



Centre Scientifique et Technique
de la Construction

Calcul au vent de l'ancrage des structures des capteurs solaires

Nous attirons votre attention sur les droits d'auteur régissant cet ouvrage. Dans ce cadre, toute reproduction, rediffusion (sous quelle forme que ce soit) ou traduction, même partielle des textes et illustrations de ce document n'est autorisée qu'avec le consentement écrit du CSTC.

Centre Scientifique et Technique de la Construction
CSTC, établissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : Rue Lombard 42, 1000 Bruxelles

Composition du groupe de travail:

Michel Wagner, expert indépendant
Filip Van Rickstal, Paul Van den Bossche, CSTC
Jacques Dekeyser, SECO
Rapporteur: E Dupont, CSTC

Table des matières

1.	Objet.....	3
2.	Domaine d'application.....	3
3.	Symboles.....	3
4.	Type de pose.....	4
5.	Action du vent - formules générales et coefficients.....	5
5.1.	La pression aérodynamique w	5
5.2.	La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$	5
5.2.1.	Classes de sollicitation au vent.....	7
5.3.	Les zones d'action du vent en toiture inclinée	8
5.3.1.	Toiture à 2 versants	8
5.3.2.	Toiture à simple versant	9
5.3.1.	Détermination pratique de la largeur des zones.....	9
5.4.	Le coefficient de force globale $c_{f,pv}$	10
6.	Étude des états-limites.....	11
7.	Ancrages des générateurs dans les charpentes en bois.....	11
7.1.	Calcul de la résistance des ancrages à l'arrachement.....	11
7.2.	Règles technologiques.....	12
7.2.1.	Diamètre efficace d_{ef}	12
7.2.2.	Qualité du bois dans les zones d'assemblage.....	13
7.2.3.	Disposition des vis et tirefonds dans les assemblages.....	13
7.3.	Valeur de résistance des assemblages.....	13
7.3.1.	Ancrage sans effet de levier.....	13
7.3.2.	Ancrage avec effet de levier	14
8.	Résolution d'un cas pratique.....	20
Annexe 1 - Pression dynamique de pointe $q_p(z)$ (N/m ²) pour $v_{b,0}=26$ m/s		24
Annexe 2 - Bibliographie		26

1. Objet

Le présent document spécifie les pressions de vent applicables aux installations solaires en toiture inclinée, en l'absence d'essais effectués sur prototypes représentatif du système mis en œuvre. Lorsque les résultats d'essai existent, ils doivent être interprétés correctement en tenant compte des conditions de projet.

Il complète les aspects traités dans le Rapport Scientifique N° 11 du CSTC pour ce qui concerne le calcul au vent.

Il donne donc au concepteur de ces ouvrages les éléments nécessaires au dimensionnement à l'ancrage des panneaux solaires en toiture inclinée.

Avertissement :

Les calculs de stabilité en général requièrent des qualifications et des connaissances spécifiques. Le concepteur doit les posséder et s'assurer que les conditions de projet permettent de se référer au présent document. De plus, ce document est destiné à une utilisation normale, toutes actions, ou utilisations non conventionnelles des ouvrages doivent faire l'objet de spécifications complémentaires adaptées au risque que l'on veut couvrir.

Les différentes valeurs données dans le présent document le sont sur la base des documents les plus récents et des connaissances actuelles. Ceci n'exclut pas que pour certaines situations, des essais, des vérifications complémentaires soient nécessaires afin d'obtenir une appréciation plus précise.

2. Domaine d'application

Les installations solaires photovoltaïques ou thermiques posées en toitures inclinées

Les capteurs solaires sont posés parallèlement à la toiture, sans dépassement en façade, en égout, ou en rive.

3. Symboles

$F_d(w)$: valeur de calcul de l'action du vent [Pa]

w : valeur de pression nette du vent [Pa]

γ_Q : Coefficient partiel de charge

γ_{inf} : Coefficient partiel de charge relatif aux états d'équilibre

$c_{f,PV}$: le coefficient de force applicable au panneau solaire propre à chaque configuration de pose

$F_d(w)$ [N]: valeur de calcul résultante de l'action du vent,

b_F : bras de levier de $F_d(w)$,

R_s [N]: réaction à l'effort d'arrachement exercé sur le tirefond,

b_r : bras de levier du moment résistant,

L_1 : distance entre l'extrémité du crochet et la vis,

L_2 : distance entre l'extrémité du crochet et la vis soumise à traction (R_s),

k_r : le coefficient rigidité des crochets avec bras de levier,

k_l : le coefficient longueur des crochets avec bras de levier,

ρ_s : la masse volumique standard du bois en $[\text{kg}/\text{m}^3] = 320 \text{ kg}/\text{m}^3$

ρ_h : la masse volumique réelle du bois en $[\text{kg}/\text{m}^3]$

d_c : l'épaisseur du crochet en acier en $[\text{mm}]$

4. Type de pose

Dans le présent document, la paroi externe est considérée perméable à l'air si la surface des orifices par rapport à la surface totale est $< 0,1\%$.

Cinq types de toiture sont étudiés :

Type de pose n°1 :

Les capteurs constituent une paroi externe perméable à l'air. La paroi interne est imperméable à l'air. L'espace entre les 2 parois est $< 100 \text{ mm}$ avec ouvertures limitées à $200 \text{ cm}^2/\text{ml}$ à l'égout et au faitage.

Type de pose n°2 :

Les capteurs constituent une paroi externe imperméable. La paroi interne est également imperméable à l'air et la lame d'air comprise entre les 2 parois $< 100 \text{ mm}$ avec des ouvertures limitées à $200 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Type de pose n°3 :

Toiture avec simple paroi.

Type de pose n°4 :

Les capteurs constituent la paroi externe perméable à l'air ou pas. La paroi interne est imperméable et la lame d'air sous les capteurs est complètement ouverte en périphérie.

Type de pose n°5 :

Les capteurs constituent une paroi externe imperméable à l'air. La paroi interne est perméable à l'air, la lame d'air $< 100 \text{ mm}$ et les ouvertures limitées à $200 \text{ cm}^2/\text{ml}$.

5. Action du vent - formules générales et coefficients

Pour une information détaillée sur le calcul du vent, il est conseillé se référer au rapport scientifique n° 11 du CSTC ou à la NBN EN 1991-1-4.

Pour simplifier le calcul de l'action du vent, des classes de sollicitations sont proposées. Elles sont basées sur la théorie qui suit :

5.1. La pression aérodynamique w

La pression aérodynamique w agissant sur une surface est égale à

$$w = q_p(z_e) \times c_{f,PV} \dots\dots\dots \text{éq. 1}$$

avec

- $q_p(z_e)$ = la pression dynamique de pointe
- $c_{f,PV}$ = le coefficient de force

5.2. La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$

La pression dynamique $q_p(z_e)$ de pointe dépend

- **de la hauteur de référence du vent z_e** , qui est généralement égale à la hauteur du bâtiment. Cependant, il est parfois nécessaire d'augmenter ou de diminuer cette hauteur, pour plus de renseignement, voir le RS n°11 du CSTC, § 4.1.2.1
- **de la catégorie de rugosité du terrain** : 5 catégories de rugosité sont reprises dans la NBN EN 1991-1-4, à savoir :

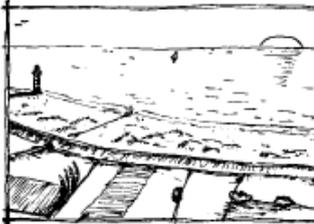
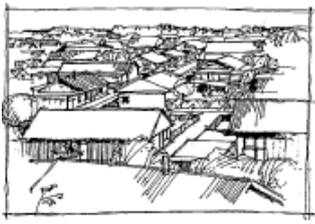
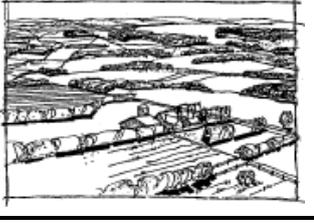
Catégories de rugosité de terrain		Exemples	Catégories de rugosité de terrain		Exemples
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer		III	Zones avec une couverture régulière ou des bâtiments, ou des obstacles isolé séparé d'au plus 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, forêts permanentes)	
					IV
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				

Tableau 1 – Catégorie de rugosité

- de la **vitesse de référence du vent** $v_{b,0}$ qui varie en Belgique de 23 m/s à 26 m/s,
- de la **période de retour du vent**, caractérisée par le coefficient C_{prob} , qui est égal à 1 pour une période de retours de 50 ans dans le cas des structures principales, les structures secondaires et leurs ancrages et 25 ans dans le cas des éléments de remplissage et de leurs fixations

Type d'éléments	Période de retour	C_{prob}
ancrages	50 ans	1
Capteur solaire	25 ans	0,9597

Tableau 2 – Période de retour

5.2.1. Classes de sollicitation au vent

Prenant en considération la théorie exposée ci-dessus, le tableau suivant propose des classes d'exposition au vent.

