



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](http://protection-dangers-naturels.ch). 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

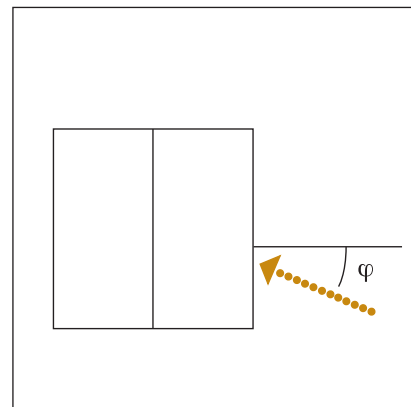
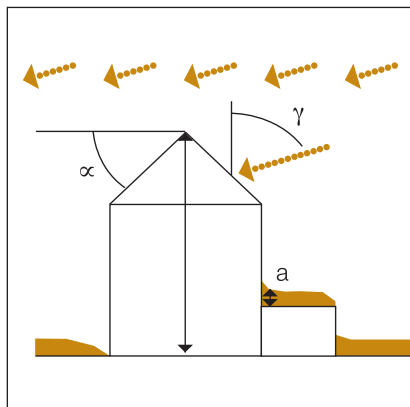
7

1 Notations

k [mm]: Diamètre du grêlon
 γ [°]: Angle d'incidence (dans le plan vertical)
 φ [°]: Direction d'incidence (dans le plan horizontal)
 α [°]: Inclinaison du toit
 ρ_h [kg/m³]: Densité de la glace composant le grêlon
 ρ_l [kg/m³]: Densité de l'air
 c_d [-]: Coefficient de résistance de l'air
 v_f [m/s]: Vitesse de chute verticale du grêlon (sans influence du vent)
 v_h [m/s]: Vitesse horizontale du grêlon sous l'influence du vent
 v_w [m/s]: Vitesse du vent (rafales)
 v_{fw} [m/s]: Vitesse de chute du grêlon avec influence du vent

v_{AS} [m/s]: Vitesse minimale approximative d'endommagement (laboratoire)
 T [h]: Durée de la chute de grêle
 a [m]: Épaisseur accumulée
 q_a [N/m²]: Charge due au dépôt de grêle
 m [kg]: Masse d'une charge concentrée
 E_c [J]: Énergie cinétique d'un grêlon
 E_T [J/m²]: Énergie cinétique totale de la grêle, par élément de surface et par événement
 W_{AS} [J]: Travail minimal approximatif d'endommagement (laboratoire)
 g [m/s²]: Accélération gravitationnelle (10 m/s²)

3



4

5 Caractérisation

La forme et la taille des grêlons, ainsi que la nature et l'intensité des effets de la grêle, sont influencés par le climat, la topographie et les conditions de vent. L'action de la grêle est aussi déterminée par la forme de l'ouvrage, son emplacement, la nature de ses surfaces et l'inclinaison de sa toiture.

Orage de grêle

Sans orage, pas de grêle. Inversement, de nombreux orages ne sont pas accompagnés de grêle, lorsque les conditions atmosphériques ne sont pas réunies pour en produire ou lorsque les grains de grêle ou de grésil ont une petite taille et fondent rapidement pour atteindre le sol sous forme d'averse. Une règle empirique grossière veut que la fréquence de la grêle soit approximativement égale au dixième de celle des orages. Le danger de chute

de grêle est le plus élevé dans les régions où des masses d'air froid et sec et des masses d'air chaud et humide se rencontrent, ainsi qu'en région montagneuse, où la convection de l'air est accentuée par le relief.

Les mouvements verticaux, soudains et intenses d'air atmosphérique qui sont à l'origine des orages se développent soit lorsque des surfaces très chaudes sont soumises à un rayonnement solaire intense, soit lorsque deux masses d'air différentes se heurtent, ce qui se produit principalement quand un front froid de grande ampleur fait irruption à la fin des chaleurs estivales. La stratification de l'atmosphère doit être instable pour que ces mouvements verticaux puissent se développer. La formation de gros grêlons requiert de puissants courants ascendants dans le nuage d'orage. Tant

6

7

qu'ils restent en suspension, ils peuvent retirer des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace de l'air ambiant des nuages, et poursuivre ainsi leur croissance. Les courants ascendants sont généralement concentrés dans des cheminées étroites situées à l'intérieur des orages. Lorsque l'ascendance cesse subitement dans une cheminée,

la masse de gouttes et de grêlons jusqu'alors en suspension s'abat brusquement. Le même orage peut produire plusieurs chutes de grêle distinctes spatialement. Une colonne de grêle, ainsi qu'on nomme une zone de grêle d'un seul tenant, s'étend habituellement sur une longueur de quelques kilomètres et une largeur inférieure à un kilomètre.

Échelle des dommages occasionnés par la grêle

Le tableau suivant, basé sur les échelles Torro (voir Risk Frontiers Australia) et adapté à la Suisse,

illustre les dommages occasionnés par des grêlons de différentes tailles.

Classe d'intensité	Diamètre des grêlons k	Description des dommages
H0	[5 mm]	Chute de grêle, grêlons de la taille d'un pois. Pas de dommages.
H1	[5 - 15 mm]	Feuilles perforées, pétales arrachés.
H2	[10 - 20 mm]	Feuilles d'arbres et de plantes arrachées; légumes, fruits et céréales marqués et meurtris; feuilles de légumes déchiquetées.
H3	[20 - 30 mm]	Quelques vitres de serres, cloches de verre et/ou impostes brisées. Clôtures en bois entaillées. Peinture de rebords de fenêtres arrachée. Mobile homes bosselés. Toits en plexiglas perforés. Toiles (p. ex. tentes) déchirées. Tiges de céréales brisées et semences broyées; fruits éclatés/détruits.
H4	[25 - 40 mm]	Quelques vitres de fenêtres de maisons et/ou pare-brise de véhicules éclatés et/ou fortement fissurés; serres largement endommagées. Quelques toits recouverts de carton bitumé perforés. Peinture des murs et des véhicules les endommagée. Traces d'impact (bosses) visibles sur les carrosseries fines. Petites branches d'arbres cassées. Oiseaux et volaille sans protection tués. Impacts marqués sur les sols durs.
H5	[30 - 50 mm]	Certaines plaques en ardoise et tuiles en terre cuite cassées. Nombreuses fenêtres fracassées; toits en tuiles de verre et vitres de fenêtres en verre renforcé brisés. Bosses visibles sur les véhicules se trouvant à l'extérieur. Enveloppe extérieure des petits avions bosselée. Risque de blessures graves ou mortelles pour les petits animaux. Écorce des arbres arrachée par bandes. Éléments en bois bosselés et écaillés. Grosses branches d'arbres cassées.
H6	[40 - 60 mm]	Nombreuses plaques d'ardoise et tuiles en terre cuite (sauf les tuiles en béton) cassées. Toits de bardeaux et de chaume défoncés; toits de tôle ondulée et quelques toits métalliques profondément entaillés et parfois perforés. Maçonnerie apparente légèrement endommagée. Cadres de fenêtres en bois cassés.
H7	[50 - 75 mm]	Toits d'ardoise et de bardeaux ainsi que nombreux toits de tuiles détruits, charpente mise à nu; toits métalliques perforés. Éclatements dans la maçonnerie apparente et de parpaings. Cadres de fenêtres métalliques cassés. Carrosserie de voitures et de petits avions gravement, voire irrémédiablement endommagée.
H8	[60 - 90 mm]	Tuiles en béton fissurées. Toits de métal, ardoise et bardeaux et autres toits de tuiles détruits. Trottoirs bosselés. Enveloppe extérieure des grands avions gravement endommagée. Petits troncs d'arbre arrachés. Danger de blessures graves pour les personnes surprises à l'extérieur.
H9	[> 80 mm]	Éclatements dans les parois en béton. Nombreuses tuiles en béton cassées. Parois des maisons en bois complètement perforées. Grands arbres cassés. Danger mortel pour les personnes surprises à l'extérieur.
H10	[>100 mm]	Maisons en bois détruites. Maisons en briques très gravement endommagées. Danger mortel pour les personnes non protégées.

