

Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance
Bundesgasse 20
CH-3001 **Berne**

Rapport d'étude n°5214014552

Mandat : **Étude bibliographique exhaustive sur la diminution de la capacité de résistance à la grêle des produits en matière synthétique – résumé, comparaison et commentaire de la littérature et des expériences**

Objet de l'étude : Enveloppes de bâtiment / façades / systèmes composites d'isolation thermique (ETICS, *external thermal insulation composite system*)

Référence client : N° de commande :

Votre mandat du : 13.12.2016

Réalisation de l'étude : janvier – avril 2017

Nombre de pages : 62

Annexes : aucune

Envoi : 3 exemplaires au mandant

Résumé

L'influence du vieillissement sur la résistance à la grêle des éléments de l'enveloppe du bâtiment en général et des systèmes composites d'isolation thermique en particulier est un sujet de discussion de plus en plus récurrent dans les milieux spécialisés pour l'analyse des impacts de grêle et pour la prévention contre les dommages dus à la grêle. Cette corrélation n'a fait l'objet que d'études partielles jusqu'à présent. Il n'a pu être trouvé aucune publication scientifique traitant de l'influence du vieillissement sur la résistance à la grêle des systèmes composites d'isolation thermique. Les connaissances publiées et les expériences sur le sujet ont donc été recueillies dans le cadre d'une étude bibliographique, étayée par des enquêtes menées auprès d'experts. Les impacts de grêle représentent une charge dynamique élevée. Tandis que leurs effets sur les produits de construction à l'état neuf font l'objet d'études approfondies, nous ne savons que relativement peu de choses sur le comportement dans la durée, respectivement sur le vieillissement des crépis et des systèmes composites d'isolation thermique. Nos quelques connaissances s'accompagnent par ailleurs d'une grande incertitude.

Dübendorf, le 3 juillet 2017

Empa (Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt)
Service Mechanical Systems Engineering

Chef de projet

Responsable de service

S. Michel

G. Terrasi

TABLE DES MATIÈRES

1	Mandat	5
1.1	Motivation	5
1.2	Problématique.....	6
1.3	Objectif.....	6
1.4	Procédure.....	6
2	Impact de grêle et dommages aux bâtiments	8
2.1	La grêle.....	8
2.2	Dommages aux bâtiments dus à la grêle	10
3	Recherche bibliographique	13
3.1	Recherche générale.....	13
3.1.1	Propriétés des systèmes composites d'isolation thermique et des façades crépies	13
3.1.2	Normes, directives et prescriptions d'essai techniques.....	16
3.1.3	Publications générales et description de produits commerciaux	19
3.2	Recherche dans la littérature scientifique.....	21
3.2.1	Critères de recherche et mots-clés pour la recherche bibliographique.....	21
3.2.2	Recherche bibliographique sur le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment	22
3.2.3	Recherche bibliographique sur les mécanismes de vieillissement des plastiques et des systèmes composites.....	26
3.2.4	Recherche bibliographique sur le comportement à l'impact des plastiques et des systèmes composites.....	33
3.2.5	Recherche bibliographique sur la résistance à la grêle de l'enveloppe du bâtiment	35
4	Expériences sur le vieillissement et la résistance à la grêle des éléments de l'enveloppe du bâtiment	36
4.1	Expériences antérieures conduites par l'Empa.....	36
4.2	Expériences menées par le groupe d'experts et le bureau de l'AEAI.....	37
4.3	Expériences menées par les établissements cantonaux d'assurance	39
4.4	Expériences menées par des experts en enveloppe du bâtiment	39
4.5	Expériences menées par les laboratoires d'essai à la grêle	40
4.5.1	Expériences du IBS Linz	40
4.5.2	Expériences menées par FPC	40
4.6	Expériences menées par l'Université de Berne	41
4.7	Feed-back d'autres laboratoires d'essai et d'entreprises	42
4.8	Nos observations de dommages aux façades.....	42
5	Évaluation de l'état des connaissances et des expériences	48
5.1	État de l'art concernant le vieillissement et la résistance à la grêle	48
5.2	Principales conclusions de la recherche bibliographique.....	49
5.3	Questions en suspens	50
5.4	Suite de l'étude	52
6	Conclusions	53
	Références bibliographiques	55

