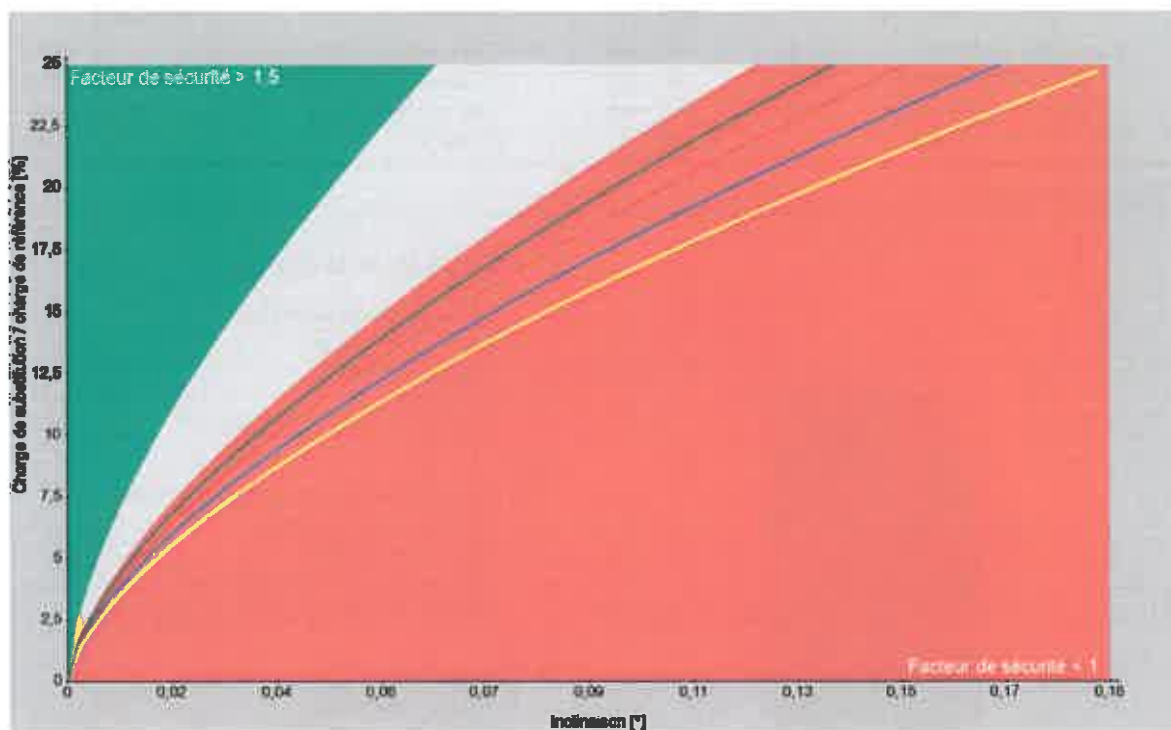
Données de l'arbre

Projet	ABEILHAN_2020	N° Arbre	20200921_02
Essence	Pin parasol	Date	21-09-20

Assemblage du test de traction

Hauteur du point d'ancrage	5,3 m	Mesure	1
Angle du câble	21,6 °	Direction de la charge	S

Représentation graphique (résultat de la mesure et courbe de basculement)



Mesure d'inclinomètre

	80	81	82	83
Position	N	N	C	T

Sécurité d'ancrage (transmise par la courbe de basculement)

Facteur de sécurité	0,82	0,76	0,88	0,93
---------------------	------	------	------	------

Généralités sur les tests de traction

Expert Paul Gourgue
Témoins / Assistant

Remarques sur les mesures