1 Durée de la grêle

La durée d'une chute de grêle influence la grandeur de l'énergie cinétique totale de la grêle et l'épaisseur de grêle accumulée. Lorsqu'elle se prolonge, il est possible que la surface du bâtiment

touchée se refroidisse brusquement. Le comportement des matériaux dans ces conditions doit être étudié (diminution de la résistance, rupture fragile).

2 Direction et angle d'incidence

La direction d'incidence détermine les façades du bâtiment qui seront touchées, tandis que l'angle d'incidence détermine l'intensité de l'action. C'est lorsque l'impact est perpendiculaire à la surface que la charge subie par l'élément consi-

déré est la plus grande. La direction et l'angle d'incidence peuvent varier au cours d'une chute de grêle. Dans les cas extrêmes, il est possible que les façades et les toits soient atteints par des grêlons provenant de tous les côtés.

3 Forme des grêlons

La forme des grêlons est très variable. L'une des plus fréquentes est quasi sphérique, avec un rapport de 0.8 entre le diamètre minimal et le diamètre maximal. Mais des formes présentant des excroissances oblongues, arrondies ou anguleuses sont aussi possibles. Du fait de leur configuration, ces formes spéciales peuvent occasionner une charge particulière lorsqu'elles percutent l'enveloppe du bâtiment. Elles sont susceptibles de perforer des constructions à enveloppe élastique tendue, alors que ce ne serait pas le cas pour des chutes de grêlons ronds de même énergie.

Le critère déterminant pour assigner ces formes à une classe de grêlons est leur poids.



Grêlon à protubérances anguleuses tombé à Zurich lors de la tempête du 24.06.2002.

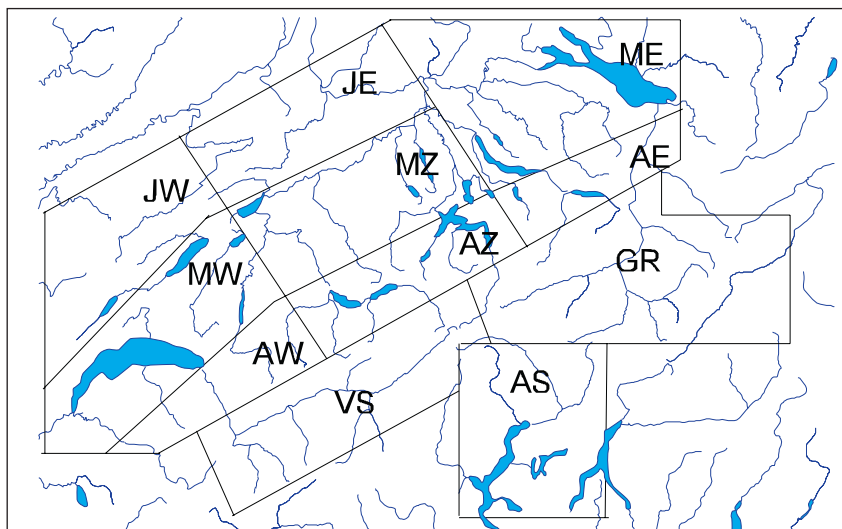
5 Taille des grêlons et période de retour

Le tableau suivant présente, en [mm], la taille minimale des grêlons pour différentes périodes de retour (PR) et zones climatiques de Suisse (Schuesser, 2006). Il en ressort qu'il faut s'attendre à la chute de grêlons de 30-40 mm au moins pour une période de retour de 100

ans. La taille attendue est limitée à 10-20 mm dans les seuls cantons du Valais et des Grisons. Les cartes d'intensité pertinentes figurent en annexe.

PR [ans]	Jura		Plateau			Alpes			Tessin	VS ¹	GR ¹
	Ouest	Est	Ouest	Centre	Est	Ouest	Centre	Est			
1	10	10	-	10	10	-	10	10	10	-	-
5	10	20	10	20	20	10	20	10	10	-	-
10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	-	10
20	20	30	20	30	30	20	20	20	20	10	10
30	20	30	20	30	30	20	30	20	20	10	10
50	20	30	20	30	30	20	30	20	20	10	10
100	30	40	30	40	40	30	40	30	30	20	10
250	40	40	40	40	40	40	40	30	40	20	20
300	40	40	40	40	40	40	40	40	40	20	20

¹VS, GR: seules des valeurs estimatives sont disponibles pour les cantons du Valais et des Grisons.



Les zones climatiques correspondant au tableau des intensités de la grêle: JW (ouest du Jura), JE (est du Jura), MW (ouest du Plateau),

MZ (centre du Plateau), ME (est du Plateau), AW (ouest des Alpes), AZ (centre des Alpes), AE (est des Alpes), AS (sud des Alpes, Tessin).

Épaisseur accumulée

L'épaisseur du dépôt de grêle, ainsi que l'accumulation et le glissement de grêle sur les toits (voir situations de danger du chapitre sur la neige) doivent être pris en compte. L'accumulation de grêle sur les toits entrave l'évacuation de l'eau, ce qui peut provoquer un engorgement des toits peu inclinés.



Une couche de plus de 0.2 m d'épaisseur a été observée en ville de Lucerne lors de la chute de grêle du 21.07.1998.

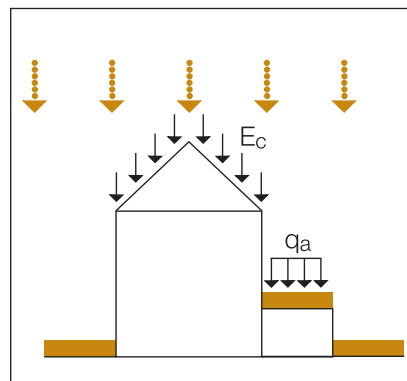
Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

Pour procéder au dimensionnement, il faut disposer de données concernant la **taille des grêlons**.

Celle-ci peut être tirée de la carte d'intensité de la grêle (figurant en annexe).

1 Situation de danger 1:
Grêle sans vent

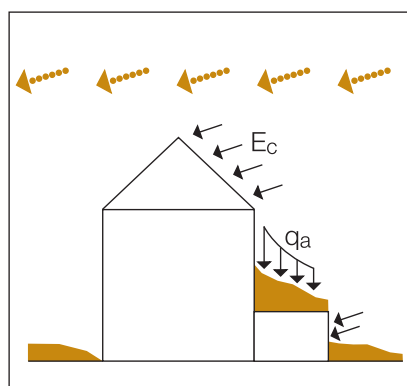
On admet que l'angle d'incidence γ dans le plan vertical est de $0^\circ - 20^\circ$. La vitesse d'un grêlon, équivalant à sa vitesse en chute libre, dépend du diamètre k du grêlon, du coefficient de résistance de l'air C_d et de la densité de la glace composant le grêlon ρ_h . Les surfaces des toitures sont principalement soumises à l'impact direct de la grêle E_c et à l'accumulation uniforme de grêlons q_a .