ABRÉVIATIONS

- ABS : Copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène
- ASA : Copolymère acrylonitrile-styrène-acrylate
- ANSI : American National Standard Institution
- ASTM : American Standards for Testing of Materials
- DIN : Norme industrielle allemande, cf. www.din.de
- EIFS : External Insulation Finishing Systems ; dénomination nord-américaine pour les ETICS, voir https://en.wikipedia.org/wiki/Exterior_insulation_finishing_system
- EN : Norme européenne, voir http://europa.eu/youreurope/business/product/standardisation-in-europe/index_fr.htm
- EOTA : European Organisation for Technical Assessment, voir www.eota.eu
- EPS : polystyrène expansé
- ESLC : Estimated Service Life of a Component selon Moser [3]
- ETAG : European Technical Assessment Guideline, voir www.eota.eu/en-GB/content/etags-used-as-ead/26/
- ETICS : External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) ; dénomination scientifique
- EWIS : External Wall Insulation System, dénomination européenne en anglais pour ETICS, voir https://en.wikipedia.org/wiki/External_wall_insulation
- FPC : Flüeler Polymer Consulting GmbH, s. www.fluelerpolymer.ch
- IBS : Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH, Linz A, voir www.ibs-austria.at
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration des USA
- PC : Polycarbonate
- PMMA : Polyméthylméthacrylate de méthyle
- PU : Polyuréthane
- PVC : Chlorure de polyvinyle
- SIA : Société suisse des ingénieurs et des architectes, voir www.sia.ch
- SMGV : Association suisse des entrepreneurs plâtriers-peintres, voir www.smgv.ch
- SRF : Schweizer Radio und Fernsehen, s. www.srf.ch
- USA : United States of America
- ITEC : Isolations thermiques extérieures crépies, dénomination suisse (l'abréviation anglaise scientifique « ETICS » sera utilisée dans ce rapport, car elle est la plus courante)
- AEAI : Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (de Suisse), voir www.vkf.ch
- ETICS : External Thermal Insulation Composite Systems, systèmes composites d'isolation thermique
- XPS : polystyrène extrudé

Liste des symboles

- RG* : Résistance à la grêle

1 MANDAT

1.1 Motivation

Les directives de l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie prévoient que la résistance des produits de construction contre l'impact de grêle, appelée indice de résistance à la grêle, est déterminée par principe pour un état neuf du produit, voir note « Cette classification est valable uniquement pour des produits neufs. La résistance à la grêle peut diminuer en quelques années, suite aux intempéries naturelles » (www.repertoiregrele.ch/constructions-resistantes/trouver-des-elements-de-construction). La fonction d'un produit ne devrait toutefois pas être remplie seulement en début de vie, mais également pendant toute la durée d'utilisation prévue. Ce principe s'applique aussi à la résistance à la grêle. Une durée de vie moyenne des façades crépies est indiquée dans [1] et atteint 30 à 40 ans. Selon une étude réalisée en Angleterre, la durée de vie typique des murs extérieurs peut atteindre 20 à 60 ans [2]. Moser a présenté un modèle statistique en vue d'établir une prévision de la durée de vie des parties de bâtiment [3]. Son modèle part d'une réduction graduelle de la sécurité, de la fonctionnalité et de l'aspect, voir figure 1. La durée de vie désignée comme Estimated Service Life of a Component (ESLC) dépend selon lui des paramètres suivants : qualité du produit de construction, conception (design), exécution, conditions ambiantes, charge de service et étendue de l'entretien.

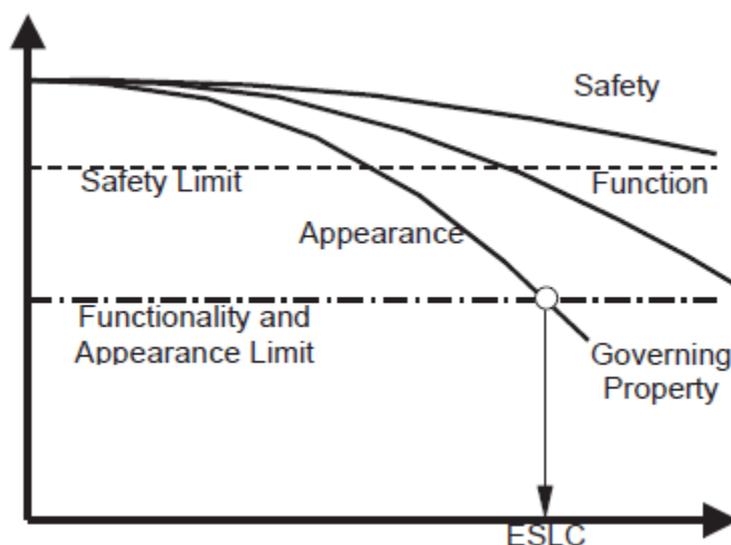


Figure 1 : Représentation schématique de l'altération avec l'âge des propriétés de l'enveloppe du bâtiment, selon [3].

L'évolution économique et technologique a fait apparaître sur le marché ces dernières années une multitude de matériaux de construction synthétiques. Les plastiques ne se sont pas imposés uniquement dans les stores, les volets, les couvertures de piscine et les impostes. Ils sont aussi de plus en plus utilisés dans les crépis et les peintures de façades, avant tout comme systèmes de collage et matières liantes. Les murs extérieurs présentent aujourd'hui des structures en plusieurs couches, renforcées en règle générale d'un treillis en fibres de verre. En raison de leur mauvaise compatibilité avec le ciment, les fibres polymères ne sont utilisées que dans des cas spéciaux [4]. En cas d'isolation extérieure, une couche de cette structure, la couche d'isolation thermique, est nettement plus épaisse et plus légère que les autres couches. Ce mode de construction en couches représente un système complexe de matériaux composites en comparaison avec un enduit de mortier ou de ciment sur des murs en briques ou en pierres naturelles.

