



Les deux «recommandations de protection des objets» contre les dangers naturels météorologiques et gravitationnels ont été revues en 2015/2016 pour refléter l'état actuel de la technique.

Elles sont consultables sur la plateforme protection-dangers-naturels. Vous pouvez télécharger les recommandations souhaitées et les informations générales en utilisant la fonction d'impression. Le présent PDF correspond à la recommandation de 2007.

www.protection-dangers-naturels.ch



1

2

3

4

5

6

7

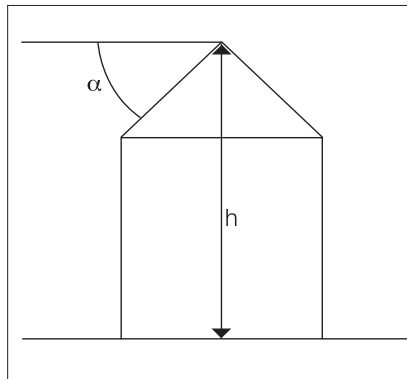
1 Notations

2

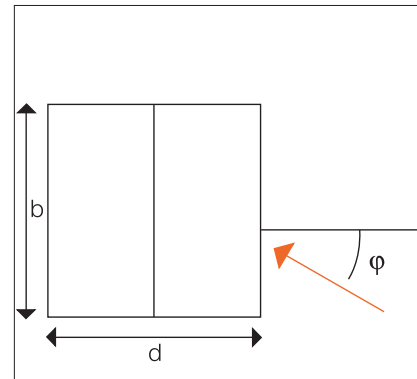
3

4

q_p [kN/m²]: Pression dynamique
 q_{ek} [kN/m²]: Valeur caractéristique de la pression du vent sur une surface extérieure (selon SIA 261)
 q_{ik} [kN/m²]: Valeur caractéristique de la pression du vent sur une surface intérieure (selon SIA 261)
 q_{p0} [kN/m²]: Valeur de référence de la pression dynamique (selon SIA 261)
 v_w [m/s]: Vitesse du vent
 v_t [m/s]: Vitesse du débris
 ρ_l [t/m³]: Densité de l'air
 b [m]: Largeur du bâtiment (selon SIA 261)



d [m]: Longueur du bâtiment (selon SIA 261)
 h [m]: Hauteur du bâtiment (selon SIA 261)
 α [°]: Inclinaison du toit
 φ [°]: Direction du vent dans le plan horizontal
 m [t]: Masse d'un objet percutant le bâtiment
 h_b [m]: Hauteur de chute de l'arbre
 E_{cin} [J]: Énergie cinétique à l'impact d'un débris
 g [m/s²]: Accélération gravitationnelle (10 m/s²)



Caractérisation

5

6

7

Tempêtes hivernales

Les tempêtes hivernales surviennent à la transition entre les zones climatiques subtropicale et polaire, à une latitude de l'ordre de 35 à 70 degrés. Des vagues d'air polaire y rencontrent des masses d'air chaud subtropicales, ce qui provoque la formation de tourbillons dépressionnaires de grande étendue. L'intensité des zones de tempête, proportionnelle à la différence de température entre les deux masses d'air, est donc la plus élevée à la fin de l'automne et en hiver, lorsque les mers sont encore chaudes alors que les masses d'air polaire sont déjà très froides. Les rafales atteignent des pointes de 39 à 56 m/s (140-200 km/h). Dans les cas extrêmes, elles dépassent même 70 m/s (250 km/h) dans les Alpes. Comme les zones de tempête (zones dépressionnaires) peuvent avoir un diamètre de 1000 à 1500 km, ce phénomène est celui qui cause les dommages les plus onéreux par événement en Suisse.

Tempêtes orageuses

La plupart des tempêtes affectant la Suisse revêtent la forme de vents régionaux de forte intensité dus à des tempêtes orageuses. L'occurrence de ces tempêtes nécessite la formation de grands nuages convectifs produits par l'ascension d'air chaud et humide. Ce phénomène est imputable à une instabilité thermique, la présence de montagnes ou l'arrivée d'un front.

On distingue les orages unicellulaires, multicellulaires et supercellulaires. Leur durée et leur violence augmentent de la cellule unique à la supercellule. Le type, l'intensité et la durée des orages dépendent principalement de la valeur et du rapport de deux paramètres: 1. La stratification thermique de l'atmosphère (stable / instable), qui détermine l'énergie ascensionnelle de l'air des nuages. 2. Le renforcement et la rotation du vent en direction verticale (cisaillement), qui déterminent l'énergie cinétique de l'air des nuages. Le rapport

entre ces deux énergies définit le type d'orage.

Les orages unicellulaires se produisent lorsque l'énergie ascensionnelle est forte (stratification instable) et le cisaillement faible. Ils forment les orages de chaleur typiques de l'été, d'une durée d'une demi-heure à une heure.

Les orages multicellulaires se produisent lorsque l'énergie ascensionnelle est forte et le cisaillement très fort. D'une durée d'une à trois heures, ils sont fréquemment accompagnés de rafales de vent et de chutes de grêle. Les orages supercellulaires se produisent lorsque l'énergie ascensionnelle est forte et le cisaillement d'intensité moyenne. Une cellule est en rotation à l'intérieur de ces orages persistants, qui durent une à six heures. Ils sont accompagnés de chutes de grêle, de rafales de vent, de vents violents descendants («downbursts») et occasionnellement de tornades. Ce type d'orage est en recrudescence.

Tempêtes de föhn

Le föhn est un vent chaud et sec, généralement violent, qui souffle sur le versant nord des Alpes. Il se manifeste aussi sur leur versant sud, sous le nom de «föhn du nord», lorsque des masses d'air froid traversent l'arc alpin en provenance du nord ou du nord-ouest. La température élevée et la sécheresse du föhn sont dues au fait que de l'air chaud et humide est forcé de remonter le versant sud des Alpes sous un gradient adiabatique humide (baisse de la température de 0.6° C par 100 m), si bien qu'une partie de l'eau y tombe sous forme de pluie (précipitations de barrage). Ainsi, lorsque le föhn redescend, sous un gradient adiabatique sec (augmentation de la température de 1° C par 100 m), l'air est plus chaud et plus sec qu'à la montée pour une même altitude. Le régime de föhn s'installe fréquemment en hiver. La distance exceptionnelle à laquelle porte la vue, typique du föhn, est due à l'extrême sécheresse de l'air. Les nuages recouvrant le versant exposé au vent débordent quelque peu de

la ligne de crête sous la forme d'une puissante paroi, revêtant l'aspect d'un «mur de föhn» vu du côté sous le vent. La zone sans nuages située sous le vent, qualifiée de «fenêtre de föhn», est nettement reconnaissable sur les photos satellitaires. Les vents soufflant sous un régime de föhn peuvent atteindre l'intensité d'un ouragan, à l'exemple de l'événement du 16.11.2002, avec des pointes de vitesse de 60 m/s (215 km/h) dans les Alpes orientales.

Tornades

Les tornades n'affectent pas seulement le Centre-Ouest des États-Unis. Elles surviennent aux latitudes moyennes dans le monde entier, soit aussi en Suisse. Naissant fréquemment dans des cellules orageuses, le long de fronts d'intempéries, elles peuvent être accompagnées de grêle. Le diamètre moyen de la colonne des tornades, dite «tuba», est de l'ordre de 100 m et la longueur moyenne de leur trajectoire de quelques kilomètres.

On estime que la vitesse maximale en bordure du tuba de tornades extrêmes est supérieure à 139 m/s (500 km/h). Mais les rafales de la plupart des tornades ne dépassent guère 27.8 m/s (100 km/h).

En Suisse, on compte en moyenne une à cinq tornades par an. Elles surviennent principalement dans le Jura et dans le nord de la Suisse, mais pas dans les Alpes. Si la plupart des tornades affectant le territoire helvétique causent tout au plus des dommages de faible ampleur en raison de leur extension modeste, d'importants dommages ne sont toutefois pas à exclure (p. ex. en région urbaine).



Tornade dans le Jura

1

Domages infligés par une tornade à un bâtiment situé dans le canton de Fribourg. Les périmètres affectés par les tornades sont très restreints. Mais les objets touchés peuvent être gravement endommagés.