Hauteur de référence du vent z_e													
		Classe 0 d'exposition au vent				Classe 1 d'exposition au vent				Classe 2 d'exposition au vent			
Vitesse de référence	v_{b0} (m/s)	26	25	24	23	26	25	24	23	26	25	24	23
Catégories de rugosité		Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à				Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à				Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à			
Zone côtière	0												
Plaine	I												
Bocage	II							2m	3m	3m	3m	4m	6m
Banlieue - forêt	III			5m	6m	5m	6m	7m	9m	9m	12m	15m	19m
Ville	IV	10m	12m	14m	16m	15m	17m	21m	25m	25m	30m	30m	30m
Pres. dyna. de pointe	$q_p(z_e)=$	450 Pa				544 Pa				693 Pa			
Hauteur de référence du vent z_e													
		Classe 3 d'exposition au vent				Classe 4 d'exposition au vent				Classe 5 d'exposition au vent			
Vitesse de référence	v_{b0} (m/s)	26	25	24	23	26	25	24	23	26	25	24	23
Catégories de rugosité		Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à				Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à				Hauteurs (z_e) de référence jusqu'à			
Zone côtière	0					3m				5m			
Plaine	I	2m	2m	4m	5m	4m	5m	8m	11m	7m	10m	14m	22m
Bocage	II	5m	6m	8m	11m	8m	11m	15m	16m	14m	16m	16m	22m
Banlieue - forêt	III	15m	19m	21m	21m	21m	21m	21m	21m	21m	21m	21m	22m
Ville	IV	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m	30m
Pres. dyna. de pointe	$q_p(z_e)=$	815 Pa				950 Pa				1086 Pa			

Tableau 3 – Classes d'exposition au vent - Pression dynamique de pointe $q_p z_e$

Les classes d'exposition au vent regroupent les différentes combinaisons de vitesse de référence $v_{b,0}$, hauteur de référence z_e et catégories de rugosité pour lesquelles la pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$ est la même.

Par exemple, en classe 4, l'exposition au vent d'un projet situé en catégorie de rugosité I (Plaine) à une hauteur de référence $z_e = 5m$ pour une vitesse de référence 25 m/s est la même que pour un projet situé en catégorie de rugosité II (Bocage) à une hauteur de référence $z_e = 15m$ pour une vitesse de référence 24 m/s. Pour ces 2 situations de projet, la pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$ est de 950 Pa.

La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$ n'est pas la pression de calcul. Voir les équations 1 et 2

Il faut aussi noter que les hauteurs de référence ont été respectivement limitées à 30m en catégorie de rugosité IV, à 21m en catégorie de rugosité III, à 16m en catégorie de rugosité II. Cette précaution est justifiée par le fait que, plus le bâtiment est élevé et plus la catégorie de rugosité est haute, plus la probabilité est importante de devoir tenir compte de l'émergence du bâtiment par rapport à la rugosité immédiate. Ces limitations apparaissent en bleu dans le tableau ci-dessus. Pour des hauteurs de référence supérieures à ces limitations, une analyse de la rugosité de terrain relative au projet est nécessaire (voir les liens mentionnés sous le Tableau 1) et la procédure de détermination expliquée dans le RS 11 § 4.1.2.3

5.3. Les zones d'action du vent en toiture inclinée

La norme EN 1991-1-4 définit plusieurs zones de vent en toiture inclinée dépendant de la direction du vent. Seules sont considérées dans ce document les toitures à un et deux versants.

Sur base du raisonnement repris dans le rapport scientifique n°11 § 4.1.2.5, il est possible de déterminer différentes zones de vent, A, B, C, D, E dont les coefficients de pression donnés dans le présent document sont les plus défavorables, toutes directions de vent confondues. Du fait que ce document concerne principalement les ancrages des structures secondaires des capteurs solaires, seules sont pris en compte les $c_{p,1}$.

5.3.1. Toiture à 2 versants

Pour les toitures à deux versants, le zonage s'établit comme suit :

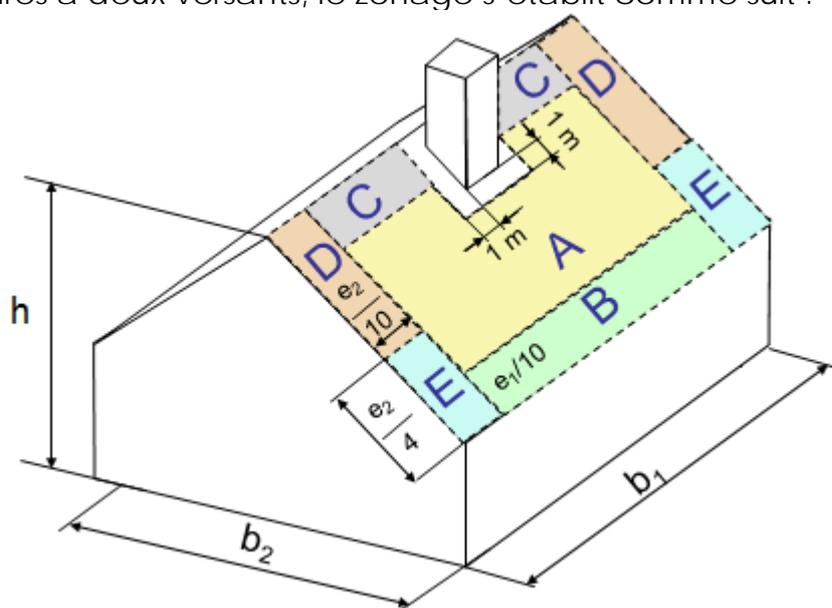


Figure 1 – Zonage des toitures à 2 versants

« e_i » est la valeur minimum entre b_i et $2xh$. Les valeurs d' $e_1/10$, d' $e_2/10$, $e_2/4$ sont données au Tableau 6 en fonction de la hauteur du bâtiment et de ses dimensions.

Pentes	Zones - $c_{p,e-}$				
	A	B	C	E	D
5°	-1,20	-2,00	-1,20	-2,50	-2,00
10°	-1,20	-1,75	-1,35	-2,25	-2,00
15°	-1,20	-1,50	-1,50	-2,00	-2,00
20°	-1,20	-1,50	-1,40	-1,83	-2,00
25°	-1,20	-1,50	-1,30	-1,67	-2,00
30°	-1,20	-1,50	-1,20	-1,50	-2,00
35°	-1,20	-1,40	-1,20	-1,50	-2,00
40°	-1,20	-1,30	-1,20	-1,50	-2,00
60°	-1,00	-1,00	-1,00	-1,50	-2,00
75°	-1,00	-1,00	-1,00	-1,50	-2,00

Pentes	Zones - $c_{p,e+}$				
	A	B	C	E	D
5°	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
10°	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
15°	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
20°	0,27	0,37	0,27	0,37	0,27
25°	0,33	0,53	0,33	0,53	0,33
30°	0,40	0,70	0,40	0,70	0,40
35°	0,47	0,70	0,47	0,70	0,47
40°	0,53	0,70	0,53	0,70	0,53
60°	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
75°	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Tableau 4 – Toiture à double pente – Coefficient de pression extérieure