Pour les produits purement synthétiques tels que les matériaux en polycarbonate, en polyméthacrylate de méthyle ou en polyoléfine, le degré de compréhension des effets du vieillissement et leur prévention ou tout au moins leur ralentissement par l'ajout de divers additifs ou revêtements a progressé depuis les années 80 pour atteindre un tel niveau qu'il est aujourd'hui possible de considérer que l'on connaît l'impact sur la fonctionnalité des produits tout au long de leur durée de vie. Les connaissances ont permis d'améliorer nettement ces produits, y compris leur résistance à la grêle [5, 6].

Les effets du vieillissement sur les façades peuvent être reproduits et étudiés scientifiquement en laboratoire au cours d'essais de grande envergure sur des pans entiers de façades soumises à des intempéries artificielles. Les observations et les mesures des propriétés se sont concentrées jusqu'à présent presque exclusivement sur les fonctions premières telles que l'intégrité de la structure, l'isolation thermique et la résistance mécanique, voir p.ex. [7]. Les effets de certains phénomènes tels que le vieillissement sur la résistance à la grêle n'ont encore guère été étudiés.

1.2 Problématique

Le vieillissement des composants modernes de l'enveloppe du bâtiment, notamment des systèmes composites d'isolation thermique (ETICS) et son influence sur la résistance à la grêle représentent des questions ouvertes qui ont fait l'objet de discussions toujours plus nombreuses au cours des dernières années parmi les spécialistes de la surveillance de la grêle et des dommages aux bâtiments. Dans la droite ligne de l'optimisation des efforts de prévention, il convient de poursuivre le développement du contrôle de l'impact de la grêle selon les directives AEAI. Sur mandat de la Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance, le travail présenté ici doit en tout premier lieu tendre à exploiter d'une part les connaissances actuelles dans la littérature et d'autre part les expériences pratiques réalisées, en vue de clarifier ce sujet complexe sous forme de bilan.

1.3 Objectif

Exploiter les connaissances actuelles et les expériences dans le cadre d'une étude bibliographique, en s'appuyant également sur des entretiens avec des experts à propos du vieillissement de l'enveloppe du bâtiment, particulièrement le crépi et les systèmes composites d'isolation thermique, et au sujet aussi de ses effets sur la résistance à la grêle.

1.4 Procédure

La mandante a retenu comme groupe d'accompagnement la commission du répertoire de protection éléments naturels (CRP). Cette commission est dirigée et coordonnée par le responsable du département Prévention des dommages éléments naturels, M. Jordi. Lors de la séance de la CRP du 19 août 2016, M. Jordi a présenté l'objectif du projet et S. Michel de l'Empa a soumis une proposition quant au moyen que nous souhaitons mettre en œuvre pour atteindre cet objectif. Ces points ont ensuite été discutés au sein du groupe. Ce fut l'occasion pour M. Jordi de préciser que cette étude bibliographique devait être menée en parallèle des études expérimentales sur les systèmes composites d'isolation thermique, actuellement en cours à l'institut IBS de Linz, mais aussi en échangeant mutuellement des informations. M. Jordi a insisté auprès de l'Empa déjà en amont (réunions du 1er mars 2016 et du 8 avril 2016) sur l'attention particulière qui devait être apportée aux systèmes de crépi, notamment aux systèmes composites d'isolation thermique (voir e-mail du 9 juin 2016 adressé aux représentants de Empa Lab 304). Cette concentration de la réflexion a été confirmée par la CRP. Par conséquent, l'étude bibliographique se concentre sur le vieillissement des systèmes de crépi, en particulier des systèmes composites d'isolation thermique et sur les effets de ce vieillissement sur la résistance à la grêle.

Les connaissances publiées et les expériences des experts ont été recueillies, comparées et évaluées en plusieurs étapes :

- Recherche dans la littérature scientifique sur le sujet, voir chapitre 3.

- Entretiens avec des experts spécialisés dans le contrôle de la résistance à la grêle. Ces entretiens portaient sur les expériences pratiques dans le domaine du vieillissement/intempéries des produits de construction de l'enveloppe du bâtiment et des effets sur la résistance à la grêle, voir chapitres 4.1 et 4.4.
- Entretiens avec des experts spécialisés dans l'enveloppe du bâtiment sur la question du vieillissement des façades et des isolations, voir chapitres 4.2 et 4.3.
- Résumé et évaluation des conclusions (ce rapport).

Une approche physique analytique reposant sur les présents travaux ou accompagnée éventuellement de simulations numériques devrait suivre dans une prochaine phase (p.ex. dans le cadre d'un projet ultérieur). Ce traitement passera tout d'abord par la description de l'événement de grêle en tant que charge dynamique (impact) pour les enveloppes du bâtiment avec détermination des propriétés des matériaux et du système impliqués au niveau de l'enveloppe du bâtiment. Il sera ensuite question de décrire les processus de vieillissement possibles, en incluant leur concomitance et l'estimation des effets sur la résistance à la grêle.