2 Échelle de Beaufort

3

La force du vent est généralement décrite en appliquant l'échelle de l'amiral Beaufort (Beaufort, 1806), qui se base sur des vitesses moyennes (sur dix minutes) et non sur des rafales! Elle est subdivisée en treize degrés selon le tableau suivant. Les vents de vitesse supérieure à 32.7 m/s (118 km/h) sont assignés au degré le plus élevé. Est considéré comme tempête un mouvement d'air imputable aux conditions météorologiques de degré 9 ou plus sur l'échelle de Beau-

fort (vitesse du vent ≥ 20.8 m/s ou 75 km/h).

Les rafales atteignent des vitesses supérieures à 42 m/s (150 km/h) sur le Plateau et dans l'avant-pays alpin, et supérieures à 70 m/s (250 km/h) sur la crête des Alpes. C'est pourquoi l'échelle Torro applicable aux tempêtes d'Europe centrale, qui décrit les dommages possibles dans une plage de 21 à 139 m/s (75-500 km/h), est également fournie en annexe.

4

5

6

7

km/h	m/s	Degré	Appellation	Remarques
0 – 1	0 – 0.2	0	Calme	La fumée s'élève verticalement.
1 – 5	0.3 – 1.5	1	Très légère brise	La direction du vent est révélée seulement par l'entraînement de la fumée.
6 – 11	1.6 – 3.3	2	Légère brise	Le vent est perçu au visage.
12 – 19	3.4 – 5.4	3	Petite brise	Les feuilles frémissent, le vent déploie les drapeaux légers.
20 – 28	5.5 – 7.9	4	Jolie brise	Les petites branches sont agitées, le vent déploie les drapeaux lourds.
29 – 38	8.0 – 10.7	5	Bonne brise	De plus grandes branches sont agitées, le vent dans le visage est assez désagréable.
39 – 49	10.8 – 13.8	6	Vent frais	Les grandes branches sont agitées, le vent siffle dans les fils.
50 – 61	13.9 – 17.1	7	Grand frais	Les arbres frêles sont agités, la marche contre le vent devient pénible.
62 – 74	17.2 – 20.7	8	Coup de vent	Les grands arbres sont agités, des branches se cassent, la marche contre le vent devient presque impossible.
75 – 88	20.8 – 24.4	9	Fort coup de vent	Les objets légers sont déplacés, des tuiles peuvent se relâcher aux endroits exposés.
89 – 102	24.5 – 28.4	10	Tempête	Les meubles de jardin et les objets légers sont renversés, des arbres sont brisés.
103 – 117	28.5 – 32.6	11	Violente tempête	Les tuiles et les tôles subissent des dommages légers, les constructions légères subissent des dommages faibles.
≥ 118	> 32.7	12	Ouragan	Ravages désastreux.

Classes de force du vent selon l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse)

Le tableau suivant expose les classes de force du vent, telles qu'elles sont appliquées dans les avis d'alerte émis par MétéoSuisse.

Force du vent	Type de vent	km/h	m/s	Échelle de Beaufort
Vent faible	Vitesse moyenne	≤ 14	≤ 3.9	env. 1 – 2
	Pointes de rafales	≤ 26	≤ 7.2	
Vent modéré	Vitesse moyenne	14 – 28	3.9 – 8.1	env. 3 – 4
	Pointes de rafales	26 – 49	7.2 – 13.6	
Vent fort	Vitesse moyenne	29 – 55	8.1 – 15.3	env. 5 – 7
	Pointes de rafales	50 – 89	13.9 – 24.7	
Vent tempétueux	Vitesse moyenne	56 – 96	15.6 – 26.7	env. 8 – 10
	Pointes de rafales	90 – 149	25.0 – 41.4	
Ouragan	Vitesse moyenne	> 96	> 26.7	env. 11 – 12
	Pointes de rafales	> 149	> 41.7	

Vitesse du vent

La vitesse du vent dépend du régime local des vents, de la topographie du site (crête, berge de

lac), des conditions d'urbanisation (pleine nature, agglomération) et de la hauteur de la mesure (au-dessus du sol).

Pression dynamique de référence

Le dimensionnement des bâtiments en fonction du vent se base sur la pression dynamique de référence q_{p0} . Cette valeur peut

être tirée de la norme SIA 261 (carte «Valeur de référence de la pression dynamique» en annexe E).

Direction des vents dominants

Les tempêtes hivernales viennent de l'ouest (nord-ouest à sud-ouest), le föhn souffle selon un axe

nord-sud et la bise vient du nord, du nord-est ou de l'est.

Rafales

Les rafales de quelques secondes soumettent les ouvrages à des contraintes particulières. La pointe

de vitesse brièvement atteinte peut occasionner des vibrations et des sollicitations cycliques.

Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

Pour procéder au dimensionnement, il faut disposer de données concernant la **pression dynamique de référence**, la **direction des vents dominants** et les **conditions de vent locales**. La pression dynamique de référence

est tirée de la norme SIA 261. Les données concernant la direction des vents dominants et les conditions de vent locales seront éventuellement complétées par un spécialiste.

1 Situation de danger 1: Bâtiment étanche (pas de pression interne)

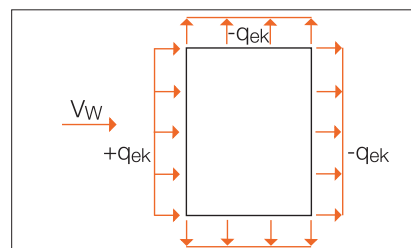
Les situations de danger suivantes exposent sous une forme généralisée l'action du vent sur les bâtiments et les toits étanches au vent. Les forces de pression et de succion auxquelles ils sont soumis

sont déterminées selon la norme SIA 261, en fonction de la direction du vent, la forme du bâtiment et du toit, la hauteur du bâtiment, ainsi que les alentours du bâtiment et du toit.

2

Action du vent sur les parois

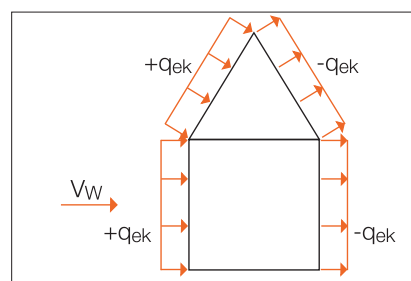
La paroi du bâtiment exposée au vent subit une pression exercée par le vent. Les parois parallèles à la direction du vent et la paroi située sous le vent sont soumises à une succion générée par le vent.



3

Effets du vent sur les toits d'inclinaison $\alpha > 40^\circ$

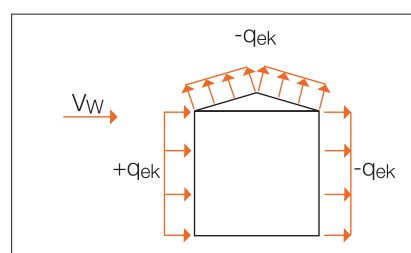
Lorsque l'inclinaison du toit est supérieure à 40° , le côté exposé au vent subit une pression et le côté sous le vent une succion.



4

Effet du vent sur les toits d'inclinaison $\alpha < 25^\circ$

Lorsque l'inclinaison du toit est de 0° à 25° , le côté exposé au vent et le côté sous le vent subissent une succion.



5

Lorsque l'inclinaison du toit est de 25° - 40° , le côté exposé au vent subit soit une pression, soit une succion, et le côté sous le vent subit une succion.