2

3 Situation de danger 2:
Grêle avec vent

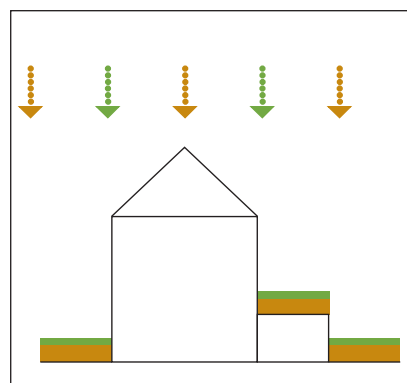
On admet que l'angle d'incidence γ dans le plan vertical est de $30^\circ - 50^\circ$. La vitesse d'un grêlon équivaut à une combinaison de vitesse en chute libre et de vitesse horizontale imputable au vent. Les surfaces des toitures et les façades sont soumises à l'impact direct de la grêle E_c et à l'accumulation inégale de grêlons q_a .



4

5 Situation de danger 3:
Grêle avec pluie

Dans ce cas de figure, l'action de la grêle est la même que dans la situation de danger 1. Mais la chute de grêle est accompagnée de pluie. Il faut donc s'attendre à des inondations. Elles surviennent à l'intérieur des bâtiments lorsque leur enveloppe est endommagée et à l'extérieur lorsque des collecteurs sont obstrués par des grêlons et des feuilles arrachées.



5

6

7

Énergie cinétique d'un grêlon

L'énergie d'un grêlon en chute libre se calcule en appliquant la formule de l'énergie cinétique: $E_c = 0.5 \cdot m \cdot v_f^2$ [J]

Vitesse de chute verticale d'un grêlon sans influence du vent

La vitesse de chute v_f du grêlon peut être estimée en appliquant la formule:

$$v_f = \left[\frac{4 \cdot \rho_h \cdot k \cdot g}{3 \cdot \rho_l \cdot C_d} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ où } k \text{ doit être introduit en [m] dans la formule ci-contre.}$$

La vitesse finale et l'énergie cinétique des grêlons peuvent être tirées du tableau ci-dessous.

Diamètre k [mm]	Masse m [kg]	Vitesse finale v		Énergie cinétique E [Joules]
		[m/s]	[km/h]	
10	0.0005	13.8	49.7	0.04
15	0.0015	16.9	60.8	0.22
20	0.0036	19.5	70.2	0.69
25	0.0071	21.8	78.5	1.69
30	0.0123	23.9	86.0	3.5
40	0.0292	27.5	99.0	11.1
50	0.0569	30.8	110.9	27.0
60	0.0984	33.7	121.3	56.0
70	0.1562	36.4	131.0	103.7
80	0.2332	39.0	140.4	176.9

Le tableau présente les masses, vitesses finales et énergies auxquelles il faut s'attendre pour des grêlons de différents diamètres, moyennant certaines hypothèses

concernant la densité de l'air et son coefficient de résistance. (Résistance à l'écoulement de l'air: $C_d = 0.50$, densité de l'air $\rho_l = 1.2$ kg/m³, densité du grêlon $\rho_h = 870$ kg/m³)

Vitesse horizontale d'un grêlon sous l'influence du vent

Des analyses de la vitesse de chute réelle ont révélé que la vitesse horizontale des grêlons est égale en moyenne à un tiers de la vitesse de chute verticale. Des vitesses horizontales plus élevées sont possibles, selon la force des

rafales de vent. Il ressort des explications figurant au chapitre sur les tempêtes que les débris sphériques emportés par le vent peuvent atteindre une vitesse égale au tiers de la vitesse du vent (rafales).

Charge due au dépôt de grêle

La charge due au dépôt de grêle sur les bâtiments vaut:

$$q_a = a \cdot \rho_h \cdot g \quad [\text{N/m}^2]$$

Énergie totale de la grêle

L'énergie totale de la grêle par surface unitaire, exprimée en [J/m²], qui cumule tous les grêlons tombant sur cette surface au cours d'un événement, est un autre pa-

ramètre très souvent utilisé pour décrire l'intensité de la grêle. Cette énergie totale peut être estimée au moyen de données obtenues par radar.

1 Grêle sans vent



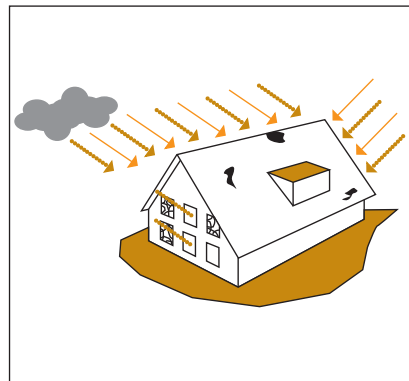
Lorsqu'une chute de grêle tombe sans vent, ce sont les toits qui sont



le plus affectés et les façades sont peu endommagées.

2

3 Grêle avec vent



Lorsqu'une chute de grêle est accompagnée de vent, l'impact peut être oblique à horizontal (angle d'incidence jusqu'à 90°) et la di-

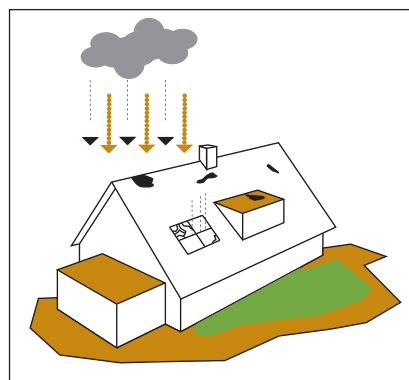


rection d'incidence peut varier. Il en résulte des dommages à la toiture et aux façades.

3

4

5 Grêle avec pluie



Lorsqu'une chute de grêle est accompagnée de pluie, des dommages indirects importants peuvent survenir après l'événement si l'enveloppe du bâtiment n'est pas



étanche. Les grêlons obstruant les collecteurs provoquent un engorgement des toitures et des places, éventuellement suivi d'une inondation du bâtiment.

6

7

Classes de dommages

Une chute de grêle est susceptible de porter atteinte aux matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment en endommageant leur sur-

face, leur forme ou leur structure. Ces trois classes de dommages peuvent se subdiviser comme suit:

Classe de dommages	Définition	Type	Manifestation
Dommages à la surface	Détérioration de la surface des matériaux sous la forme de rugosification, arrachement ou écaillage	O 1	Altération réversible
		O 2	Rugosification
		O 3	Arrachement
		O 4	Écaillage
Dommages à la forme	Dommages aux matériaux sous la forme de déformations	F 1	Bossellement
		F 2	Voilement
Dommages à la structure	Dommages aux matériaux sous la forme de fissures, ruptures, éclatements ou perforations	S 1	Fissuration
		S 2	Rupture
		S 3	Éclatement
		S 4	Perforation

Dommages à la surface



Altération réversible de la couleur

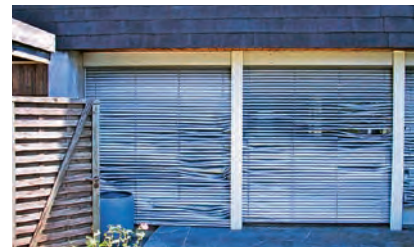


Arrachement de la peinture

Dommages à la forme



Bossellement



Voilement

Dommages à la structure



Rupture interne



Perforation

1 Constitution de la façade

La constitution de la façade doit tenir compte de l'action de la grêle dans la zone climatique concernée. On choisira notamment des matériaux et des combinaisons de matériaux invulnérables à la

grêle. Il faut aussi que les différents éléments puissent être réparés ou remplacés sans devoir remplacer toute la façade.