Des méthodes d'essai sur de petites éprouvettes devraient être mises au point à partir de ces conclusions et comparées avec des essais de grêle sur des ETICS vieillissés naturellement et artificiellement.

2 IMPACT DE GRÊLE ET DOMMAGES AUX BÂTIMENTS

2.1 La grêle

La définition de la « grêle » selon Wikipedia en langue allemande (<https://de.wikipedia.org/wiki/Hagel>) est un type de précipitation, constituée de billes disjointes de glace, survenant le plus souvent pendant les saisons chaudes et dans les moyennes latitudes. Pour permettre une distinction, on ne parle de grêle et de grêlon qu'à partir d'un diamètre de 0,5 cm. Les grêlons se forment dans les couches inférieures des nuages d'orage, au sein d'une cellule orageuse, à partir d'eau sursaturée qui se transforme en glace autour de noyaux glacigènes. Sur un site Internet de la SRF, la grêle est décrite selon le schéma suivant [8] :

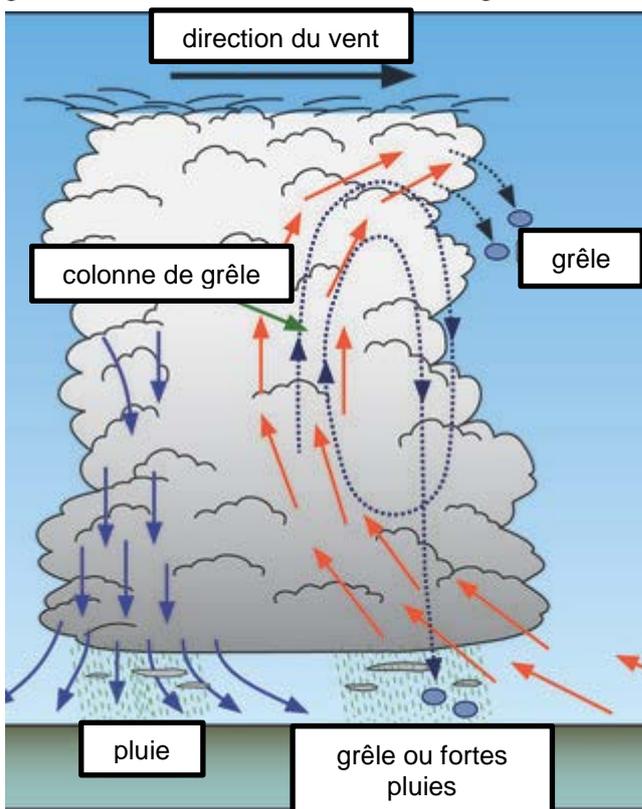


Figure 2 : Nuage d'orage avec formation de grêle (www.srf.ch, Karl Heinz Hack)



Figure 3 : Grêlon de 6 cm de diamètre formé par la fusion de plusieurs petits grêlons (Wikipedia, source : NOAA)



Figure 4 : Structure en couche bien visible au centre d'un gros grêlon (Wikipedia)

Un nuage d'orage peut s'étendre jusqu'à plus de 10 km en hauteur dans le ciel. À cette altitude, l'air est très froid (en atmosphère normale $< -50^{\circ}\text{C}$). Même si la limite du zéro degré se situe au-delà de 4000 mètres en été, la température de l'air situé plus haut affiche des températures négatives. Une grande partie du nuage d'orage se trouve donc dans des températures négatives. Les orages s'accompagnent de forts courants ascendants et descendants. Les gouttelettes d'eau peuvent être emportées à grande hauteur par ces courants ascendants avant d'être surfondues. L'eau ne gèle pas forcément tout de suite en dessous de 0°C . En effet, pour geler, l'eau a besoin de noyaux de condensation. Ils représentent la base sur laquelle les gouttes d'eau gèlent. Les petites particules de glace conviennent parfaitement comme noyaux de condensation. Plus un fragment de glace est projeté longtemps dans un nuage d'orage, plus il grossit : c'est la formation d'un grêlon, voir figure 3.

La grêle n'est toutefois pas présente dans tout le nuage d'orage. Elle se forme en priorité dans la « colonne de grêle », voir figure 2 : il s'agit d'une zone avec de très forts vents ascendants et descendants. Un grêlon fait souvent plusieurs passages dans les zones de courant ascendant et descendant. Il grossit progressivement avant de tomber sur la terre. Les différentes couches de croissance sont nettement visibles en coupe et ressemblent aux cernes d'un tronc d'arbre, voir figure 4.

Toutes les régions de Suisse ne sont pas égales face au risque de grêle. Les épisodes de grêle se produisent uniquement lors d'orages violents. Ces intempéries se forment pour une part le long du Jura, majoritairement dans le nord-ouest de la Suisse, voir figure 5. Le versant nord des Alpes et notamment la zone s'étendant de l'Oberland bernois jusqu'au Napf et la Suisse centrale sont également connus pour leurs orages violents. Au sud des Alpes, les averses de grêle touchent très souvent le centre et le sud du Tessin.