6

Situation de danger 2: Bâtiment non étanche (pression interne)

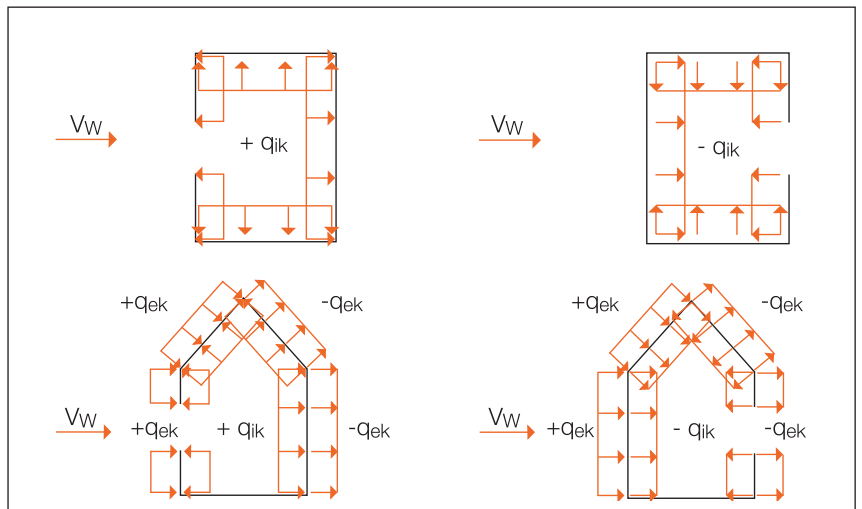
Un bâtiment est considéré comme ouvert lorsque la proportion d'ouvertures selon une vue est supérieure à 5 %. Sont considérés ici comme ouvertures les orifices

d'aération, fentes de ventilation, portes, fenêtres, bandes vitrées et similaires, qui ne sont pas toujours fermés en cas de tempête.

7

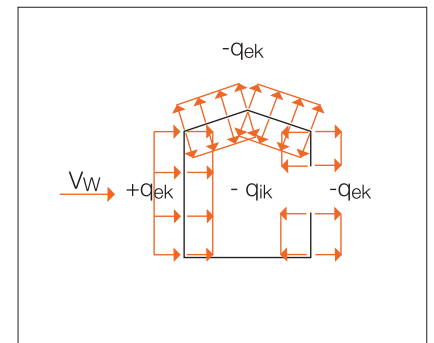
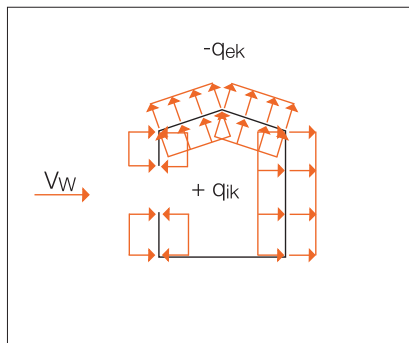
Une fenêtre ou une porte ouverte occasionne soit une pression interne, soit une succion interne, selon que cette ouverture est située

sur le côté du bâtiment exposé au vent ou sous le vent.



Une superposition défavorable des efforts générés par les sollicitations internes et externes affecte le toit et le côté sous le vent lorsqu'il y a

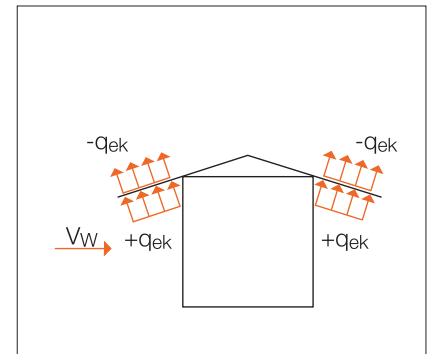
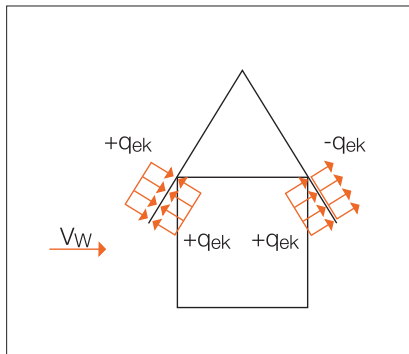
pression interne, et le côté exposé au vent lorsqu'il y a succion.



Situation de danger 3: Toit en saillie

Lorsque le toit est en saillie, une superposition défavorable des forces de pression vers le haut et des forces de succion vers le bas

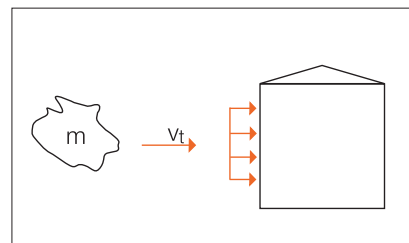
affecte le côté sous le vent lorsque le toit est raide et les deux côtés lorsqu'il est peu incliné.



1 Situation de danger 4: Impact de débris

L'impact de débris emportés par le vent menace principalement la façade exposée au vent, et surtout ses fenêtres non protégées. Il a pour effet qu'un bâtiment étanche perd son étanchéité (situation de danger 2 au lieu de 1). Les personnes encourent un danger élevé. L'énergie cinétique dégagée lors de l'impact d'un débris dépend de sa masse m et de sa vitesse v_t , qui est inférieure à celle du vent. Les débris peuvent être des élé-

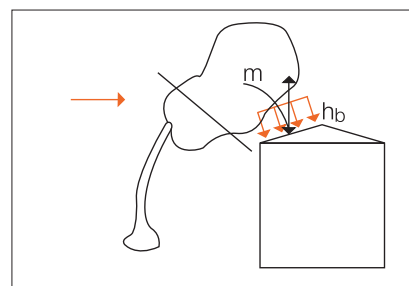
ments de toiture ou de façade arrachés, du gravier emporté sur un toit plat, un chapeau de cheminée, un meuble de jardin, du petit bois, un appareil de jeu ou de jardin, etc.



2

3 Situation de danger 5: Impact d'un arbre

La chute d'un arbre sur un bâtiment menace principalement le toit et les balcons. L'énergie cinétique dégagée lors de l'impact dépend surtout de la hauteur de chute h_b et de la masse déterminante de l'arbre m .



4

5

6

7

Calcul de la charge due au vent

La charge due au vent est calculée comme exposé dans la norme SIA 261. Le calcul selon cette norme tient compte des facteurs suivants: altitude, catégorie de terrain, hauteur du bâtiment, direction

d'incidence du vent, forme du bâtiment, position des ouvertures et des ruptures d'étanchéité, majoration dynamique due à la résonance de la structure porteuse.

Pression dynamique

Selon la norme SIA 261, la pression dynamique dépend de la nature du vent, de la rugosité du sol, de la forme de la surface du terrain et de la hauteur de référence. La pression dynamique q_p et la vitesse du vent v_w sont reliées comme suit:

$$q_p = \frac{\rho_l}{2} \cdot v_w^2 \quad [\text{kN/m}^2]$$

Pression dynamique

avec $\rho_l = 0.00125 \quad [\text{t/m}^3]$
Densité de l'air

Pointes de succion

Les bords et les angles des surfaces subissant une succion imputable au vent sont le siège de pointes de succion dues aux changements de direction marqués, générant des vitesses d'écoulement élevées. Ces pointes peuvent être plusieurs fois supérieures à la succion moyenne

dans les secteurs normaux. Les secteurs concernés du bâtiment doivent être dimensionnés spécifiquement et les fixations contre la succion due au vent doivent satisfaire à des exigences élevées.

Sous-toiture ouverte / fermée

La sous-toiture est considérée comme ouverte lorsque sa perméabilité à l'air est supérieure à celle de la couverture ou de l'étanchéité (p. ex. tôle d'acier trapézoïdale sans dispositif d'étanchéité

aux liaisons et aux raccords). Une sous-toiture est fermée lorsque sa perméabilité à l'air est inférieure ou au maximum égale à celle de la couverture ou de l'étanchéité.



L'ouverture de la sous-toiture a occasionné une superposition de pression interne et de succion externe dues au vent. Le toit n'a pas résisté à ces contraintes.

1 Pression exercée par l'impact de débris

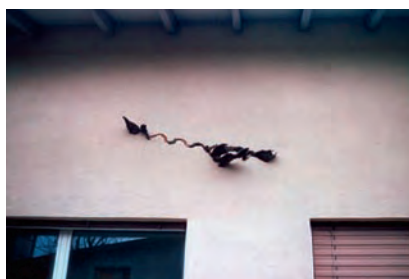
2

Lors des tempêtes, la pression exercée par l'impact des débris emportés par le vent exerce une action déterminante, en sus de la charge due au vent (situation de danger 4). Les bâtiments élevés équipés de façades en verre sont particulièrement vulnérables vis-à-vis de cette action.