2 Évacuation des eaux

Lorsqu'on dimensionne l'évacuation des eaux de toitures, de balcons et de places, il faut tenir compte de la situation qui présente un danger d'obstruction suite à l'accumulation de grêlons ou de feuilles et de branches arrachées par la grêle. Le reflux d'eau dû à l'obstruction des exutoires peut occasionner d'importants dommages. Les orifices de grand diamè-

tre et pourvus d'un filtre surélevé sont favorables à l'écoulement de l'eau. Même sur les toits de petite superficie, il faut installer au moins deux naissances d'eaux pluviales. Des mesures constructives seront mises en œuvre pour prévenir toute obstruction des orifices d'évacuation des eaux, principalement lorsque le potentiel de dommages est important.

3



Exemple de dispositif d'évacuation des eaux de toiture engorgé par une importante accumulation de grêlons.



Exemple de dispositif d'évacuation des eaux de place engorgé par l'afflux de feuilles et de branches arrachées par la grêle.

4

5

Orientation du bâtiment

Lorsqu'on oriente le bâtiment, il faut tenir dûment compte de l'action principale de la grêle accompagnée de vent et de pluie. Les

façades, parties du bâtiment les plus exposées, feront l'objet d'un concept de maîtrise des agents météorologiques.

6

7

Choix des matériaux: Répertoire de la protec- tion contre la grêle de l'AEAI

Le choix de matériaux appropriés prévient les dommages à l'enveloppe du bâtiment causés par l'impact de la grêle. Le Répertoire de la protection contre la grêle de l'AEAI (Stucki, Egli, 2007) indique la résistance à la grêle des matériaux composant l'enveloppe du bâtiment, à la manière du Répertoire de la protection incendie. Ce nou-

veau répertoire est en cours d'élaboration. Les établissements cantonaux d'assurance des bâtiments renseignent sur son état d'avancement et indiquent dans quelle mesure il est obligatoire. La graduation suivante expose les classes de résistance à la grêle qu'il proposera vraisemblablement.

Classes de résistance à la grêle

Les classes de résistance à la grêle retenues sont délimitées par les mêmes tailles de grêlons que celles qui ont été appliquées pour l'analyse météo-climatologique relative à la grêle. Ces limites de classes ont fait leurs preuves pour exposer le danger de grêle régnant en Suisse selon différentes périodes de retour. En outre, elles conviennent parfai-

tement pour classer la résistance à la grêle des divers matériaux de construction. À titre d'exemple, un produit de construction correspondant à la classe de résistance à la grêle RG 3 résistera sans dommages à l'impact d'un grêlon de 30 mm de diamètre.

Résistance à la grêle		Diamètre [mm]	Masse [g]	Vitesse [m/s]	Limite de classe [J]
RG 1	Très faible	10 mm	0.5	13.8	0.04
RG 2	Faible	20 mm	3.6	19.5	0.7
RG 3	Moyenne	30 mm	12.3	23.9	3.5
RG 4	Élevée	40 mm	29.2	27.5	11.1
RG 5	Très élevée	50 mm	56.9	30.8	27.0

Fonctions des éléments de construction

Un élément de construction peut assurer une ou plusieurs fonctions. Les plus fréquentes sont l'étanchéité, l'aspect, l'assombrissement, la translucidité, la mécanique et l'alimentation en électricité. Elles sont

sensibles à des grêlons d'énergies différentes, si bien qu'un élément de construction peut être assigné à différentes classes de résistance à la grêle selon la fonction considérée.

Valeurs caractéristiques de la résistance à la grêle

Des valeurs caractéristiques de la résistance à la grêle offerte par certains produits typiquement utilisés pour l'enveloppe des bâtiments, déterminées en projetant artificiellement des grêlons en laboratoire

(Flüeler, Stucki 2007), figurent en annexe. Elles fournissent un tableau comparatif sommaire. On s'adressera aux fournisseurs pour obtenir les valeurs attestées de la résistance à la grêle de leurs produits.

1 Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la structure des tuiles et des bardeaux. On peut observer les dégâts suivants aux tuiles en terre cuite, pour des grêlons

de taille croissante: fissuration (microfissures et microfissures), éclatements sur la face supérieure, éclatements sur la face inférieure, perforation et rupture.

Essais en laboratoire



Macrofissure



Éclatement



Perforation

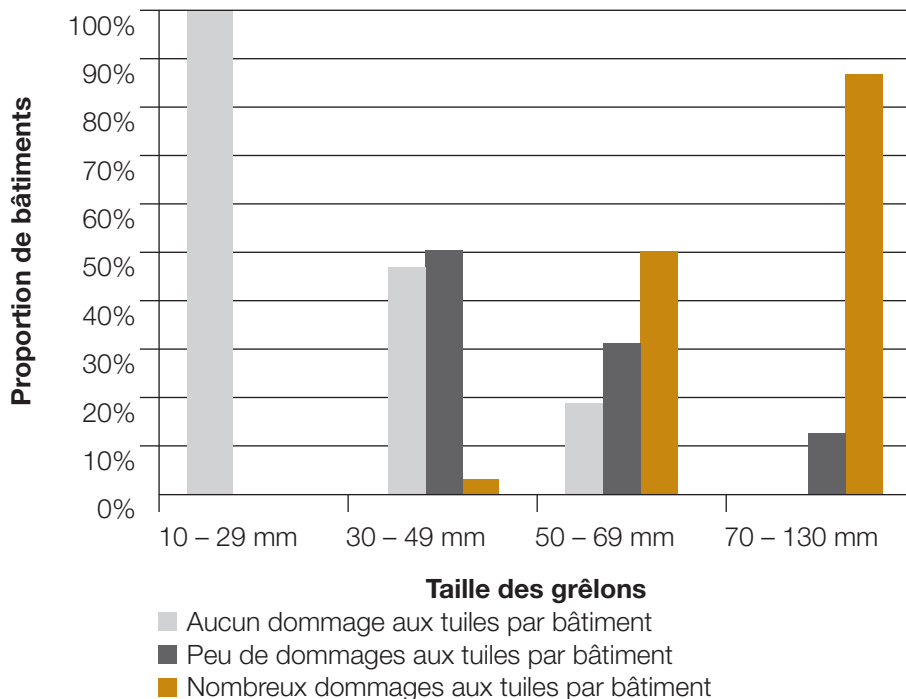


Rupture

Des essais exhaustifs réalisés par l'EMPA (2006) sur des produits neufs ont révélé que les tuiles en terre cuite atteignent une résistance à la grêle RG de 4. Ce résultat coïncide avec l'analyse détaillée

des dommages subis par les tuiles en terre cuite lors de la tempête de grêle qui a touché Sydney en 1999. Le graphique suivant expose ces résultats.

Tempête de grêle de Sydney



2

3

4

5

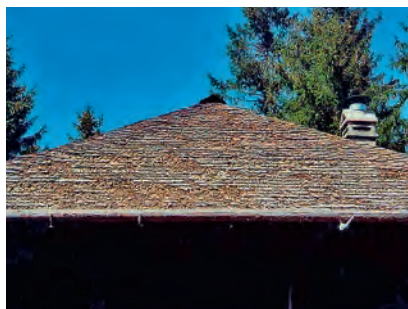
6

7

Dommmages dus à la grêle



Éclatements sur la face supérieure des tuiles.



Dommmages structurels aux bardeaux.