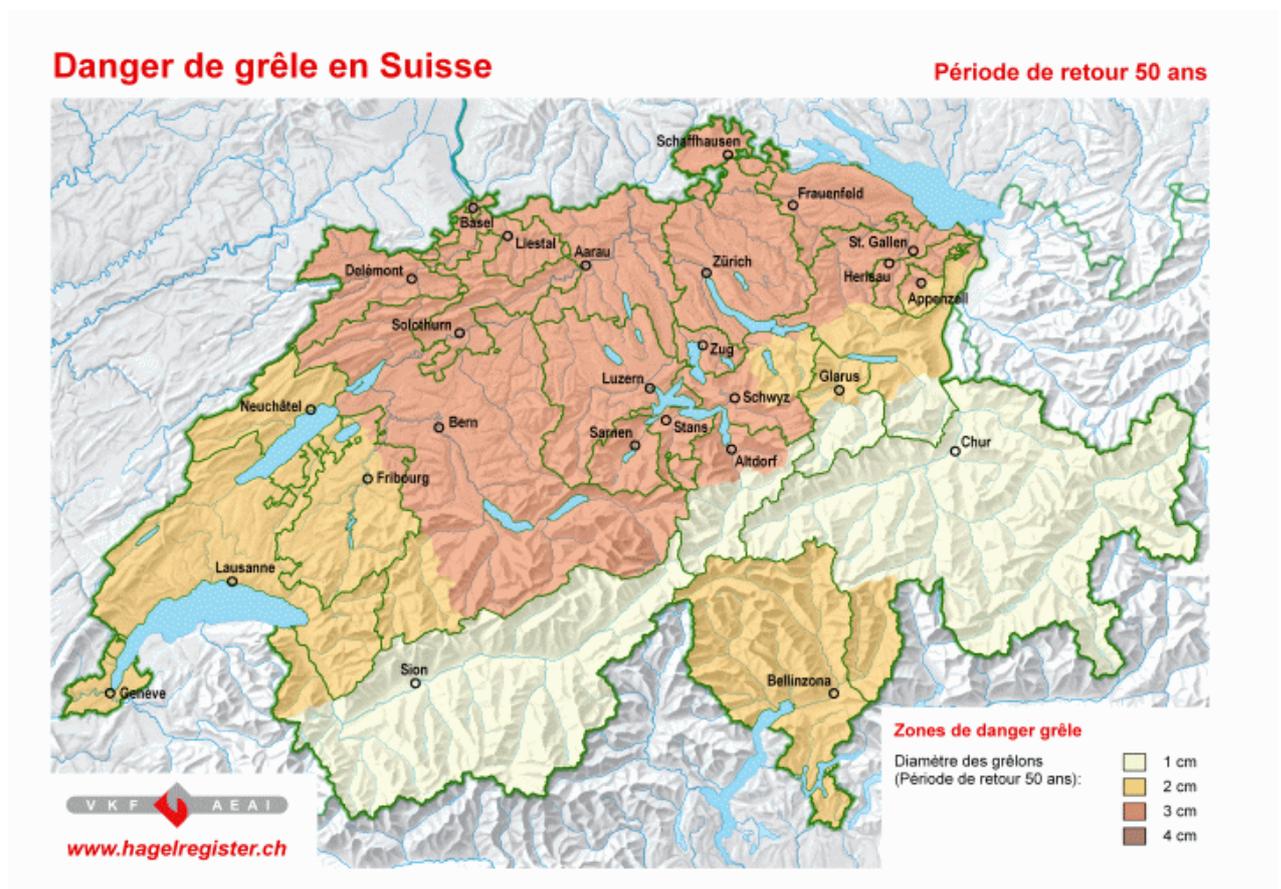


Figure 5 : Danger de grêle en Suisse
(extrait de www.protection-dangers-naturels.ch/dangers-naturels/grele)

MétéoSuisse a créé un site Internet permettant de visualiser les statistiques sur les précipitations extrêmes selon la zone géographique en Suisse [9].

À la fin des années 50 et au début des années 60, on a encore été tenté de résoudre le problème en luttant directement contre la grêle. Des tirs de canon anti-grêle étaient censés provoquer prématurément des chutes de pluie depuis un nuage d'orage [10]. Mais cette approche fut vite abandonnée en raison de son inefficacité.

Une autre approche consiste à développer des produits résistants à la grêle pour l'enveloppe du bâtiment. L'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) a contribué à la mise en place nécessaire de l'essai standardisé des produits. Les méthodes d'essai selon l'AEAI permettent une classification objective de divers produits de construction, répartis en 5 classes de résistance à la grêle. Les produits de construction correspondants sont ensuite enregistrés dans le répertoire grêle de l'AEAI avec la classe de résistance à la grêle constatée [11].

Les dernières évolutions consistent à utiliser un système de détection précoce pour mettre à l'abri, notamment en les relevant, les éléments sensibles de l'enveloppe du bâtiment tels que les stores bannes et les stores à lamelles avant un orage présentant un risque de grêle. Les liaisons électroniques actuelles permettent de commander automatiquement les installations du bâtiment via des réseaux de communication modernes, initialisés par les données météo mises à jour depuis une centrale météorologique, voir alerte grêle sous [12].