Des études récentes montrent comment il est possible d'intégrer cette charge dans le dimensionnement. Les tableaux suivants

dérivent des travaux de Wills et al. (2002). Ils exposent la vitesse des débris et leur énergie cinétique en regard de la vitesse du vent qui les emporte. Les objets surfaciques reçoivent l'énergie destructrice la plus élevée, suivis des objets allongés et des objets sphériques. Signalons en outre que ces débris sont très dangereux pour les personnes se trouvant à l'extérieur.

3



Exemple d'impact d'un débris de plaque profilée en fibres-ciment arraché par le vent.

4

Vitesse et énergie cinétique de débris surfaciques:

Vitesse du vent		Vitesse des débris		Matériau	Épaisseur	Énergie cinétique
[m/s]	[km/h]	[m/s]	[km/h]			
10	36	6.4	23	Bois	3.5	39
10	36	6.4	23	Acier	0.25	39
20	72	12.8	46.1	Bois	15	614
20	72	12.8	46.1	Acier	1	614
40	144	25.6	92.2	Bois	60	9830
40	144	25.6	92.2	Acier	3.8	9830

5

Vitesse et énergie cinétique de débris allongés:

Vitesse du vent		Vitesse des débris		Matériau	Longueur x Ø	Énergie cinétique
[m/s]	[km/h]	[m/s]	[km/h]			
13	46.8	6.5	23.4	Bambou	3.0 x 30	12.5
22	79.2	11	39.6	Bambou	3.0 x 75	250
32	115.2	16	57.6	Bois	2.4 x 80	950

6

Vitesse et énergie cinétique de débris sphériques:

Vitesse du vent		Vitesse des débris		Matériau	Taille	Énergie cinétique
[m/s]	[km/h]	[m/s]	[km/h]			
10	36	3.6	13	Bois	12	0.0065
10	36	3.6	13	Pierre	2	0.0002
20	72	7.2	26	Bois	50	1.55
20	72	7.2	26	Pierre	9	0.05
40	144	14.4	51.8	Bois	200	415
40	144	14.4	51.8	Pierre	37	14

7

L'action dommageable des débris percutant une façade peut être estimée en se référant au chapitre consacré à la grêle pour des énergies jusqu'à environ 50 J. Pour des énergies supérieures à 50 J, aucune valeur concrète ne

peut être indiquée, c'est pourquoi il faut être très prudent lorsqu'on extrapole des données concernant la grêle. Cette situation de danger revêt une importance particulière lorsque la construction des façades est sensible.

Force d'impact d'un arbre qui se renverse

Aucune base de calcul n'est disponible pour déterminer la force d'impact d'un arbre qui tombe. On peut l'estimer en faisant intervenir la hauteur de chute h_b de la masse déterminante de l'arbre et en appliquant la formule de la quantité de mouvement. La vitesse prise

en compte est celle d'un corps en chute libre sans résistance de l'air. En admettant que l'impact dure 0.2 seconde, on obtient les forces d'impact suivantes pour les masses et les hauteurs de chute choisies comme exemples.

Hauteur de chute	Masse de l'arbre	Durée de l'impact	Surface d'impact	Force	Pression
12 m	500 kg	0.2 s	0.5 m ²	38 kN	76 kN/m ²
5 m	200 kg	0.2 s	0.3 m ²	10 kN	33 kN/m ²

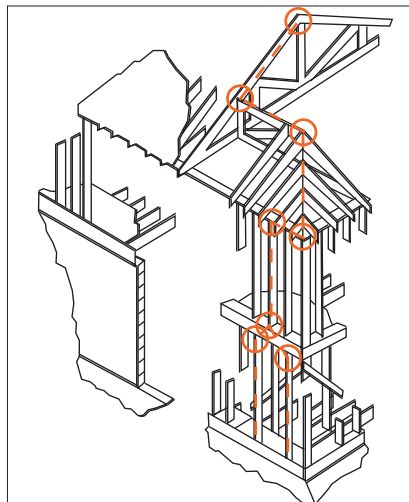


Exemple de dommage dû à la chute d'un arbre.

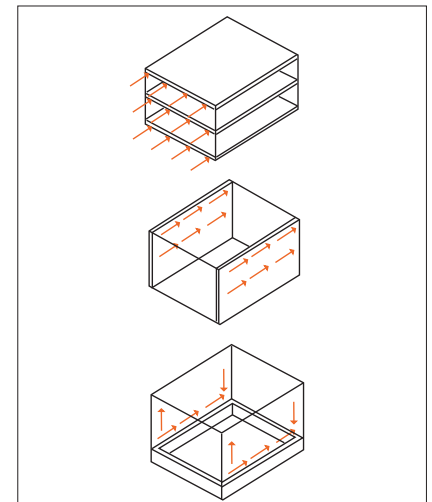
Cheminement des efforts du toit aux fondations (verticalement et horizontalement)

Les forces calculées à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment doivent être transmises du toit aux fondations par l'entremise de l'ensemble de la construction et de ses composants. Des dommages survien-

ent lorsque le cheminement des efforts est discontinu, par exemple lorsqu'il est interrompu entre la couverture du toit et la dalle du bâtiment ou entre un pilier et les fondations.



Cheminement des efforts en direction verticale (dimensionnement contre la succion)



Cheminement des efforts en direction horizontale (rigidité)

1

Les divers volets du dimensionnement sont exposés dans le tableau suivant, au sens d'une check-list:

2

3

Dimensionnement	Éléments du bâtiment
Calcul des forces de pression et de succion déterminantes	<ul style="list-style-type: none"> - Choix du système statique pour maîtriser les forces dues au vent - Détermination des efforts subis par les éléments de l'enveloppe
Vérification du cheminement des efforts en direction horizontale	<ul style="list-style-type: none"> - Pour la toiture et le plancher-dalle - Pour la transmission des charges du plancher-dalle aux parois - Pour la transmission des charges des parois au plancher-dalle (1^{er} étage) - Pour la transmission des charges du plancher-dalle aux parois (rez) - Pour la transmission des charges des parois aux fondations - Pour le frottement le long des parois latérales
Vérification du cheminement des efforts en direction verticale	<ul style="list-style-type: none"> - Pour la transmission des charges de la couverture du toit au lattage - Pour la transmission des charges du lattage à la charpente - Pour la transmission des charges de la charpente à la dalle - Pour la transmission des charges de la dalle aux piliers - Pour la transmission des charges des piliers aux fondations - Pour la transmission des charges des fondations au sous-sol
Vérification des composants	<ul style="list-style-type: none"> - Pour la transmission des charges par les fenêtres et les portes - Pour le dimensionnement des fenêtres et des portes (évt contre les chocs)

4

Protagonistes et responsabilités concernant le dimensionnement

Plusieurs protagonistes assument une responsabilité dans le dimensionnement au vent, notamment:

Le couvreur: sollicitation de la couverture, transmission des charges par le lattage et le sous-toit

Le charpentier: dimensionnement de la charpente (poutres, pannes, chevrons, voire lattage)

L'ingénieur civil: stabilité de l'ensemble du bâtiment (fondation, structure porteuse, planchers, parois)

Le géotechnicien: résistance du sous-sol

Le chef de projet doit déléguer la responsabilité du dimensionnement aux différents protagonistes et requérir les vérifications pertinentes. De nombreux sinistres sont imputables à des négligences dans ces vérifications ou à des lacunes dans la communication.

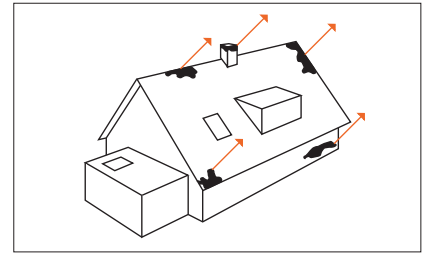
5

6

7

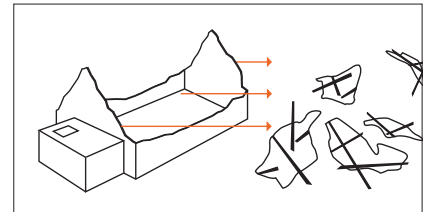
Rupture de l'enveloppe du bâtiment

Des éléments du toit et de la façade n'ont pas résisté aux forces de succion. Ce type de dommages représente la charge principale lors d'événements affectant un vaste périmètre. De nombreux bâtiments subissent de légers dommages sous la forme de rupture de quelques éléments, généralement exposés, de l'enveloppe.