5.3.2. Toiture à simple versant

Pour les toitures à un seul versant, le zonage s'établit comme suit :

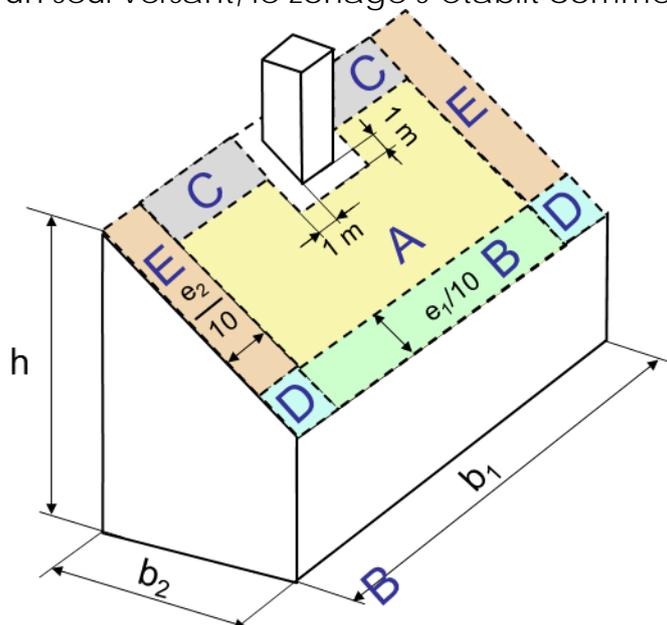


Figure 2 – Zonage des toitures à 1 versant

Les coefficients de pression extérieure sont repris au tableau suivant

Pentes	Zones - $C_{p,e-}$				
	A	B	C	E	D
10°	-1,20	-2,50	-2,50	-2,50	-2,60
15°	-1,20	-2,25	-2,65	-2,40	-2,75
20°	-1,20	-2,00	-2,80	-2,40	-2,90
25°	-1,23	-1,83	-2,63	-2,27	-2,90
30°	-1,27	-1,67	-2,47	-2,13	-2,90
35°	-1,30	-1,50	-2,30	-2,00	-2,90
40°	-1,30	-1,30	-1,97	-2,00	-2,73
45°	-1,30	-1,30	-1,63	-2,00	-2,57
60°	-1,30	-1,30	-1,30	-2,00	-2,00
75°	-1,30	-1,30	-1,30	-2,00	-2,00

Pentes	Zones - $C_{p,e+}$				
	A	B	C	E	D
10°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15°	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
20°	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
25°	0,27	0,37	0,27	0,37	0,27
30°	0,33	0,53	0,33	0,53	0,33
35°	0,40	0,70	0,40	0,70	0,40
40°	0,47	0,70	0,47	0,70	0,47
45°	0,53	0,70	0,53	0,70	0,53
60°	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
75°	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Tableau 5 – Toiture a un versant – Coefficients de pression extérieure

5.3.3. Détermination pratique de la largeur des zones

Que ce soit pour les toitures à simple ou à double pentes, « e_i » est la valeur minimum entre " b_i " et " $2xh$ "

Le tableau suivant donne les largeurs de zones de rives basses, de faite, et de rive pignon en mètre en fonction de b_i et de h .

Largeur "e ₁ /10" ou "e ₂ /10 "des zones de rives basses - faîtes - rives pignons							Longueur "e ₂ /4 "des zones de rives pignon basses					
b ₁ ou b ₂ [m]	Hauteur du faite - h _f						Hauteur du faite - h _f					
	3	6	9	12	15	20	3	6	9	12	15	20
5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,5	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	2	2	2	2	2
9	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,5	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
10	0,6	1	1	1	1	1	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
11	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
12	0,6	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,5	3	3	3	3	3
13	0,6	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	3	3,25	3,25	3,25	3,25
14	0,6	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	3	3,5	3,5	3,5	3,5
15	0,6	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	3	3,75	3,75	3,75	3,75
16	0,6	1,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	3	4	4	4	4
17	0,6	1,2	1,7	1,7	1,7	1,7	1,5	3	4,25	4,25	4,25	4,25
18	0,6	1,2	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	3	4,5	4,5	4,5	4,5
19	0,6	1,2	1,8	1,9	1,9	1,9	1,5	3	4,5	4,75	4,75	4,75
20	0,6	1,2	1,8	2	2	2	1,5	3	4,5	5	5	5
22	0,6	1,2	1,8	2,2	2,2	2,2	1,5	3	4,5	5,5	5,5	5,5
24	0,6	1,2	1,8	2,4	2,4	2,4	1,5	3	4,5	6	6	6
26	0,6	1,2	1,8	2,4	2,6	2,6	1,5	3	4,5	6	6,5	6,5
28	0,6	1,2	1,8	2,4	2,8	2,8	1,5	3	4,5	6	7	7
30	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3	1,5	3	4,5	6	7,5	7,5
32	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,2	1,5	3	4,5	6	7,5	8
34	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,4	1,5	3	4,5	6	7,5	8,5
36	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	1,5	3	4,5	6	7,5	9
38	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,8	1,5	3	4,5	6	7,5	9,5
40	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10
42	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10
44	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10
46	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10
48	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10
50	0,6	1,2	1,8	2,4	3	4	1,5	3	4,5	6	7,5	10

Tableau 6 – Zones de rive – largeur et longueur en fonction de h et de b_i

5.4. Le coefficient de force globale $c_{f,PV}$

Le coefficient de force $c_{f,PV}$ permet d'appréhender l'effet global du vent sur la structure secondaire et ses ancrages. Il représente l'effet simultané du vent sur les 2 faces du capteur solaire. Il est donc variable en fonction de l'exposition au vent des capteurs considérés, c'est-à-dire de la zone de la toiture dans laquelle ces derniers sont situés.

Les valeurs de $c_{f,PV}$ sont données en fonction du type de pose dans le tableau suivant :

Valeurs de $c_{f,PV}$ Type de toiture	Paroi extérieure		Paroi intérieure	
	$c_{f,PV}^-$	$c_{f,PV}^+$	$c_{f,PV}^-$	$c_{f,PV}^+$
Type 1	$\frac{2}{3} \times c_{pe}^-$	$\frac{2}{3} \times c_{pe}^+$	$c_{pe}^- - 0,2$	$c_{pe}^+ + 0,3$
Type 2	c_{pe}^-	c_{pe}^+	$c_{pe}^- - 0,2$	$c_{pe}^+ + 0,3$
Type 3	$c_{pe}^- - 0,2$	$c_{pe}^+ + 0,3$	-	-
Type 4	c_{pe}^-	$2 \times c_{pe}^+$	$c_{pe}^- - 0,2$	$c_{pe}^+ + 0,3$
Type 5	c_{pe}^-	c_{pe}^+	$-0,2$	$+0,3$

Tableau 7 – Coefficient de force en fonction du type de pose

6. Étude des états-limites

Du fait que l'objet de ce document est la conception des ancrages des générateurs, seul l'état limite ultime doit être étudié. Il est caractérisé par une charge de calcul de l'action du vent à laquelle aucune rupture ne peut se produire.

Sur base des hypothèses détaillées dans le rapport 11 du CSTC, la charge de calcul du vent s'exprime comme suit :

$$F_{d,U}(w) = \gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times q_p(z_e) \times c_{f,PV} \dots\dots\dots \text{éq. 2}$$

avec

- γ_Q : le coefficient partiel = 1,35 pour la liaison du générateur à la structure principale du bâtiment,
- γ_G : le coefficient partiel pour la liaison du générateur à la structure principale du bâtiment $\gamma_G = 1,20$ lorsque le poids propre a un effet défavorable et $\gamma_G = 1,0$ lorsque le poids propre a un effet favorable,
- $q_p(z_e)$: la pression dynamique de pointe, voir Tableau 3.
- $c_{f,PV}$: le coefficient de force voir Tableau 4 et Tableau 5
- G_k : le poids propre de la structure

7. Ancrages des générateurs dans les charpentes en bois

Le cas le plus courant est l'ancrage des générateurs dans des charpentes en bois.