Réparation

Les tuiles et les bardeaux ayant subi un impact de grêle ne peuvent pas être réparés. Il faut principalement remplacer les éléments endommagés.

Protection des objets

La résistance à l'impact de la grêle croît avec l'épaisseur des tuiles et des bardeaux.

1 Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la structure des plaques en fibres-ciment. On peut observer les dégâts suivants pour des

grêlons de taille croissante: bossellement de la face antérieure, fissuration de la face postérieure, écaillage de la face postérieure, perforation.

Essais en laboratoire



Bosse



Fissure



Écaillage



Perforation (en entonnoir)

2

3

4

Dommages dus à la grêle



Perforation de plaques profilées en fibres-ciment.



Éclatement de plaques en fibres-ciment.

5

6



Perforation de plaques en fibres-ciment.



Éclatement de plaques en fibres-ciment.

7

Réparation

Les plaques en fibres-ciment ayant subi un impact de grêle ne peuvent pas être réparées. Il faut princi-

palement remplacer les éléments endommagés.

Protection des objets

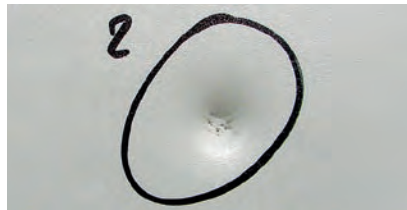
La résistance à l'impact de la grêle croît avec l'épaisseur des plaques en fibres-ciment.

Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la structure des lés d'étanchéité en matière synthétique apparents. On peut observer les

dégâts suivants pour des grêlons de taille croissante: perforation, fissuration.

Essais en laboratoire



Perforation



Fissure

Relâchement de la couverture

Les toits plats recouverts de gravier présentent souvent des raccords et des fermetures de bord où la couverture collée constituée de lés d'étanchéité en matière synthétique

s'est détachée et plus ou moins retirée du raccordement à la surface du toit, ou a été même arrachée sous la bande de dilatation.

Cause du relâchement:

Les lés d'étanchéité en matière synthétique deviennent cassants et leur coefficient de dilatation augmente à mesure qu'ils vieillissent. C'est pourquoi les vieux lés se contractent sensiblement lorsque la température est basse. Ils se

détachent alors de leurs fermetures de bord et des relâchements bien visibles apparaissent. Des plis, bourrelets ou autres cavités se forment aux angles des bâtiments et le long des superstructures et des lanterneaux.

Effets du relâchement:

En sus de l'impact purement visuel dû au relâchement des matériaux, la disparition du plastifiant provoque un vieillissement prématuré des lés d'étanchéité en matière synthétique. Ils deviennent cassants et leurs caractéristiques mécaniques se dégradent. Leurs résistance à l'allongement, résistance à la déchirure et souplesse

à basse température diminuent, si bien qu'ils résistent moins bien aux actions mécaniques, notamment aux impacts de la grêle. Il est alors temps de remplacer l'étanchéité. Des contrôles annuels des toits plats donnent des informations concernant cette échéance (cf. check-list au chapitre Entretien).

Dommages dus à la grêle



Fermetures apparentes en lés de matière synthétique perforées par la grêle.



Le relâchement dû au vieillissement est visible sur la photo du milieu.

1 Réparation

On peut réparer les petites fissures par rapiéçage, en collant des morceaux du même matériau, si le vieillissement le permet. Lorsque des relâchements sont assainis, le matériau manquant en bordure sous l'effet de la contraction due au froid doit être remplacé par de nouvelles bandes. Pour éviter de nouveaux relâchements, il est recommandé de fixer les bords par un moyen mécanique.



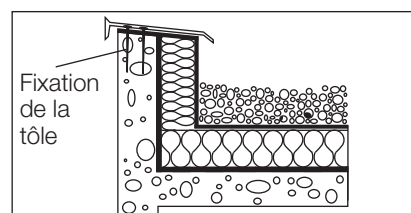
3 Protection des objets

Résistance des lés d'étanchéité à l'impact de la grêle: La résistance des lés d'étanchéité à l'impact de la grêle peut être déterminée au moyen d'un essai standardisé selon les normes SIA 280 (Lés d'étanchéité en matière synthétique),

SIA 281 (Lés d'étanchéité à base de bitume ou de bitume-poly-mère) et SN EN 13583 (Feuilles bitumineuses, plastiques et élastomériques d'étanchéité de toiture – Détermination de la résistance à l'impact de la grêle).

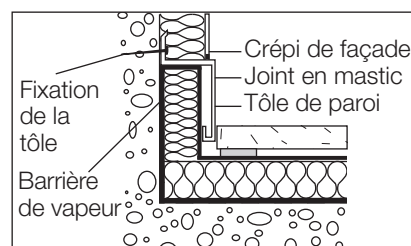
Raccords et fermetures de bord horizontaux: Les surfaces horizontales liées aux relevés, parapets, etc., doivent être protégées par une couverture en tôle. Pour les objets d'usage secondaire (p. ex. remises ou abris à un niveau sans isolation thermique), une couverture monocouche composée de matériaux d'épaisseur au moins égale à 1.5 mm est tolérée sur les toits équipés de lés d'étanchéité en matière plastique, pour autant qu'elle soit collée entièrement, sans

aucune cavité, sur un substrat plat et que les matériaux offrent une protection efficace contre l'humidité au sens de la norme SIA 280.



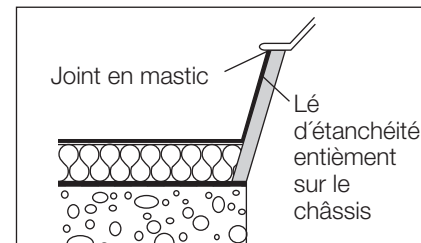
Raccords et fermetures de bord verticaux: Les surfaces d'étanchéité verticales liées aux toits praticables et aux toits pourvus d'un revêtement praticable doivent être équipées d'une protection mécanique. Sur les toits non praticables ou partiellement praticables, la protection mécanique (p. ex. couverture en tôle) est requise lorsque la hauteur du relevé est supérieure ou égale à 50 cm. Il faut alors empêcher le

décollement des surfaces verticales en appliquant des fixations de bordure appropriées.



Raccords et fermetures de bord obliques: Les raccords obliques dénués de protection mécanique (couche de protection ou couverture) doivent être protégés contre l'écaillage et la formation de cavités en prenant des mesures appropriées. Ils seront composés de matériaux d'épaisseur au moins égale

à 1.5 mm offrant une protection efficace contre l'humidité.



Types de matériaux

Les matériaux suivants sont proposés pour confectionner des produits translucides en matière plastique: verre acrylique (PMMA),

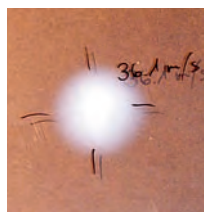
polycarbonate (PC), chlorure de polyvinyle (PVC) et polyester renforcé de fibres de verre (GF-UP).

Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la structure des produits translucides en matière plastique. On peut observer les dégâts suivants pour des grêlons de taille croissante: microétiements (seule-

ment pour le PMMA résistant aux chocs), délamination (séparation des couches), fissures en étoile, perforations. Les photos suivantes illustrent des dommages subis par différents matériaux et applications.