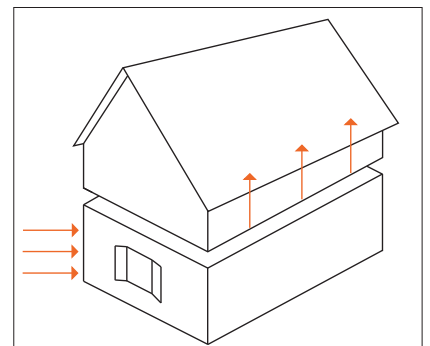
Rupture de la toiture

La rupture de toute la toiture est souvent due à des conditions de vent particulières (une vaste plaine sur la photo). Pour les nouveaux bâtiments, ce type de dommages est très souvent imputable à des fautes de construction.



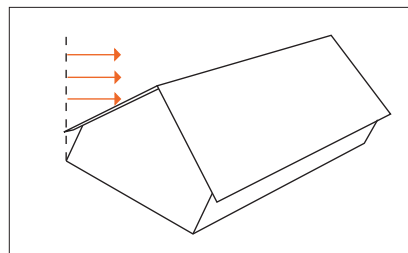
Soulèvement du bâtiment

Le soulèvement de tout le bâtiment ou de parties de celui-ci affecte principalement les constructions légères. Le chalet en bois de la photo a été soulevé au-dessus de la fenêtre lors d'une tempête.



1 Rupture de l'ensemble de la structure porteuse

La rupture de l'ensemble de la structure porteuse est exceptionnelle en Suisse. La construction ouverte en bois de la photo n'a pas résisté aux charges occasionnées par l'ouragan Lothar. La superposition de pression interne et de forces de succion a provoqué l'effondrement de la structure porteuse.

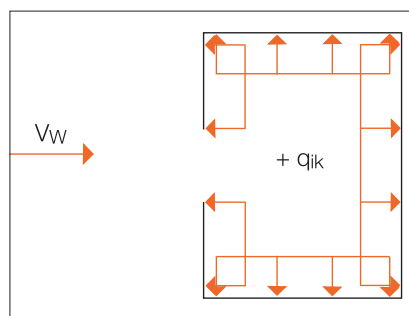


2

3

Pression interne

Les dommages dus à la pression régnant à l'intérieur de bâtiments sont rares en Suisse. La photo présente un sinistre survenu dans le canton de Fribourg. Une fenêtre n'a pas résisté à la charge occasionnée par la pression du vent de la tornade. Il en a résulté une importante pression interne, qui a arraché les portes de leurs ancrages dans cet espace intérieur.



4

5

6

7



Fixations insuffisantes

Les dommages observés à la toiture des nouvelles constructions et des transformations sont le plus souvent dus au fait que la transmission des charges dans la construction porteuse n'a pas été vérifiée.

- Fixation insuffisante ou fixation mécanique déficiente de la couverture sur la construction porteuse, spécialement aux angles et aux bords, mais aussi au milieu du toit



- Collage déficient entre la couverture et l'isolation thermique ou entre celle-ci et la construction porteuse
- Raccords ou fermetures de bord insuffisants ou déficients
- Omission de la pression régnant dans le bâtiment



L'utilisation de clous lisses au lieu de vis ou, à défaut, de clous rainurés ou torsadés s'est soldée par un dommage total de ce toit en tôle profilée. Il arrive fréquemment que les liaisons entre la couverture et le voligeage, entre le voligeage et le contre-lattage, ainsi qu'entre

le contre-lattage et les chevrons ne soient pas vérifiées numériquement. Le maître de l'ouvrage ou son représentant est tenu d'exiger explicitement cette vérification du chef de projet ou du spécialiste qui en est chargé.



Ce toit d'une nouvelle construction, dont les fixations entre le contre-lattage et les chevrons étaient insuffisantes, a été soulevé et projeté sur la place de parc (danger pour les personnes!).

Les avant-toits dépourvus de sous-toiture sont incapables de résister aux efforts de succion générés par le vent, même de faible vitesse.

1 Entretien déficient

La négligence dans l'entretien des toits, façades, portes, volets, stores et fenêtres peut se solder par d'importants dommages.

Les principales carences revêtent la forme de tuiles manquantes ou défectueuses, crochets tempête man-

quants, toit perméable, planches de rive ou de virevent pourries, chapeaux de cheminées défectueux ou façades défectueuses.

2



3

Transformation inappropriée

L'équilibre statique est souvent compromis lorsqu'on modifie des parois ou des colonnes porteuses. Si des composants importants du contreventement du bâtiment sont

affaiblis ou ôtés sans être remplacés, les éléments restants subissent des charges additionnelles qui n'avaient pas été considérées lors du dimensionnement.

4



Transformation avec des liaisons sous-dimensionnées.



Structure porteuse affaiblie par la suppression de poutres.

5

6

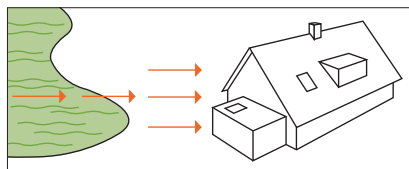
7

Topographie du site

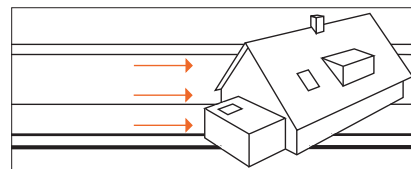
Le choix du site de construction influence les sollicitations dues au vent. Les sites soumis à des sol-

licitations élevées du fait de leur topographie sont (voir SIA 261 et Zimmerli & Hertig, 2006):

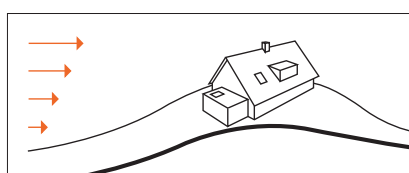
Berge de lac



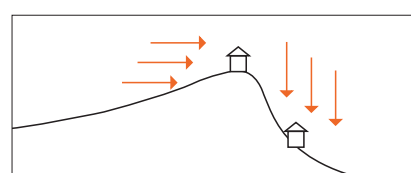
Vaste plaine



Éminence



Crête / versant raide

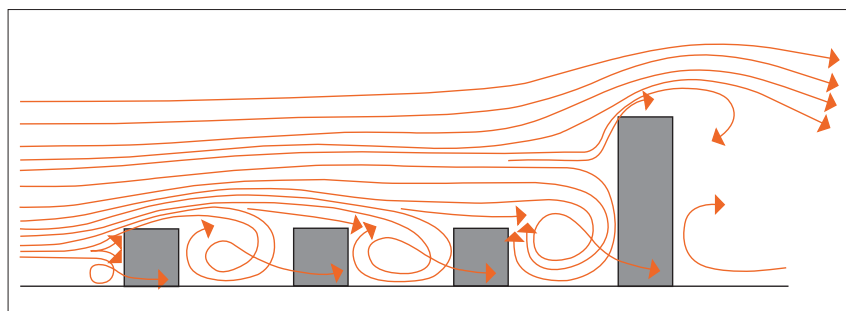


Hauteur du bâtiment et bâti / végétation environnant

Le choix de la hauteur du bâtiment influence directement l'ampleur des sollicitations dues au vent. La hauteur relative, par rapport au bâti environnant, revêt de l'importance en sus de la hauteur absolue. Lorsque le bâtiment a une hauteur compa-

nable à celle des constructions voisines, les sollicitations dues au vent y sont réduites.

Le voisinage des immeubles est le siège de tourbillons qui doivent être pris en compte lors du dimensionnement.



1

2

3

Orientation du bâtiment

4

5

6

7

Recommandations en vue d'éviter des vitesses de vent élevées près du sol

Les recommandations suivantes fournissent des pistes pour éviter l'occurrence indésirable de vitesses de vent élevées près du sol.

1. Il faut éviter de construire des bâtiments plus de deux fois plus hauts que les constructions voisines.
2. Plus un bâtiment s'approche d'une forme circulaire dans le plan horizontal, plus les conditions au sol sont favorables, car les courants descendant le long de la façade frontale s'en trouvent considérablement réduits. Lorsque la forme dans le

plan horizontal est un rectangle allongé, la direction du côté allongé du bâtiment devrait coïncider avec celle du vent dominant.