7.1. Calcul de la résistance des ancrages à l'arrachement

La NBN EN 1995 permet de calculer la résistance à l'arrachement des assemblages par vis et tirefonds. Elle s'exprime comme suit

$$F_{ax\alpha,Rk} = n_{ef} \times (\pi \times d \times l_{ef})^{0,8} \times f_{ax,\alpha,k} \dots\dots\dots \text{éq. 3}$$

- $F_{ax,\alpha,Rk}$: valeur caractéristique de la capacité résistante à l'arrachement de l'assemblage à un angle α vis-à-vis du fil du bois [N] ;
- n_{ef} : le nombre efficace de tirefonds,

$$n_{ef} = n^{0,9}$$

où

n est le nombre de tirefonds agissant simultanément dans un assemblage.

- d : diamètre extérieur mesuré sur la partie filetée,
- l_{ef} : longueur de pénétration du côté de la pointe de la partie filetée « l_{pf} » diminuée d'un diamètre de tire-fond, ($l_{ef} = l - d$)
- $f_{ax,\alpha,k}$: résistance caractéristique à l'arrachement à un angle α vis-à-vis du fil.

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2\alpha + 1,5 \times \cos^2\alpha} \dots\dots\dots \text{éq. 4}$$

¹ Source : NBN EN 1995 équation (8.38)

avec

$$f_{ax,k} = 3,6 \times 10^{-3} \times \rho_k^{1,5} \dots\dots\dots \text{éq. 5}$$

où

- o $f_{ax,\alpha,k}$: la valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement à un angle α vis-à-vis du fil,
- o $f_{ax,k}$: la valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement perpendiculairement au fil,
- o ρ_k : est la masse volumique caractéristique du bois, en kg/m³.

Le tableau suivant donne la masse volumique caractéristique du bois en fonction de la classe de résistance

Masse volumique			
Classe de bois	ρ_k	Classe de bois	ρ_k
C14	290	C40	420
C16	310	C45	440
C18	329	C50	460
C20	330	D30	530
C22	340	D35	560
C24	350	D40	590
C27	370	D50	650
C30	380	D60	700
C35	400	D70	900

Tableau 8 – Masse volumique et classe de bois

La résistance utile de calcul à l'arrachement des ancrages est donnée par la relation suivante :

$$F_{ax,\alpha,d} = \frac{F_{ax,\alpha,Rk}}{\gamma_M \times \gamma_c} \dots\dots\dots \text{éq. 6}$$

Avec

- $F_{ax,\alpha,d}$: valeur de calcul de la capacité de résistance à l'arrachement de l'assemblage à un angle α vis-à-vis du fil du bois,
- γ_M : le coefficient partiel (de sécurité) relatif à l'ancrage(1,3),
- γ_c : le coefficient partiel (de sécurité) relatif à la mise en œuvre (1,5).

7.2. Règles technologiques

7.2.1. Diamètre efficace d_{ef}

Pour les tirefonds comportant une partie lisse, lorsque le diamètre de la partie filetée est égal à celui de la partie lisse,

- le diamètre efficace d_{ef} est pris égal au diamètre de la partie lisse,
- la partie lisse pénètre l'élément contenant la pointe d'au moins $4d$.

Lorsque les conditions ci-dessus ne sont pas satisfaites, il convient de calculer la capacité de résistance à l'arrachement du tire-fond en utilisant un diamètre efficace égal à 1,1 fois le diamètre intérieur de la partie filetée. Pour les tirefonds mis en œuvre dans les résineux avec un diamètre de la partie lisse $d \leq 6\text{mm}$, les préforages ne sont pas exigés. Pour tous les tirefonds mis en œuvre dans les bois feuillus et pour les tirefonds dans les bois résineux dont le diamètre $d > 6\text{ mm}$, un préforage est exigé, conformément à ce qui suit :

- il convient que le trou de guidage pour la partie lisse ait le même diamètre que la partie lisse du tire-fond et la même longueur que la longueur de la partie lisse,
- il convient que le trou de guidage pour la partie filetée ait un diamètre approximativement égal à 70% du diamètre de la partie lisse.

Il convient en outre que la longueur de pénétration minimale « p » du côté de la pointe de la partie filetée soit $6d$.

Les trous prévus dans les pattes d'ancrage les crochets ou les plaques métalliques doivent avoir un diamètre qui ne soit pas supérieur de plus de 2 mm ou $0,1d$ (en considérant la valeur maximale) vis-à-vis de celui de la vis.

7.2.2. Qualité du bois dans les zones d'assemblage

Les flaches, fentes, nœuds et autres défauts doivent être limités dans la zone de l'assemblage de telle sorte que la capacité résistante de l'assemblage ne soit pas réduite.

Il est nécessaire que les éléments assemblés soient ajustés correctement et proprement, serrés sans jeu et avec un contact franc entre les pièces assemblées afin de s'assurer que la capacité de résistance et la rigidité de l'assemblage soient maintenues.

7.2.3. Disposition des vis et tirefonds dans les assemblages

L'entraxe entre vis et la distances minimum entre la vis et la rive ou l'about soient de 4 fois le diamètre de la vis.

7.3. Valeur de résistance des assemblages

7.3.1. Ancrage sans effet de levier

Les ancrages sans effet de levier sont caractérisés par une mise en charge purement axiale des vis ou des tirefonds.

Un exemple est donné dans la figure suivante

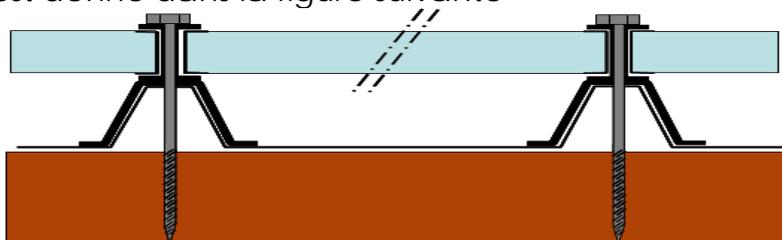


Figure 3 – Exemple d'ancrage sans effet de levier

Pour un bois de classe C18, un angle de vissage perpendiculaire ($\alpha = 90^\circ$) par rapport au fil du bois, une pénétration minimum du filetage de $0,6 \times L$, les valeurs de résistance de calcul de l'arrachement sont données dans le tableau suivant compte tenu des hypothèses formulées précédemment:

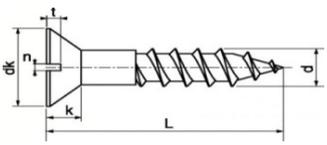
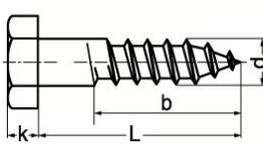
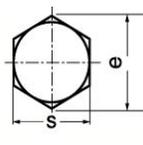
Résistance de calcul utile à l'arrachement $F_{ax,90,d}$ [N]								
Classe de bois C18		$\gamma_M : 1,3$		$\gamma_c : 1,5$		$\alpha = 90^\circ$		
								
d_{ef}	d x L	L	pénétration du filetage $l_{pf} = 0,6 \times L$	ancrage à n tirefond(s)				
				n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
3,5	3,5x30	30	18	1189 N	1712 N	2218 N	2711 N	3195 N
4	4x30	30	18	1286 N	1852 N	2400 N	2934 N	3457 N
4	4X40	40	24	1711 N	2464 N	3192 N	3902 N	4598 N
4	4X50	50	30	2110 N	3040N	3938 N	4814 N	5672 N
5	5X50	50	30	2445 N	3521 N	4562 N	5577 N	6571 N
5	5X60	60	36	2904 N	4183 N	5419 N	6624 N	7805 N
5	5X70	70	42	3345 N	4819 N	6243 N	7631 N	8992 N
6	6X60	60	36	3273 N	4714 N	6107 N	7466 N	8797 N
6	6X70	70	42	3787 N	5454 N	7066 N	8638 N	10178 N
6	6X80	80	48	4284 N	6170 N	7994 N	9772 N	11514 N
6	6X90	90	54	4767 N	6866 N	8895 N	10874 N	12812 N
6	6X100	100	60	5238 N	7544 N	9774 N	11948 N	14078 N
6	6X110	110	66	5698 N	8208 N	10634 N	12999 N	15317 N
6	6X120	120	72	6150 N	8858 N	11476 N	14029 N	16530 N
6	6X130	130	78	6593 N	9497 N	12303 N	15040 N	17722 N
8	8X70	70	42	4554 N	6559 N	8498 N	10387 N	12240 N
8	8X80	80	48	5186 N	7470 N	9677 N	11830 N	13939 N
8	8X90	90	54	5799 N	8354 N	10822 N	13229 N	15588 N
8	8X100	100	60	6397 N	9214 N	11937 N	14593 N	17195 N
8	8X110	110	66	6981 N	10056 N	13027 N	15925 N	18764 N
8	8X120	120	72	7553 N	10879 N	14095 N	17229 N	20302 N