2.2 Dommages aux bâtiments dus à la grêle

Dans son communiqué sur les risques, une société d'assurance américaine montre la carte de répartition de la grêle aux États-Unis [13]. D'après une estimation, les coûts des dommages dus à la grêle pour les États-Unis se comptent en milliards [14].

En Europe aussi, notamment en Suisse, les dommages économiques dus à la grêle sont connus et documentés. À lui seul, l'épisode de grêle des 12 et 13 juillet 2011 a causé 151 respectivement 145 millions de francs de dommages dans le canton d'Argovie. En tout, ce sont 20 500 dommages de grêle qui ont été répertoriés. Cet événement a été classé comme orage de grêle survenant une fois tous les 50 à 100 ans [15]. Le même rapport présente une analyse des événements de grêle historiques, voir figure 6.

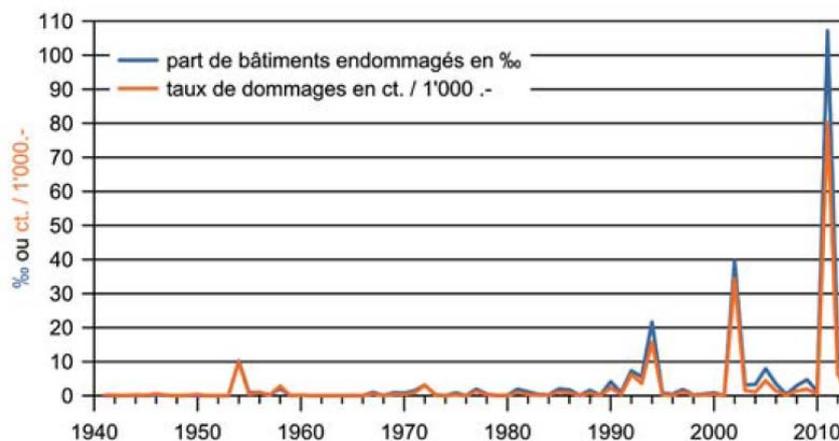


Figure 6 : Dommages aux bâtiments depuis 1941 dans le canton d'Argovie tiré de [15].

Le graphique ci-après montre comment les sinistres annoncés sont répartis entre les différents éléments du bâtiment. Par la force des choses, les façades tiennent la seconde place parmi les catégories touchées par la grêle. La part du montant du dommage sur les façades par rapport au montant du dommage total est également très élevée. Les dommages caractéristiques sur les façades sont des fissures et des éclatements dans le crépi, voir figure 9. Le rapport mentionne dans ses conclusions la plus grande vulnérabilité des bâtiments d'habitation récents, qui ressort des statistiques : l'analyse des indemnisations des dommages montre de

manière empirique que les bâtiments d'habitation récents sont nettement plus souvent concernés par des dommages de grêle que les bâtiments plus anciens. Ils sont aussi plus fortement touchés (niveau de dommages plus élevé). D'après les auteurs du rapport, ce résultat n'est toutefois pas imputable aux impacts techniques du vieillissement.

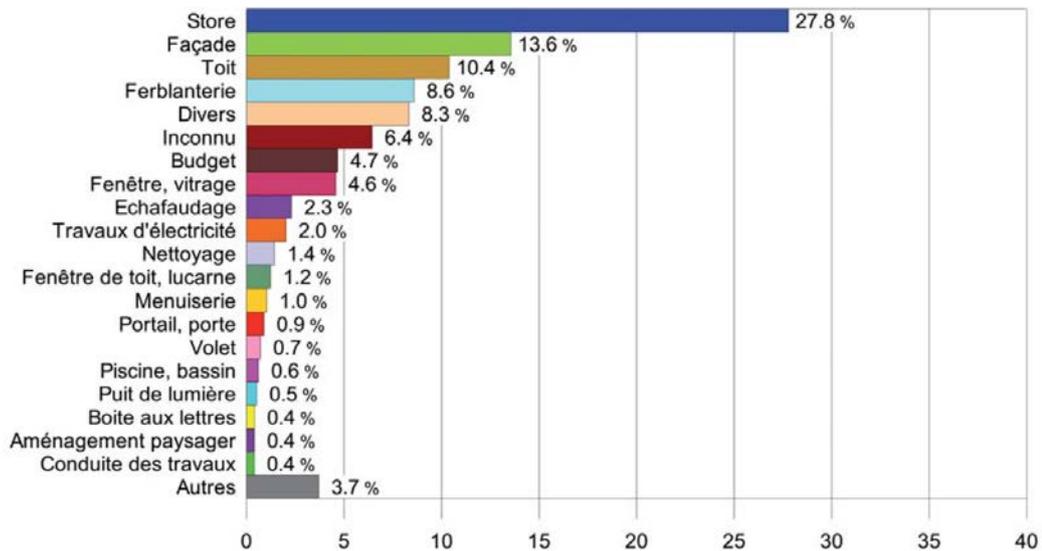


Figure 7 : Répartition des dommages suite à l'épisode de grêle des 12 et 13 juillet 2011 dans le canton d'Argovie [15].