3. Lorsqu'un grand bâtiment élancé est construit perpendiculairement à la direction du vent dominant, la zone proche du sol peut être abritée par des avant-corps ou des toits de dimensions suffisantes.
4. Les espaces et les passages entre bâtiments ne devraient pas être orientés dans la direction du vent dominant.
5. La vitesse du vent dans les passages peut être réduite en disposant judicieusement des écrans anti-vent ou des arbres.

L'orientation du bâtiment doit être examinée lorsque le site est exposé au vent. La charge due au vent peut être réduite considérablement

en adoptant une orientation favorable par rapport à la direction du vent dominant, en particulier lorsque le toit a un seul pan.



Exemple de bâtiment érigé parallèlement à la direction du vent dominant (face pignon). Le côté exposé au vent (photo de gauche) est surmonté d'un court avant-toit et ses fenêtres sont équipées d'un

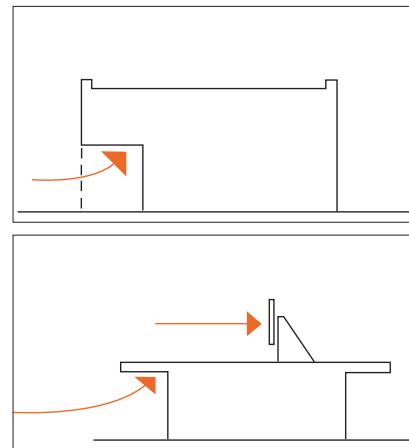
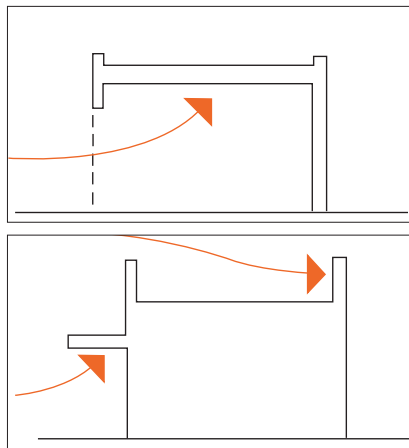


avant-corps, tandis que le côté sous le vent (photo de droite) est surmonté d'un avant-toit plus long et bordé par une prolongation des parois latérales.

Forme du bâtiment

Plus un bâtiment s'approche d'une forme sphérique, plus les efforts qu'il subit du fait du vent sont faibles. Les esquisses suivantes pré-

sentent des formes défavorables, qui nécessitent un dimensionnement particulier.



Forme du toit

Le choix de la forme du toit influence considérablement les forces de pression et de succion générées par le vent. Les forces

locales et globales peuvent être calculées pour différentes formes de toit en appliquant la norme SIA 261.

1 Toit incliné

2

3

4

5

6

7

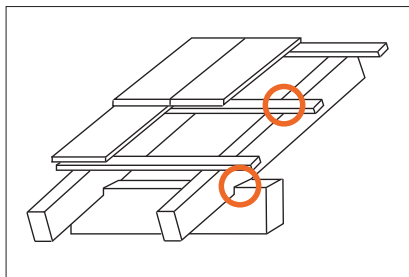
Transmission des charges de la couverture à la structure porteuse

(selon Schunck et al., 2002)

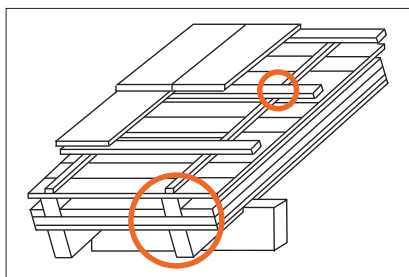
Les charges agissant à la surface du toit doivent être transmises à la structure porteuse principale, puis dans le sol, par l'entremise des différents composants de la construction. On distinguera les éléments porteurs et les éléments

Couverture d'un toit ouvert

Les diverses plaques reprennent les charges réparties sur leur surface et les transmettent aux lattes sous la forme de charges linéaires.

**Toiture à plaques avec une isolation thermique ventilée sur la structure porteuse**

Les différentes plaques reprennent les charges réparties sur leur surface et les transmettent aux lattes de toiture sous la forme de charges linéaires. Les lattes de toi-

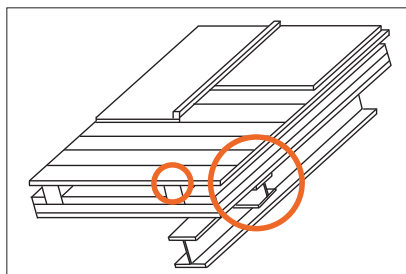


non porteurs. Des charges réparties sur des surfaces sont converties en charges linéaires ou concentrées. La direction des contraintes peut varier d'un élément à l'autre. La transmission des charges peut être uniaxiale ou biaxiale. La perméabilité de la couverture détermine la sous-ventilation, et par conséquent le lieu et la grandeur des actions.

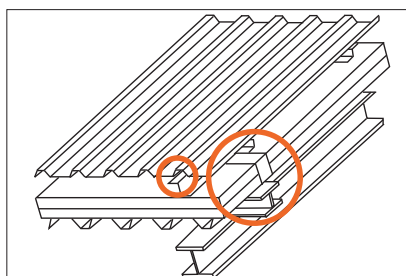
Passant sur plusieurs chevrons, les lattes sont l'équivalent statique d'une poutre continue. Les chevrons reprennent les charges concentrées provenant des lattes et les transmettent aux pannes sur une certaine portée. Chaque élément a un rôle porteur! Les liaisons mises en œuvre doivent garantir la transmission des charges jusqu'à la structure porteuse principale.

ture transmettent les charges aux chevrons de ventilation par l'entremise des lattes de ventilation et du voligeage. Ces derniers reposent directement et en continu sur les chevrons de ventilation. Ils doivent être reliés entre eux de manière à ce que toutes les charges puissent être reprises. Les chevrons de ventilation, reposant à courts intervalles sur les pannes, doivent surmonter une portée correspondante. Les pannes transmettent les charges aux chevrons porteurs par l'entremise du voligeage inférieur. Elles ne doivent surmonter aucune portée. Dans ce cas, les voligeages supérieur et inférieur ne sont pas porteurs.

Bandes métalliques sur une précoverture et voligeage avec une isolation thermique ventilée



Plaques métalliques avec une couverture sous-ventilée et une sous-couverture reposant sur une isolation thermique



La couverture métallique repose à plat sur le voligeage, qui est porteur dans ce cas. Il supporte les charges externes et constitue un système continu passant d'un chevron de ventilation à l'autre. Ces derniers reposent sur les traverses, posées en continu sur les pannes. Ainsi, les chevrons de ventilation, surmontant la portée entre les pannes, sont les éléments porteurs. Le panneau d'aggloméré sous-jacent n'est pas porteur.

La tôle trapézoïdale de couverture supporte les charges externes. Disposée parallèlement à la pente du toit, elle repose sur des tôles porteuses horizontales peu espacées. Ces dernières reposent sur les profilés passant d'un bois d'appui à l'autre. Les bois d'appui répartissent les charges sur la tôle trapézoïdale inférieure, qui est porteuse. Ainsi, cette dernière, surmontant la portée d'une panne à l'autre, est l'élément porteur.

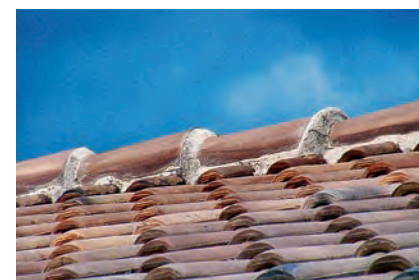
Toitures

Il est nécessaire de renforcer le toit aux bords, angles et pignons. Les fournisseurs et les associations



On peut protéger les secteurs menacés par les forces de succion en appliquant des crochets tempête, en les vissant, en les enrobant de mortier, en y appliquant des tuiles

professionnelles donnent certaines indications sur les fixations requises (voir en annexe).