Tableau 9 – Valeur de calcul de la capacité de résistance à l'arrachement de l'assemblage à un angle $\alpha = 90^\circ$ vis-à-vis du fil du bois

7.3.2. Ancrage avec effet de levier

Les ancrages subissant un effet de levier sont caractérisés par une mise en charge déportée de la vis ou du tirefond.

Un exemple est représenté dans la figure suivante

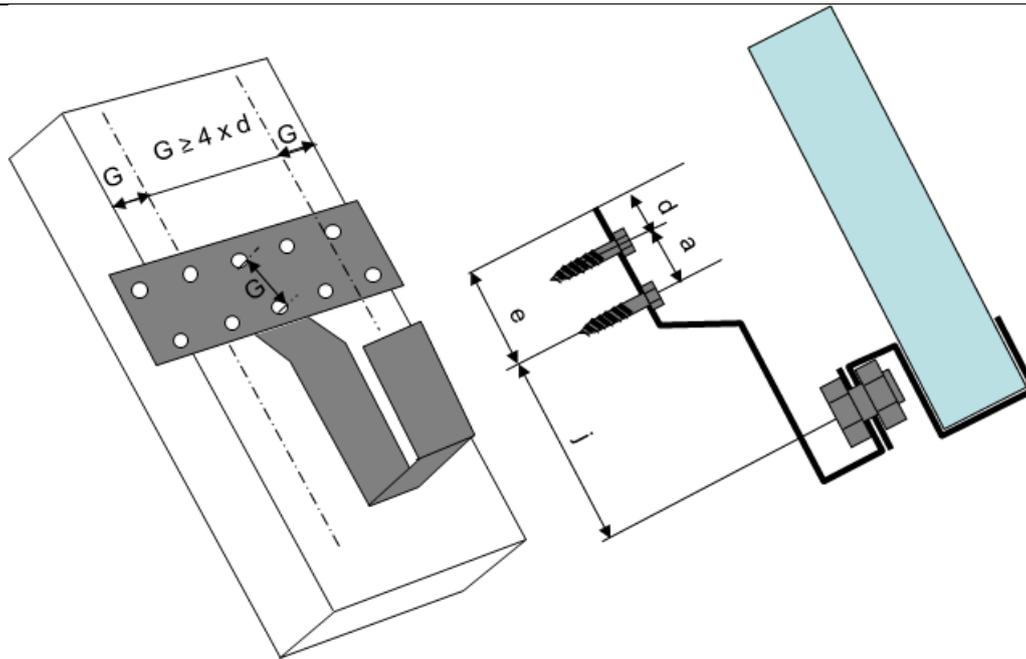
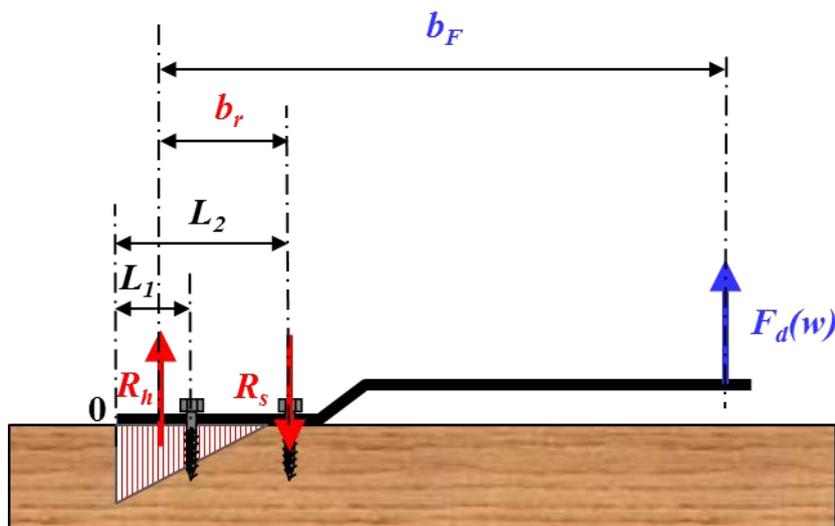


Figure 4 - Exemple d'ancrage avec effet de levier

La modélisation et donc la résistance finale de l'ancrage dépend de la rigidité des éléments en présence. Les efforts dus au vent exercés par le rail de fixation sur les crochets sont déterminés ci-après. Il faut encore y ajouter ceux résultant du poids propre. Dans la suite, nous considérons uniquement les efforts qui agissent perpendiculairement au crochet. La figure suivante montre les bras de levier agissant sur l'arrachement des vis, du rail et la résultante de la pression de contact entre le bois et le crochet. (L'échelle des efforts sur la figure n'est pas représentative de la réalité)



- $F_d(w)$ [N]: valeur de calcul résultante de l'action du vent,
- b_F : bras de levier de $F_d(w)$,

- R_s [N]: réaction à l'effort d'arrachement exercé sur le tirefond,
- b_r : bras de levier du moment résistant,
- L_1 : distance entre l'extrémité du crochet « 0 » et la vis,
- L_2 : distance entre l'extrémité du crochet « 0 » et la vis soumise à traction (R_s),

Figure 5 – Modélisation de l'ancrage avec effet de levier

Une modélisation par éléments finis a permis de déterminer comment les efforts de pression se répartissent entre le crochet et le bois. Il s'avère que cela dépend du rapport $E.I$ du crochet et $E'b'$ du bois.

- E = Module d'élasticité de l'acier,
- I = Moment d'inertie de la section du crochet,
- E' = Module d'élasticité du bois dans la direction perpendiculaire aux fibres,
- b' = largeur du crochet

Soit le rapport de rigidité

$$S = \frac{E \times I}{E' \times b' \times L_2}$$

Pour un rapport de rigidité « S » élevé, la répartition de pression entre le bois et le crochet est parfaitement triangulaire comme représenté à la Figure 5. Lorsque « S » diminue, la répartition de pression change, on observe un sommet puis une diminution telle qu'indiquée qualitativement à la figure suivante, ce qui a des conséquences sur les bras de levier des différentes forces.