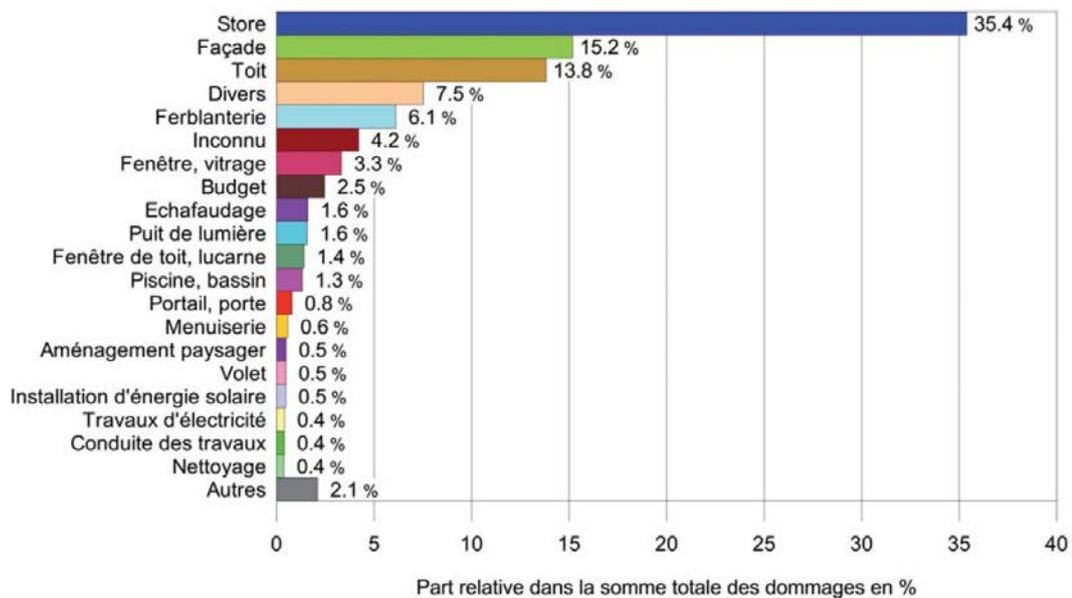


Figure 8 : Répartition du montant des dommages suite à l'épisode de grêle des 12 et 13 juillet 2011 dans le canton d'Argovie [15].