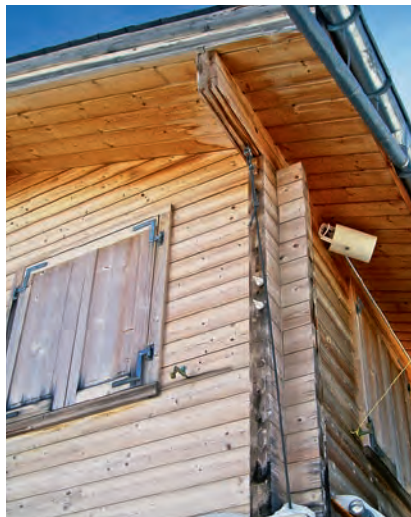
de rive ou en coffrant leurs bords. Cette énumération n'est pas exhaustive. Des solutions innovantes sont aussi imaginables pour gérer les forces de succion.

1

Fixation des constructions en bois contre la succion

Les forces de succion agissant sur

l'avant-toit sont transmises dans les fondations au moyen de câbles en acier.



2

3

4

Façades

5

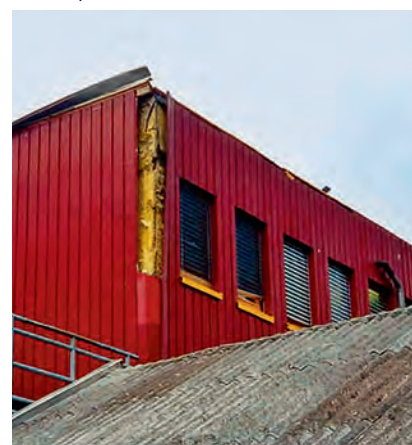
6

7

Ancrage des revêtements de parois extérieures

Les façades sont soumises à des forces de succion élevées au voi-

sinage des angles du bâtiment. La norme SIA 261 propose un mode de dimensionnement concret pour cette partie des bâtiments.



Dommmages aux angles d'un bâtiment dus à des forces de succion générées par des vents tempétueux.

Fenêtres et surfaces vitrées en général

Les portes et les fenêtres doivent être conçues en fonction des forces de pression ou de succion auxquelles elles seront soumises. Les portes seront fixées à l'extérieur. La charge appliquée sur les fenêtres doit pouvoir être transmise de la vitre au cadre et du cadre à la construction qui l'entoure. L'utilisation de verre partiellement précontraint permet de réaliser

des constructions élancées même lorsque la pression due au vent est élevée. Si l'on s'attend à des impacts de débris emportés par le vent, il faut utiliser du verre de sécurité feuilleté pour protéger les personnes. Les volets battants et les stores à lamelles résistant aux tempêtes offrent une protection efficace contre les impacts de débris.

Cheminées, antennes

Les pylônes et les cheminées de grande hauteur sont généralement sensibles aux vibrations en raison de leur forme élancée, c'est pourquoi ils doivent être fixés solidement, par exemple par des haubans. Ces superstructures génèrent en outre des succions élevées à leur voisinage.

Les haubans sont très importants pour la stabilité des installations. Aussi faut-il:

- Assurer une protection efficace et durable contre la corrosion
- Contrôler régulièrement les haubans et leurs ancrages



Chapeau de cheminée arraché



Antenne satellitaire arrachée

Avant-toits et abris

Les avant-toits et les abris subissent fréquemment un dommage total dû à la superposition d'une force de succion s'exerçant par le haut et d'une force de pression

s'exerçant par le bas. La norme SIA 261 énumère les coefficients de pression applicables à différents rapports entre hauteurs et porte-à-faux d'avant-toits.



1 Garages

Les garages et leurs portes doivent être conçus, comme les bâtiments, pour résister aux sollicitations dues au vent. On veillera particulièrement

à fixer les constructions légères de manière à ce qu'elles ne soient pas soulevées lorsque la porte est ouverte.

Cellules solaires

La charge subie par les cellules solaires doit être étudiée spécifi-

quement en fonction de leur disposition sur le toit ou sur la façade.

2 Études spéciales pour les formes de bâtiments particulières

Il est recommandé d'étudier spécialement les bâtiments très élevés, les constructions ouvertes, les constructions souples et les formes aérodynamiques inhabituelles, voire de les tester en soufflerie.



3

Coffrage du toit

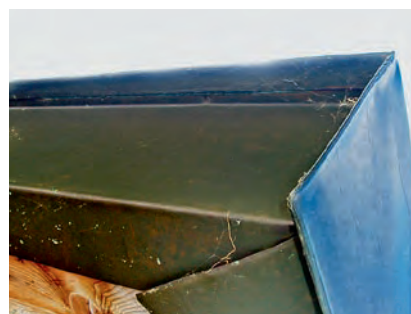
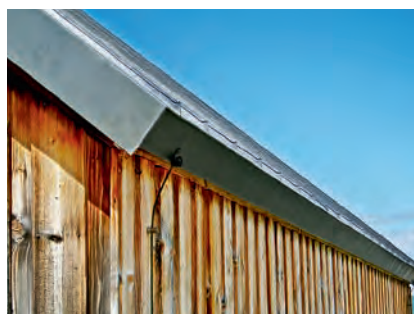
Les charges extrêmes régnant aux endroits exposés (collines, sommets) peuvent être réduites en

coffrant les avant-toits comme sur les photos.



4

5



6

Protection des ouvertures

Situation de danger «Vent»

Les coupoles peuvent être soumises à une pression interne en sus des forces de succion externes.

Leurs fixations seront dimensionnées en tenant compte de cette superposition de forces, dans les positions ouverte et fermée.

7

Situation de danger «Vent et pluie»

Les fenêtres exposées devraient être protégées contre les intempéries par un aménagement intégré dans la construction.



Constructions gonflables

Les tempêtes infligent régulièrement d'importants dommages aux constructions gonflables lorsque la pression intérieure n'est pas augmentée à temps. C'est pourquoi les règles suivantes permettent de prévenir des dommages à ce type de constructions:

- Il faut installer au moins deux souffleries pour pouvoir augmenter rapidement la pression intérieure en cas de tempête et la maintenir si un appareil tombe en panne.

- Il est judicieux de coupler la commande des souffleries avec un anémomètre, afin que la pression intérieure soit augmentée automatiquement lorsque le vent atteint une vitesse critique.
- Il faut prévoir des génératrices de secours pour alimenter les souffleries, car l'électricité est fréquemment coupée lors des fortes tempêtes.

Tentes

Les attaches des tentes et leurs ancrages au sol, qui doivent être aptes à résister aux efforts de traction, seront contrôlés régulièrement et réparés immédiatement si des déficiences sont constatées. Sinon, les attaches peuvent céder lorsque le vent exerce une forte pression, ce qui risque de provoquer la destruction de l'ensemble de la tente.

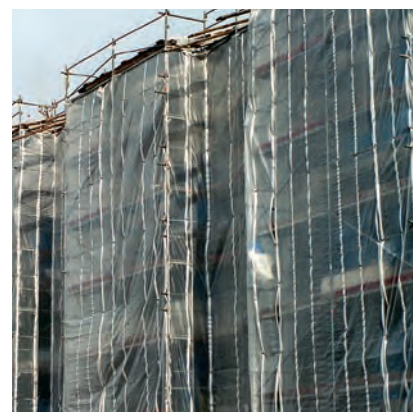


Échafaudages, toits provisoires

Pour éviter des dommages, il faut prendre les précautions suivantes:

- Fixer les éléments porteurs des ouvrages au moyen d'ancrages résistant aux efforts de traction et de compression.
- Prendre des mesures de sécurité rigoureuses lorsque des écrans de protection sont mis en œuvre.

La liste de contrôle SUVA «Échafaudages de façade» (voir la liste des directives techniques en annexe) fournit des informations supplémentaires à ce sujet.



Grues

Les mesures suivantes doivent être prises pour garantir la stabilité des grues exposées à des tempêtes:

- Vérifier la résistance du sous-sol, en tenant notamment compte du fait que la charge exercée par le vent s'applique principalement sur un seul côté des grues; les fixer si nécessaire au moyen de haubans.
- Mettre la plate-forme au point mort lorsque la grue n'est pas utilisée, afin que la flèche n'offre aucune résistance au vent.

- Contrôler régulièrement l'état de corrosion, usure ou autre défaut des parties mécaniques.
 - Procéder à un entretien périodique et remédier aux défauts.
- La liste de contrôle SUVA «Grues de chantier» (voir la liste des directives techniques en annexe) fournit des informations supplémentaires à ce sujet.