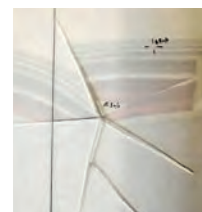
Essais en laboratoire



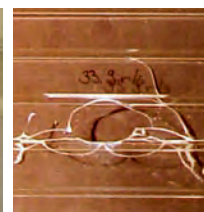
Microétiement



Délamination



Fissure en étoile



Perforation

Dommages dus à la grêle



1 **Évolution temporelle de la résistance à la grêle (vieillesissement)**

Le vieillissement des produits en matière plastique sous l'effet des intempéries en altère rapidement et considérablement la résistance à l'impact de la grêle. La mise en œuvre d'essais systématiques – comprenant une exposition à des

intempéries naturelles suivie d'un test d'impact avec une sphère de polyamide de 40 mm de diamètre – a permis d'établir l'évolution suivante de la résistance à la grêle (Löwe, 1998):

2

Matériau	À l'état de neuf, endommagé à partir de	Après 2.5 ans d'intempéries, endommagé à partir de	Après 5 ans d'intempéries, endommagé à partir de	Baisse de la vitesse d'endommagement après 5 ans d'intempéries	Baisse de l'énergie d'endommagement après 5 ans d'intempéries
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	3.5 m/s	3.5 m/s	2 m/s	43 %	67 %
Chlorure de polyvinyle (PVC)	16 m/s	8 m/s	3 m/s	81 %	96 %
Polycarbonate (PC)	65 m/s	18 m/s	13 m/s	80 %	96 %
Résine polyester insaturée renforcée de fibres de verre (GF-UP)	23 m/s	21 m/s	21 m/s	9 %	17 %

3

4 **Réparation**

Les plaques perforées peuvent être rapiécées en collant des morceaux du même matériau.

5 **Protection des objets**

Il est recommandé de vérifier volontairement la résistance des bandes vitrées à l'impact de la grêle, se-

lon la norme SN EN 1013-1. En principe, celle-ci augmente avec l'épaisseur des matériaux.

6

7

Types de matériaux

Les types de verre suivants sont fréquemment utilisés: en monocouche, verre flotté, verre armé et

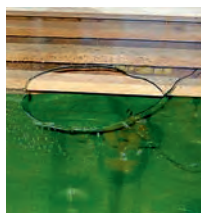
verre de sécurité trempé (VST); en multicouche, verre isolant et verre de sécurité feuilleté (VSF).

Types de dommages

Les dommages diffèrent selon la nature du verre. Les photos suivantes présentent les résultats

d'essais en laboratoire pratiqués sur différents types de verre:

Essais en laboratoire



Verre flotté



Verre armé (première rupture)



Verre armé (perforation)



VST

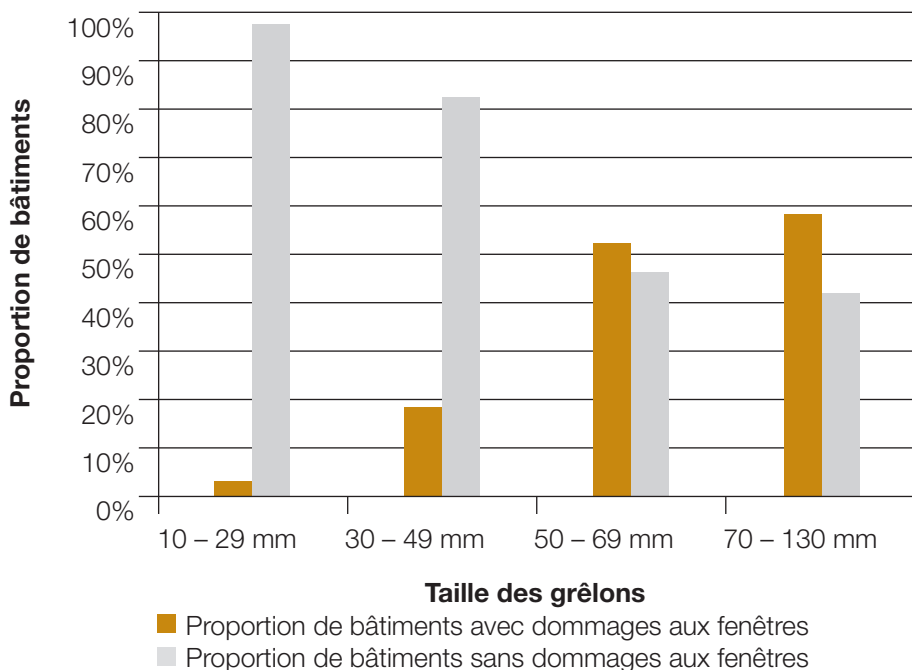


VSF fissuré de différentes manières

Des essais exhaustifs réalisés par l'EMPA (2006) sur des produits neufs ont révélé que les verres (sauf le verre armé) atteignent une résistance à la grêle RG de 5. Ce résultat coïncide avec l'analyse

détaillée des dommages subis par les vitres lors de la tempête de grêle qui a touché Sydney en 1999. Le graphique suivant expose ces résultats.

Tempête de grêle de Sydney



1 Réparation

Dommmages dus à la grêle



Les vitres touchées doivent être remplacées intégralement.



2

3 Protection des objets

3

Les expériences tirées de chutes de grêle survenues en Europe au cours des dernières décennies révèlent que l'application d'une vitre extérieure en verre de sécurité trempé (VST) procure une sécurité élevée contre le bris de vitres dû à l'impact de la grêle. Il s'agit d'un verre dont la surface est mise sous tension. La valeur admissible calculée de sa résistance à la rupture par flexion se monte à 50 N/mm². On ne dispose pas de mesures portant sur la distribution de la quantité de mouvement lors d'un impact de grêlon, ni sur la résistance du verre qui en résulte.

La détermination de l'épaisseur des vitres devrait suivre les approches suivantes:

- Charge: selon les normes SIA 261 et 261/1 pour le vent et la neige, en tenant compte d'une éventuelle position inclinée
- Tension à la rupture par flexion (vitres inclinées): 15 N/mm² pour le verre flotté
- Protection contre l'impact de la grêle: vitre extérieure en verre de sécurité trempé (VST) d'épaisseur

déterminée comme indiqué ci-dessus (pour le verre flotté) et vitre intérieure en verre de sécurité feuilleté (VSF).

Lors de l'établissement des plans, il faut en principe ménager des possibilités de remplacer les vitres brisées de manière relativement simple et peu onéreuse. Les vitres de dimensions excessives, qui ne peuvent plus passer par l'intérieur du bâtiment ni être montées de l'extérieur sans travaux de grande ampleur après la construction, devraient être évitées. La mise en œuvre de mesures d'aménagement doit permettre un remplacement aisé des vitres brisées.

Les avant-toits en verre doivent être en verre de sécurité feuilleté (VSF) lorsque les vitres s'appuient sur un cadre et en verre partiellement précontraint (VPP) lorsque les appuis sont ponctuels.

5

6

7

Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la peinture et à la structure des revêtements en bois. On peut observer les dégâts suivants pour des grêlons de taille

croissante: arrachement du grisé naturel ou de la peinture, bossellement, fissuration, perforation.

Essais en laboratoire



*Bossellement
Arrachement de la peinture*

Dommages dus à la grêle



Altération de la couleur de revêtements en bois non traité



et en bois peint



Dommages structurels par arrachement d'angles exposés

Réparation

Les façades en bois non traité sont moins vulnérables à la grêle que les surfaces peintes. En principe, l'altération de la couleur et les petites bosses affectant les façades en bois non traité ne sont pas des dommages. Une surface non traitée se régénère habituellement d'elle-même sous l'effet des intempéries, mais on peut lui redonner un aspect homogène en la bros-

sant. La peinture arrachée ou polie en surface doit être remplacée. Les petits dommages structurels (angles arrachés, bosses) peuvent être réparés en ponçant le bois, s'il présente une épaisseur suffisante. Quant aux éléments fissurés ou perforés, il faut prévoir de les remplacer.