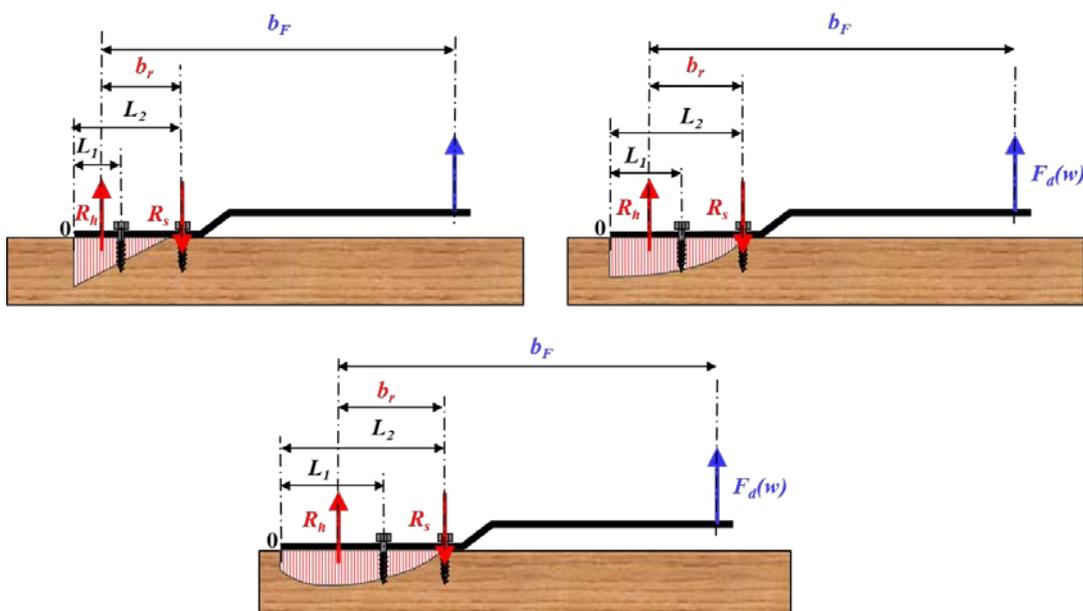


Figure 6 – Répartition qualitative de la pression en fonction de « S »

On doit donc tenir compte du fait que le centre de rotation se rapproche de la vis soumise à traction (R_s) lorsque « L_2 » augmente ou lorsque ' $E.I$ ' est relativement faible.

Le bras de levier du moment résistant « b_r » est donc la distance entre le centre de gravité de la surface comprimée du bois et la vis soumise à traction. (Lorsque c'est un triangle, il est égal à 2/3 de la distance entre la première vis (R_s) et l'extrémité du crochet 0).

Une règle empirique permettant de déterminer le bras de levier est donnée par la relation:

$$b_r = L_2 \times k_r \times k_l$$

Avec

$$k_r = \frac{2}{3} \text{ si } L_2 < 10 \times d_c \times (\rho_h / \rho_s) \text{ et}$$

$$k_r = \frac{5}{3} - 0,7 \left(\frac{L_2}{10 \times d_c \times \frac{\rho_h}{\rho_s}} - 1 \right), k_r \leq 1 \text{ dans les autres cas}$$

Et

$$k_l = 1 \text{ si } L_2 < 10 \times d_c \times (\rho_h / \rho_s) \text{ et}$$

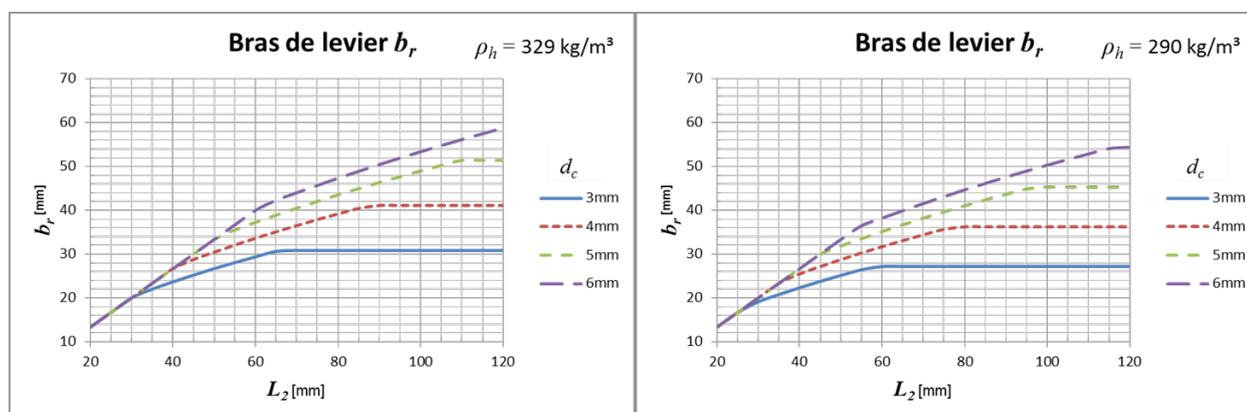
$$k_l = \frac{10 \times d_c \times \rho_h}{L_2 \times \rho_s} \text{ dans les autres cas}$$

Avec

- k_r : le coefficient rigidité,
- k_l : le coefficient longueur,
- ρ_s : la masse volumique standard du bois en [kg/m³] = 320 kg/m³
- ρ_h : la masse volumique réelle du bois en [kg/m³]
- d_c : l'épaisseur du crochet en acier en [mm]

Les tableaux suivants donnent les bras de levier b_r en fonction de L_2 et de la densité ρ_h du bois

L_2 [mm]	Bras de levier b_r [mm] - $\rho_h = 329\text{kg/m}^3$ (classe C18)				Bras de levier b_r [mm] - $\rho_h = 290\text{kg/m}^3$ (classe C14)			
	d_c				d_c			
	3mm	4mm	5mm	6mm	3mm	4mm	5mm	6mm
20	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33
25	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
30	20,00	20,00	20,00	20,00	19,11	20,00	20,00	20,00
35	22,01	23,33	23,33	23,33	20,77	23,33	23,33	23,33
40	23,66	26,67	26,67	26,67	22,33	25,48	26,67	26,67
45	25,22	28,78	30,00	30,00	23,79	27,16	30,00	30,00
50	26,69	30,46	33,33	33,33	25,16	28,75	31,85	33,33
55	28,08	32,08	35,54	36,67	26,44	30,27	33,54	36,47
60	29,39	33,63	37,25	40,00	27,19	31,72	35,16	38,22
65	30,63	35,11	38,90	42,30	27,19	33,10	36,71	39,91
70	30,84	36,53	40,49	44,02	27,19	34,41	38,21	41,55
75	30,84	37,89	42,03	45,70	27,19	35,66	39,65	43,13
80	30,84	39,19	43,52	47,32	27,19	36,25	41,04	44,66
85	30,84	40,43	44,96	48,90	27,19	36,25	42,37	46,15
90	30,84	41,13	46,35	50,44	27,19	36,25	43,65	47,58
95	30,84	41,13	47,69	51,93	27,19	36,25	44,88	48,97
100	30,84	41,13	48,98	53,38	27,19	36,25	45,31	50,31
105	30,84	41,13	50,23	54,79	27,19	36,25	45,31	51,61
110	30,84	41,13	51,41	56,16	27,19	36,25	45,31	52,87
115	30,84	41,13	51,41	57,49	27,19	36,25	45,31	54,09
120	30,84	41,13	51,41	58,78	27,19	36,25	45,31	54,38

Tableau 10 – Bras de levier b_r

Figure 7 – Bras de levier b_r

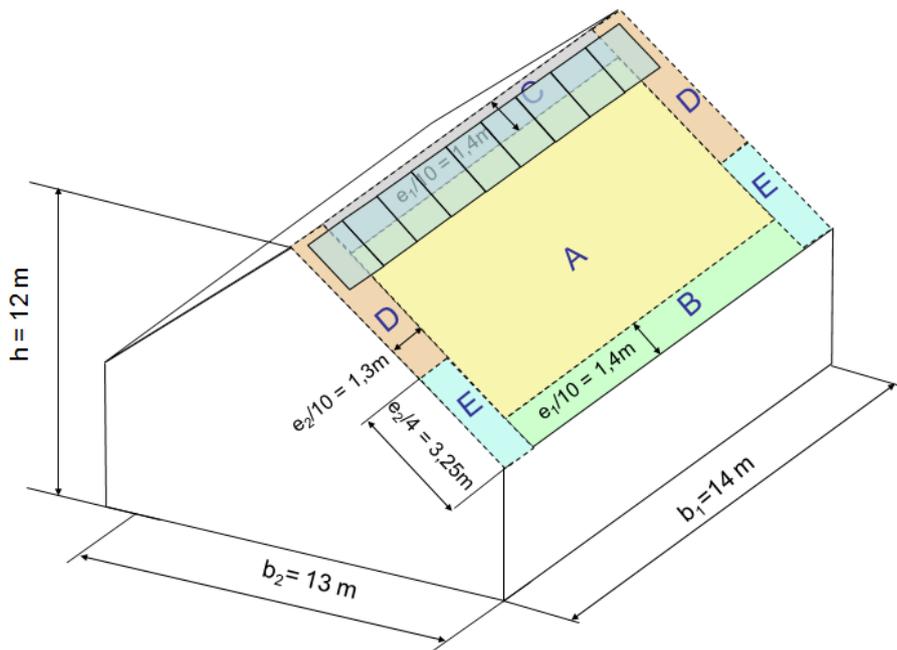
L'effort de traction (arrachement) exercé sur le tirefond s'obtient par l'équation suivante

$$b_F \times F_d(w) = R_s \times b_r$$

8. Résolution d'un cas pratique

Soit un générateur de 9 panneaux (1,7 x 1,4)m² en ligne en pose rapportée au-dessus de la couverture d'un bâtiment dont les dimensions sont b₁= 13m, b₂= 14m, h=12m. La toiture comporte 2 versants, la pente est de 40°. La catégorie de rugosité du vent est III (voir Tableau 1)