1 Constructions légères

Lorsqu'une tempête est annoncée, il faut consolider les constructions légères dans la mesure du possible et en fermer toutes les ouvertures.



2

Mesures particulières pendant la construction

Les parois isolées en chantier doivent être étayées. Les matériaux légers entreposés temporairement seront fixés par des sangles, pour éviter qu'ils ne deviennent des projectiles en cas de tempête. Différents services d'alerte dispensent des prévisions relatives aux tempêtes sur abonnement.

Paroi isolée en maçonnerie renversée lors d'une tempête.



3

Stores solaires

Les stores solaires, inaptes à résister aux tempêtes, doivent être relevés avant que le vent ne se lève. Ce processus peut être commandé à l'aide d'un anémomètre (mesure de la vitesse du vent; à l'angle au-dessus des stores sur la photo) combiné avec un détecteur de soleil ou au moyen d'un système d'alarme.



4

5

6

7

Combinaison de mesures

Cette section présente des combinaisons de mesures envisageables dans chaque situation de danger, pour les constructions existantes et pour les nouvelles. Seule la combinaison des mesures exposées – qui ont trait à la conception, au renforcement et à l’effet d’écran –

permet de réduire efficacement le risque. Les mesures décrites portent uniquement sur l’objet menacé. On peut aussi mettre en œuvre dans ses environs des mesures visant à réduire le danger (arrimer et/ou ôter les arbres et les projectiles potentiels).

		Mesures										
		Conception					Renforcement			Écran		
Combinaison de mesures	Situation de danger	Emplacement du bâtiment	Hauteur du bâtiment	Orientation du bâtiment	Forme du bâtiment	Forme du toit	Toit / avant-toit	Structure porteuse	Façades	Ouvertures	Coffrage	Ouvertures
		Bâtiment existant										
A	1						•	•	•			
B	1										•	
C	2						•	•		•		
D	3						•					
E	4								•			•
F	5						•	•				
Nouvelle construction												
G	1	•	•	•	•	•	•	•				
H	2	•	•	•	•	•	•	•		•		
I	3			•			•					
J	4								•			•
K	5						•	•				

- | | | | |
|---|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Combinaison de mesures A «Renforcement» | L'enveloppe du bâtiment – ainsi que la structure porteuse si nécessaire – est renforcée dans le cadre d'une transformation. | |
| 2 | Combinaison de mesures B «Coffrage» | Les avant-toits exposés sont coffrés pour éviter toute superposition de forces de pression vers le haut et de forces de succion vers le bas. | |
| 3 | Combinaison de mesures C «Renforcement vis-à-vis des pressions internes» | L'enveloppe du bâtiment – ainsi que la structure porteuse et les ouvertures si nécessaire – est renforcée dans le cadre d'une transformation. Dans ce cas, la pression interne susceptible d'apparaître | représente une nouvelle situation de danger, qui doit être prise en compte dans le dimensionnement. |
| 4 | Combinaisons de mesures D et I «Renforcement des toits en saillie» | La conception des avant-toits est renforcée, car ils sont soumis, dans le cas le plus défavorable, à des forces de pression vers le haut et à des forces de succion vers le bas. | En ce qui concerne les nouveaux bâtiments, on remédie également à cette situation de danger en orientant judicieusement la construction. |
| 5 | Combinaisons de mesures E et J «Renforcement et écran contre l'impact de débris» | L'enveloppe du bâtiment est renforcée et les ouvertures sont protégées par un écran contre les impacts de débris. | |
| 6 | Combinaisons de mesures F et K «Renforcement contre la chute d'arbres» | La conception de la structure porteuse et de la toiture est renforcée afin qu'elles offrent une résistance importante à une éventuelle chute d'arbre. | |
| 7 | Combinaisons de mesures G et H «Nouvelle construction» | Lorsqu'une nouvelle construction est projetée, les plans tiennent compte des critères de conception (emplacement, hauteur et orientation du bâtiment ainsi que forme du bâtiment et du toit). L'enveloppe et la structure | porteuse sont dimensionnées en respectant les exigences avec ou sans pression interne. |

Exemple d'analyse coût-utilité

Coût

L'exemple suivant illustre l'importance pour les toits de la succion due au vent, en tenant compte des dégâts qu'elle occasionne.

Une industrie située sur le Plateau construit une halle de montage avec un toit en tôle. Si elle utilise des clous lisses pour relier le contre-lattage et les chevrons, elle ne protège pas l'objet (variante A). Si elle opte pour des vis au lieu de ces clous lisses, conformément aux prescriptions (variante B), cette

La méthode appliquée est exposée en détail à l'annexe E des présentes recommandations.

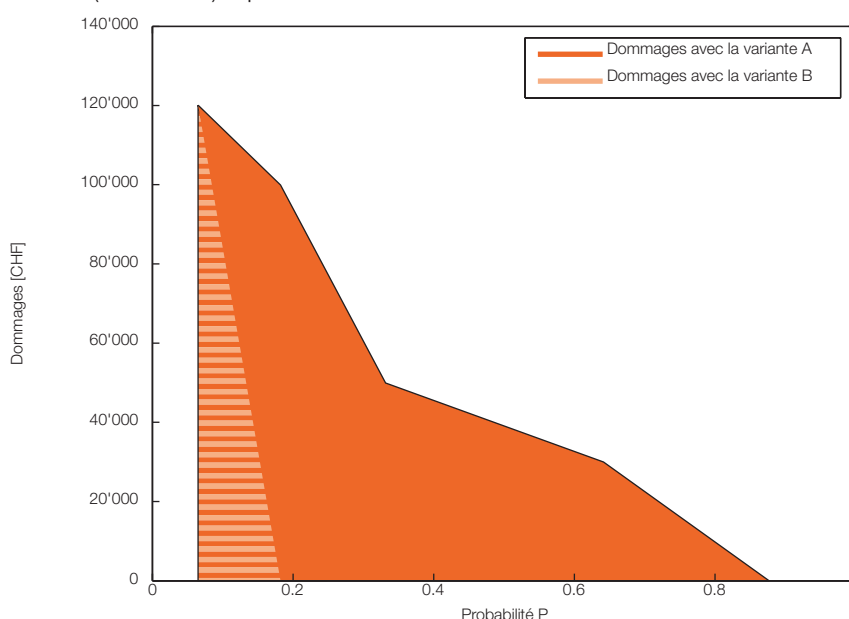
mesure de protection occasionne un surcoût de 3'000 CHF pour les travaux et les matériaux.

Calcul:
Surcoût $k = 3'000$ CHF, taux d'intérêt $z = 3\%$, longévité $n = 20$ ans
Surcoût compte tenu des intérêts $K = 3000 \times (1.03^{20}) = 5'418$ CHF

Utilité

L'utilité tient compte des dégâts directs évités (tôle déchirée) et des dommages indirects dus à la détérioration des alentours et à l'interruption de l'exploitation. On admet que des dommages apparaissent en l'absence de mesures de protection (variante A) à partir de l'évé-

nement qui se produit en moyenne une fois tous les 10 ans et en présence de mesures de protection à partir de l'événement qui se produit en moyenne une fois tous les 100 ans. L'utilité est calculée pour un horizon de 20 ans. Elle se monte à 33'066 CHF selon l'annexe E.



Comparaison coût-utilité

La comparaison entre le coût et l'utilité des mesures considérées consiste à confronter le surcoût qu'elles occasionnent et leur utilité.
 $\text{Coût} / \text{utilité} = 5'418 \text{ CHF} / 33'066 \text{ CHF} = 0.164$

Cela signifie que le surcoût occasionné par les mesures de protection de l'objet est très judicieux en termes économiques.

Comme un vent de période de retour égale à 20 ans est susceptible d'occasionner de premiers dommages en l'absence de mesures

de protection, la valeur attendue des dommages, de 40'115 CHF, est très élevée.

Si le dimensionnement est conforme à la norme SIA 261, on peut admettre que même un vent de période de retour égale à 100 ans ne causera aucun dommage au bâtiment dans le cas de la variante B. Ainsi, le surcoût de 5'418 CHF est très nettement inférieur au montant des dommages attendus prévenus, de 33'066 CHF.