Protection des objets

Les angles des revêtements disposés verticalement sont moins vulnérables que ceux des revêtements disposés horizontalement. En ce qui concerne les éléments horizontaux, les revêtements à clin sont

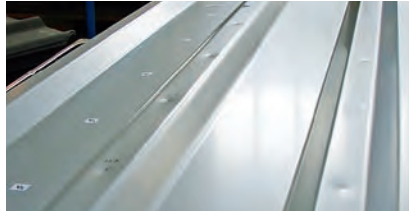
notamment insensibles aux dommages aux angles. Il est en outre recommandé d'installer des avant-toits, qui protègent les façades des impacts directs de la grêle.

1 Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la couleur et à la forme des tôles. On peut observer

les dommages suivants pour des grêlons de taille croissante: altération de la couleur, bossellement.

Essais en laboratoire



Bossellement

Domages dus à la grêle
Les deux photos suivantes présentent des altérations de la couleur dues à des impacts de grêle. Ce phénomène, nommé «farinage», se produit lorsque des pigments de la

peinture sont arrachés en surface. L'apparence uniforme de la tôle peut être restaurée en nettoyant sa surface.

3



La taille des bosses affectant la tôle dépend de la nature et de l'épaisseur



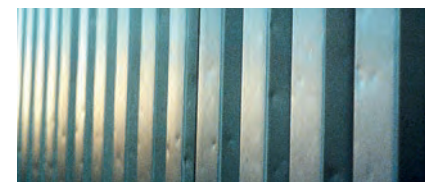
des matériaux.

4

5



Les photos suivantes présentent des dégâts subis par des tuiles en tôle. Elles révèlent des bosses, ain-



si que des voilements susceptibles de réduire l'étanchéité du toit.

6

Réparation

On peut remédier à l'altération de la couleur par farinage en nettoyant la surface des tôles. Il ne s'agit pas d'un dommage à proprement parler. L'application d'une méthode sous

vide permet d'éliminer les bosses. Mais la solution la moins onéreuse dans ce cas consiste à remplacer les éléments endommagés.

7

Protection des objets

La résistance des tôles à l'impact de la grêle augmente avec la résistance des matériaux les composant (module d'élasticité) et avec leur épaisseur. Les angles des revêtements disposés verticalement

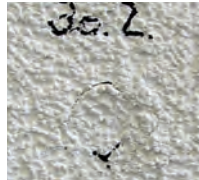
sont moins vulnérables que ceux des revêtements disposés horizontalement.

Les façades en tôle seront éventuellement protégées de surcroît par un avant-toit d'avancée suffisante.

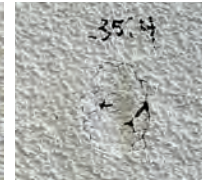
Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la couleur et à la structure du crépi. On peut observer les dommages suivants pour des grêlons de taille croissante:

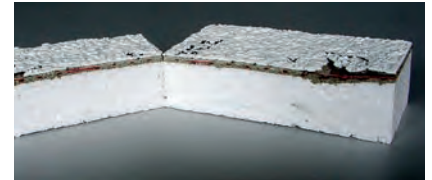
Essais en laboratoire



Bosse avec fissure



Bosse et arrachement du crépi



Coupe transversale

Dommages dus à la grêle

L'arrachement de la peinture, ici ponctuel à surfacique, ne porte



pas atteinte à l'imperméabilité de l'enveloppe du bâtiment.



L'arrachement du crépi cause ici un dommage structurel compro-

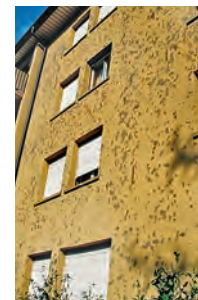


Aspect de façades gravement endommagées par des chutes

mettant l'imperméabilité de la façade.



de grêle.



Réparation

Si les dommages sont très étendus et que l'étanchéité n'est plus assurée, il faut remplacer le crépi. Si les dommages sont peu étendus et

que l'étanchéité n'est plus assurée et si seule la couleur est altérée, il faut principalement réparer le crépi existant.

Protection des objets

La résistance du crépi à l'impact de la grêle doit notamment être at-

testée par le fournisseur lorsqu'une isolation extérieure est appliquée.

1 Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la structure des plaques opaques en matière plastique. On peut observer les dom-

mages suivants pour des grêlons de taille croissante: bossellement, fissuration, perforation.

Essais en laboratoire



Bosse



Fissure



Perforation

2

Dommages dus à la grêle



3

4

Réparation

Les dommages peuvent être réparés par rapiéçage, en collant des morceaux du même matériau. Mais, pour des raisons esthétiques et économiques, cette méthode

n'est appliquée que pour réparer des dommages structuraux isolés dans une façade.

5

Protection des objets

La résistance à l'impact de la grêle augmente avec l'épaisseur des matériaux utilisés. La résistance à l'impact de la grêle et le comportement sur le long terme doivent être

attestés par les fournisseurs. Les angles des revêtements disposés verticalement sont moins vulnérables que ceux des revêtements disposés horizontalement.

6

7

Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la forme des fermetures. On peut observer les dommages suivants pour des grêlons

de taille croissante: bossellement, déformation, perforation (seulement des produits en matière plastique).

Essais en laboratoire



Stores à lamelles bosselés



Volets roulants bosselés



Lamelles voilées

Dommages dus à la grêle
L'aspect bosselé des stores à lamelles porte atteinte à l'esthétique de ces éléments de façade. Mais

leur fonctionnement ne doit pas en être entravé.



Lorsque des stores à lamelles sont déformés, leur fonctionnement

n'est plus assuré.



Réparation

Il faut principalement remplacer l'ensemble de la fermeture.

Protection des objets

La résistance à l'impact de la grêle augmente avec l'épaisseur des matériaux utilisés. Une mesure de protection temporaire consiste à relever les stores et les volets roulants avant la chute de grêle. Le

couplage de stores automatiques avec un dispositif d'alarme grêle est cours de développement. Une mesure de protection permanente consiste à placer les stores et les volets roulants derrière les vitres.



1 Types de dommages

L'impact de la grêle cause des dommages à la forme et à la structure des membranes. On peut observer les dommages suivants pour des grêlons de taille croissante:

bossellement, perforation. Les membranes sont particulièrement vulnérables aux grêlons anguleux. Ils laissent des marques et perforent les matériaux.



2

3

Réparation

Les membranes perforées peuvent être rapiécées en collant des mor-

ceaux du même matériau, sinon elles doivent être remplacées.

Protection des objets

La construction porteuse doit être telle que la couche externe offre une résistance suffisante à la grêle ou qu'une membrane extérieure supplémentaire serve de couche d'usure vis-à-vis des impacts de

grêle. Une autre solution consiste à protéger au moyen de grillages pare-grêle les parties de toitures les plus menacées revêtant la forme de membranes.

4

Capteurs solaires

Les capteurs solaires doivent satisfaire aux exigences minimales concernant la résistance à l'impact

de la grêle stipulées par la norme EN 12975-2.

5

6

7

Toit en saillie / avant-toit

Les toits en saillie offrent une excellente protection contre les dom-



mages aux façades dus à la grêle tombant sans vent.