Le poids propre de l'installation est de 18kg/m². Le générateur est disposé sur la toiture comme à la figure suivante. La vitesse dynamique de base est de $v_{b,0}=26$ m/s



La géométrie des zones de toiture est déterminée à l'aide du Tableau 6 :

- Largeur des zones B et C : $b_1 = 14 \text{ m} - h = 12 \text{ m}$, $e_1/10=1,4\text{m}$,
- Largeur des zones D et E : $b_2 = 13 \text{ m} - h = 12 \text{ m}$, $e_2/10=1,3\text{m}$,
- Longueur de la zones E : $b_2 = 13 \text{ m} - h = 12 \text{ m}$, $e_2/4 = 3,25\text{m}$.

Calcul du vent

$$w = q_p(z_e) \times c_{f,PV}$$

La hauteur de référence z_e pour le vent : $z_e = h = 12\text{m}$, Tableau 3 indique qu'il s'agit classe d'exposition au vent $q_p(z_e) = 815 \text{ Pa}$

Il s'agit d'une pose rapportée : c'est un type de pose 4 suivant le § 4. Le

Tableau 7 indique que $c_{f,PV} = c_{pe}^-$

Les panneaux d'extrémité de la rangée sont situés dans la zone D, le Tableau 4 donne $c_{pe}^- = -2$ et donc $w = -2 \times 815 = -1630 \text{ Pa}$

Les panneaux du milieu de la rangée sont situés dans la zone C, le Tableau 4 donne $c_{pe}^- = -1,2$ et donc $w = -1,2 \times 815 = -978 \text{ Pa}$

Résultante des efforts appliqués sur l'ancrage.

La figure donne un exemple de disposition des capteurs solaires sur 2 rails. On distingue les ancrages a, b, et c en fonction de leurs différents chargements.

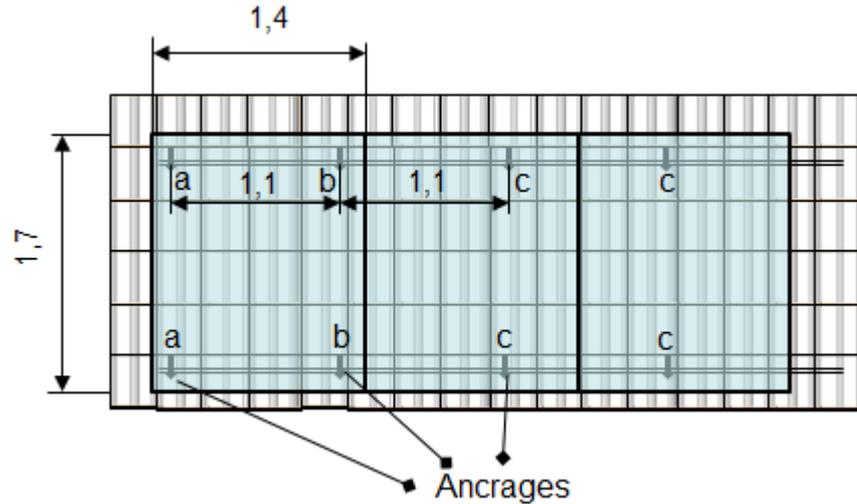


Figure 8 – Disposition des capteurs sur 2 rails et positionnement de leurs ancrages

En tenant compte de l'effet favorable du poids propre de l'installation, l'équation 2 §6 ($F_{d,U}(w) = \gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times q_p(z_e) \times c_{f,PV}$) donne

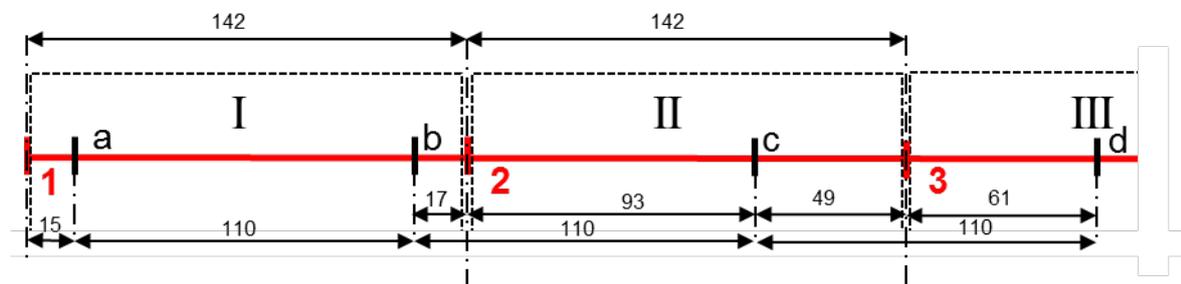
- pour la zone D : $F_{d,U}(w) = 1 \times 180 \times \cos(40^\circ) - 1,35 \times 1630 = -2062,1 \text{ Pa}$;
- pour la zone C : $F_{d,U}(w) = 1 \times 180 \times \cos(40^\circ) - 1,35 \times 978 = -1182,4 \text{ Pa}$;

Répartition des charges par panneau

La manière la plus simple de répartir les efforts sur les crochets consiste à partager la charge du panneau entre les rails et par crochet. Le calcul se limite aux 2 premiers panneaux :

Transfert de la sollicitation du rail vers les crochets

Le schéma de charge est le suivant :



Dans lequel

- les crochets du rail sur la charpente sont repérés par les lettres a, b, c, d,
- la fixation des panneaux sur les rails sont repérés les chiffres en rouge 1, 2, 3,
- les panneaux sont repérés par les chiffres romains I, II, III

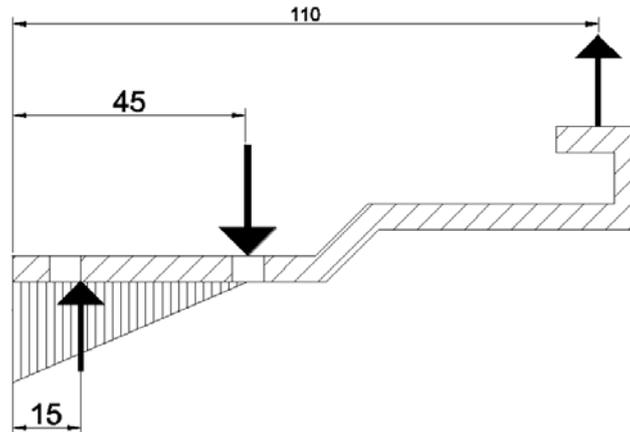
Etude du crochet a

La force transmise par le panneau I sur le rail au point 1 comprend $\frac{1}{4}$ de la pression totale, celui-ci étant en zone D, on obtient

$$F_{d1}(w, G_k) = \frac{1,7 \times 1,4 \times 2062,1}{4} = 1227 \text{ N}$$

Vu la proximité du point 1 et du crochet a, celui-ci reprend l'entièreté des 1227N.