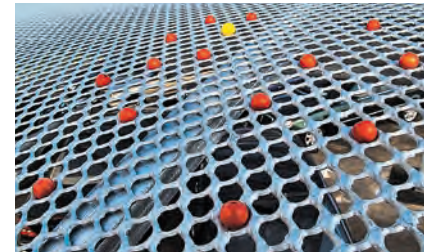
Grillage pare-grêle

Les grillages pare-grêle installés au-dessus des matériaux vulnéra-



Grillages pare-grêle au-dessus de coupoles.

bles à la grêle les protègent efficacement et durablement.



Grillage pare-grêle au-dessus d'une place d'entreposage de voitures neuves (diamètre des trous: 10 mm).

Filet de protection

L'installation de filets de protection au-dessus des serres pendant la saison de la grêle offre une protection temporaire à bon marché.

1 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.

2

3

4

5

		Mesures									
		Conception			Renforcement				Écran		
Combinaison de mesures	Situation de danger	Constitution de la façade	Évacuation des eaux	Orientation du bâtiment	Matériaux de toiture	Matériaux de façades	Matériaux des ouvertures dans le toit	Matériaux des ouvertures dans les façades	Toit en saillie	Filet / grillage	Élément d’usure
		Bâtiment existant									
A	1/2/3									●	
B	1/2/3										●
C	1/2/3				●	●	●	●			
Nouvelle construction											
D	1/3		●		●		●				
E	2/3	●	●	●	●	●	●	●			
F	2/3		●		●		●		●		

Combinaison de mesures A «Protection par un filet ou par un grillage»

Les éléments de l’enveloppe du bâtiment vulnérables à la grêle sont protégés contre les impacts directs par un filet ou par un grillage.

6

Combinaison de mesures B «Protection par des éléments d’usure»

Les éléments de l’enveloppe du bâtiment vulnérables à la grêle sont protégés par des éléments d’usure constitués du même matériau, qui jouent le rôle d’une couche de protection supplémentaire. On applique notamment cette méthode aux membranes, en appliquant une membrane extérieure sur la membrane intérieure pour la protéger contre les impacts directs de la grêle.

7

Combinaison de mesures C «Transformation avec des matériaux résistants à la grêle»

Lors d’une transformation, on utilise uniquement des matériaux résistants à la grêle pour le toit, les façades et les ouvertures.

Combinaison de mesures D «Nouvelle construction avec des matériaux de toiture résistants à la grêle»

Pour une nouvelle construction située sur un emplacement abrité du vent, on utilise uniquement des matériaux de toiture résistants à la grêle.

Combinaison de mesures E «Nouvelle construction avec des matériaux de toiture et de façades résistants à la grêle»

L'orientation du bâtiment, la constitution de la façade et les installations d'évacuation des eaux tiennent compte de l'action de la grêle combinée avec du vent et de la pluie. On utilise uniquement des matériaux de toiture et de façades résistants à la grêle.

Combinaison de mesures F «Nouvelle construction avec un toit en saillie»

L'impact direct de grêlons contre la façade est empêché par des toits faisant une saillie relativement marquée. On utilise des matériaux résistants à la grêle pour la toiture et pour ses ouvertures.

1

2

3

4

5

6

7

1 Exemple d'analyse coût-utilité

L'exemple suivant illustre l'importance pour les coupoles de la résistance à la grêle, en tenant compte des dégâts qu'elle occasionne. La méthode appliquée est exposée en détail à

l'annexe E des présentes recommandations.

2 Coût

Une entreprise située au centre du Plateau évalue différents types de coupoles pour équiper un nouvel atelier. Elle a le choix entre deux types:

ce type devraient donc être remplacées après 10 ans pour offrir une résistance à la grêle suffisante, tandis que le produit en verre sur cadre métallique a une longévité de 30 ans.

Coupole en matière synthétique de 80 x 80 cm, en verre acrylique (PMMA) sur un anneau en polyester stratifié, de résistance à la grêle RG 2: coût 1'000 CHF

Si l'horizon considéré est de 20 ans, la coupole en matière synthétique doit être remplacée à deux reprises. La coupole en verre coûte donc 6'000 CHF - 2'000 CHF = 4'000 CHF de plus. Compte tenu d'un taux d'intérêt de 3 %, le surcoût final K vaut (en simplifiant) 7'224 CHF.

Coupole en verre de 80 x 80 cm, en VST / VSF sur un cadre métallique, de résistance à la grêle RG 5: coût 6'000 CHF

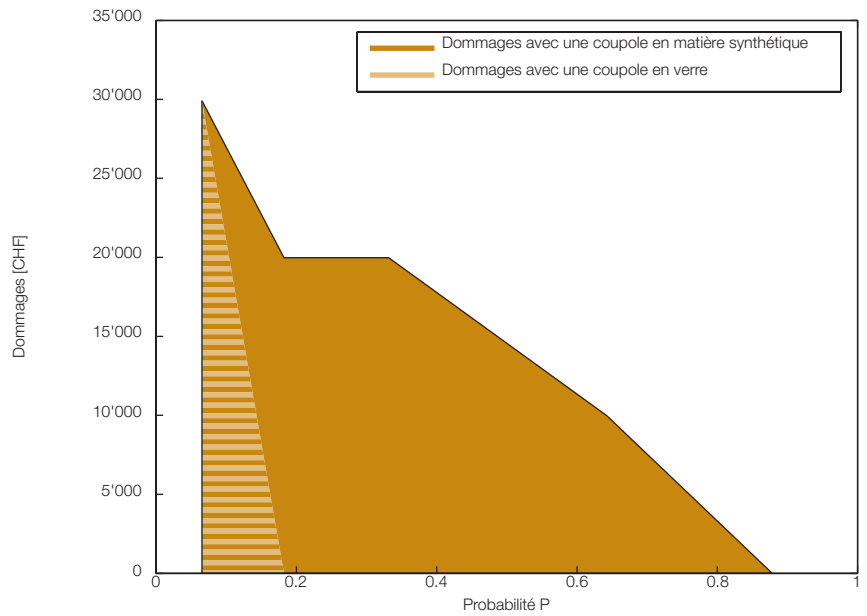
La rubrique «Produits translucides en matière plastique» de ce chapitre indique que le verre acrylique perd environ 40 % de sa résistance à la grêle en 5 ans d'exposition aux intempéries. Les coupoles de

5 Utilité

L'utilité tient compte des dégâts directs évités (coupole cassée) et des dommages indirects dus aux dégâts d'eau. Les dommages à la coupole en matière synthétique apparaissent à partir de la chute de grêle qui se produit en moyenne une fois tous les 10 ans, tandis que la coupole en verre subit sans dommage l'événement centennal. L'utilité est calculée pour un horizon de 20 ans. La probabilité qu'un événement de période de retour égale à 10 ans survienne au cours

d'un intervalle de 20 ans est de 87.8 % ($P = 0.878$), tandis qu'elle est de 18.2 % ($P = 0.182$) pour un événement centennal.

D'après la figure suivante, les dommages attendus se montent à 11'765 CHF pour la coupole en matière synthétique et à 1'762 CHF pour celle en verre (méthode décrite en annexe). L'utilité de cette dernière, égale à la différence entre les montants des dommages attendus, vaut 10'003 CHF.



Comparaison coût-utilité

Le surcoût occasionné par la coupole en verre, de 7'224 CHF, est mis en regard de son utilité, égale à 10'003 CHF. Le rapport coût / utilité vaut donc $7'224 \text{ CHF} / 10'003$

$\text{CHF} = 0.72$. L'application du produit le plus cher en verre se justifie donc en termes économiques.