Si on considère un crochet d'épaisseur $d_c=5$ mm dont la géométrie est donnée à la figure suivante



Alors $L_2 = 45$ mm et $b_F = 110 - 15 = 95$ mm et donc (Tableau 10) $b_r = 30$ mm
 La force d'arrachement $R_{s,a}$ exercée sur le crochet a est donc égale à

$$R_{s,a} = \frac{F_{d,1}(w) \times b_F}{b_r} = \frac{1227 \times 95}{30} = 3885 \text{ N}$$

Tableau 9 nous permet de déterminer que la force $R_{s,a}$ peut être reprise par une rangée de 2 vis de $\Phi 6 \times 80$ mm ou 3 vis de $\Phi 5 \times 60$ mm ou 4 vis de $\Phi 4 \times 50$ mm, ou 5 vis de $\Phi 4 \times 40$ mm.

Etude du crochet b

En considérant le panneau I en zone D et le panneau II en zone C, la force transmise par les panneaux I et II sur le rail au point 2 est égale à

$$F_{d2}(w, G_k) = \frac{1,7 \times 1,4 \times 2062,1}{4} + \frac{1,7 \times 1,4 \times 1182,4}{4} = 1930 \text{ N}$$

Cette charge appliquée au point 2 est reprise par le crochet b à raison de $1930 \times 93 / 110 =$ soit 1632 N

La force d'arrachement $R_{s,b}$ exercée sur le crochet **b** est donc égale à

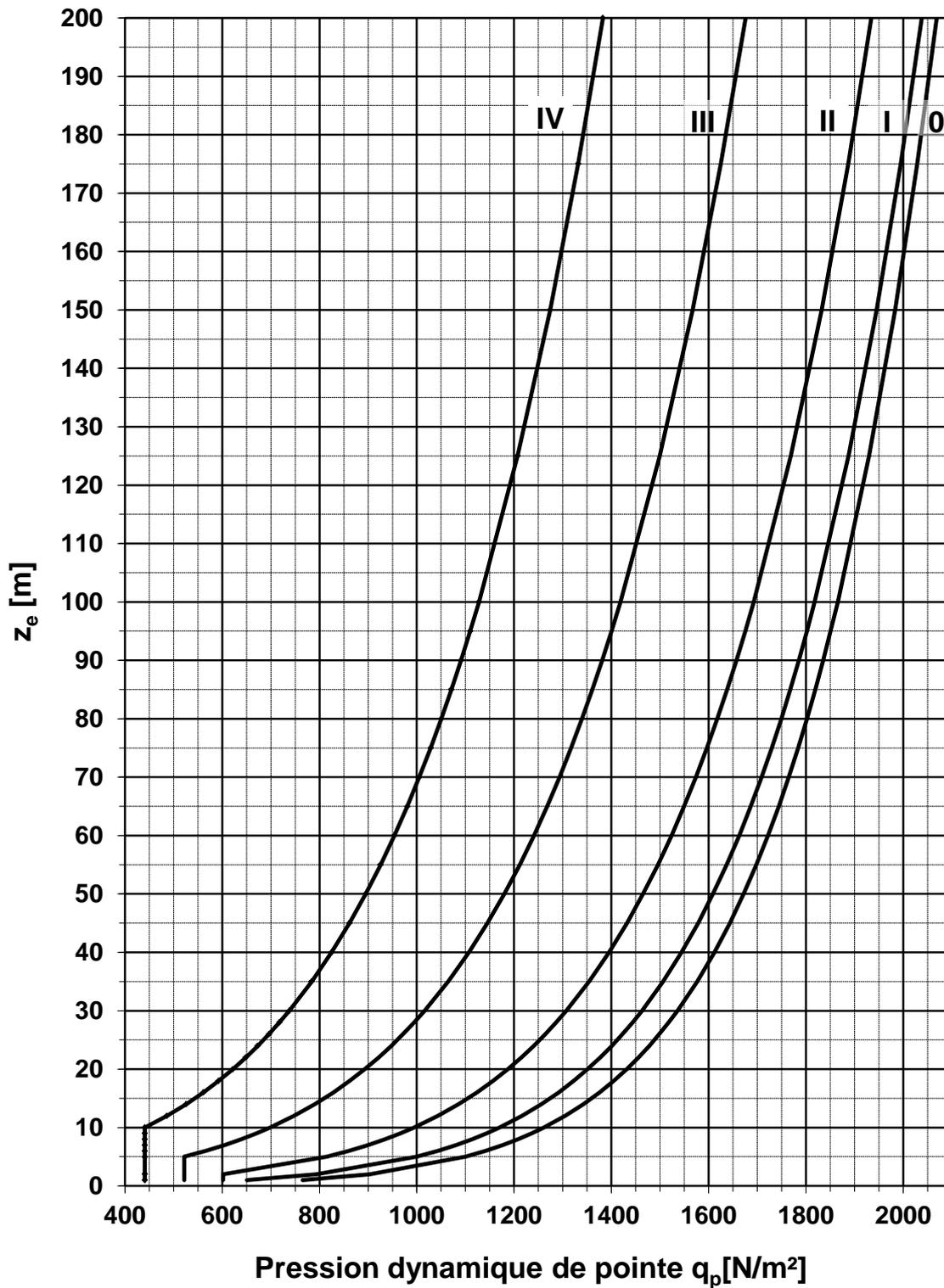
$$R_{s,b} = \frac{F_{d,2}(w) \times b_F}{b_r} = \frac{1632 \times 95}{30} = 5198 \text{ N}$$

Tableau 9 nous permet de déterminer que la force $R_{s,b}$ peut être reprise par une rangée de 2 vis de $\Phi 6 \times 100 \text{ mm}$ ou 3 vis de $\Phi 6 \times 70 \text{ mm}$ ou 4 vis de $\Phi 5 \times 60 \text{ mm}$ ou 5 vis de $\Phi 5 \times 50 \text{ mm}$ ou 6 vis de $\Phi 4 \times 50 \text{ mm}$.

Annexe 1 - Pression dynamique de pointe $q_p(z)$ (N/m²) pour $v_{b,0}=26$ m/s

Dans le tableau suivant « z_e » est en général égal à la hauteur du bâtiment, mais ce n'est pas toujours le cas, pour plus de précision, voir le rapport scientifique 11 du CSTC, § 4.1.2.1. Pour la détermination des catégories de rugosité, il ne s'agit pas de prendre la catégorie de rugosité où le bâtiment est implanté mais bien celle caractérisant le terrain parcouru par le vent sur une certaine distance avant d'arriver sur le dispositif à calculer. Cette distance est appelée « rayon du secteur angulaire » et est dépendante de z_e . Vu l'importance du choix de la catégorie de rugosité, il est vivement conseillé de lire le § 4.1.2.3 du RS 11 pour faire un choix judicieux.

Pression dynamique de pointe $q_p(z)$ (N/m ²) - $C_{prob}^2=1$					
hauteur z_e (m)	Catégories de terrain				
	0	I	II	III	IV
50	1672	1609	1465	1180	895
45	1644	1578	1432	1145	862
40	1612	1544	1395	1107	825
35	1576	1506	1354	1064	784
30	1536	1463	1307	1016	738
28	1518	1444	1286	995	718
26	1499	1423	1264	972	696
24	1478	1401	1240	948	673
22	1456	1377	1215	921	648
20	1431	1351	1187	893	622
18	1405	1323	1157	862	593
16	1376	1291	1123	828	561
14	1343	1256	1086	790	526
12	1305	1216	1043	748	486
10	1261	1170	994	698	441
9	1236	1143	966	670	441
8	1208	1114	935	639	441
7	1177	1081	900	605	441
6	1142	1043	861	566	441
5	1100	1000	815	522	441
2	903	793	601	522	441
1	765	651	601	522	441

Pression q_p avec $v_{b,0} = 26 \text{ m/s}$ et $c_{\text{prob}^2} = 1$ (50 ans)


Annexe 2 - Bibliographie

NBN EN 1991-1-4 - Action sur les structures – Partie 1-4 : Actions – Action du vent

CSTC-Rapport n° 11 – Application des Eurocodes à la conception des menuiseries extérieures

prNF P78 116 Panneaux Photovoltaïques – Conception Dimensionnement