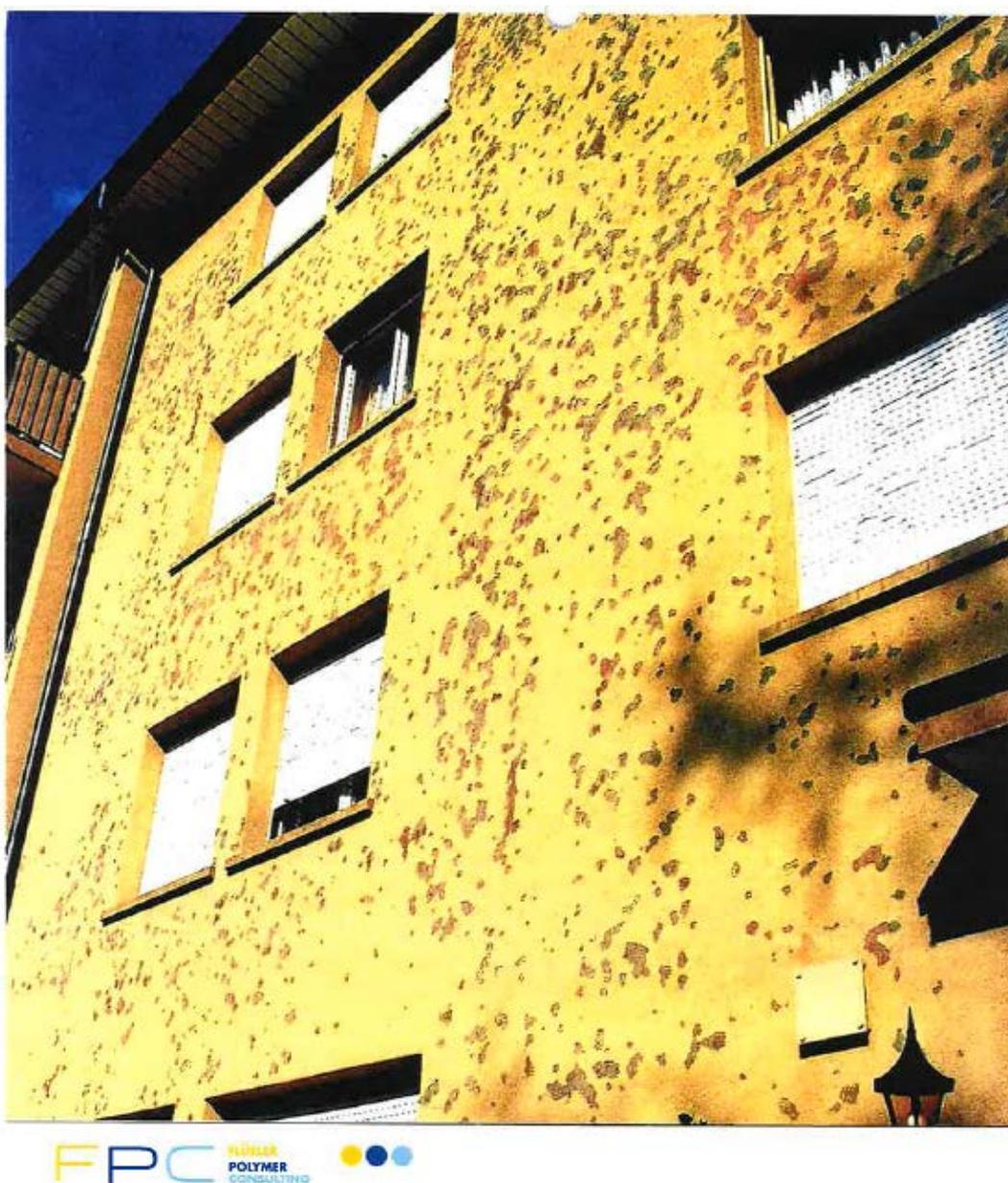


Figure 9 : Gros impacts de grêle sur une façade [16].

3 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Recherche générale

3.1.1 Propriétés des systèmes composites d'isolation thermique et des façades crépies

Les systèmes composites d'isolation thermique (ETICS) sont utilisés en Suisse depuis les années 60 comme isolations thermiques par l'extérieur (isolation périphérique) [17]. Ils sont également fréquemment employés dans les rénovations visant à réduire la consommation d'énergie. Il n'est souvent pas possible de recourir à ce genre de systèmes pour les monuments historiques en raison d'impératifs liés à la conservation du patrimoine. Dans ce genre de cas, seule une isolation thermique intérieure peut être utilisée, voir p.ex. [18]. En 1970, la SIA a publié des recommandations pour la protection thermique dans les bâtiments élevés (voir SIA-180), invitant à utiliser les ETICS. Les ETICS sont employés comme isolations économiques et écologiques sur l'enveloppe du bâtiment depuis au moins les crises pétrolières de 1973 et 1979. Le reste de l'Europe a suivi une évolution similaire à la Suisse sur ce point. Les systèmes d'isolation thermique extérieure sont désignés en anglais par les termes External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS), plus rarement External Wall Insulation System (EWIS). Des ETICS sont également utilisés en Amérique du Nord sous l'appellation External Insulation Finishing Systems (EFIS). Dans une étude de Pasztory et al., des systèmes représentant typiquement le modèle européen ont été comparés avec des systèmes caractéristiques américains [19]. Les ETICS européens se sont avérés plus efficaces en général, car ils présentent une couche plus épaisse d'isolation thermique. Le rôle d'isolation thermique est assumé par une plaque de 15 cm à 30 cm d'épaisseur constituée d'un matériau d'isolation. Cette technique permet d'influencer de manière positive non seulement l'accumulation de chaleur en hiver (quand les températures extérieures sont basses), mais aussi le bilan thermique en été, lorsque les températures extérieures sont plus élevées durant la journée que la température souhaitée à l'intérieur du bâtiment [20]. Outre l'intégrité structurelle mécanique, les exigences techniques pour un ETICS portent sur ses propriétés hygrothermiques. Le système doit protéger les structures internes du mur d'un taux d'humidité trop élevé, tandis que des variations de température modérées se produisent à l'intérieur. Des exigences élevées sont posées notamment en cas de construction en bois. [21] donne un bon aperçu des possibilités de preuves reposant sur des expériences et des calculs. L'ETAG-004 y sert de climat de référence pour l'exposition artificielle aux éléments météorologiques. Une comparaison est établie avec des climats représentatifs en Allemagne (Hambourg, Mannheim et la Forêt-Noire). Les possibilités actuelles de simulations basées sur des calculs permettent de reproduire parfaitement les courbes de température et d'humidité générés dans des cycles d'intempéries ETAG. Cette solution est applicable à condition que les données hygrothermiques correspondantes soient connues pour tous les composants matériels impliqués.

Le matériau isolant le plus utilisé est la mousse dure de polystyrène. Ce matériau existe en deux versions : extrudé « XPS » ou expansé « PSE ». Aujourd'hui, la mousse dure de polystyrène est utilisée dans près de 88 % des réalisations, suivie de la laine minérale avec environ 8 %, de la mousse de polyuréthane (PU) pour moins de 5 % et ensuite de matériaux biologiques tels que le chanvre, la laine de bois, etc. [22]. Ces plaques en mousse dure sont collées sur le support et maintenues en partie mécaniquement par des chevilles. La face extérieure est souvent constituée d'une armature intégrée dans l'enduit de fond, la plupart du temps un treillis en fibres de verre. Cette armature participe à la stabilisation mécanique. La couche externe forme alors une couche de finition (crépi de finition et peinture) devant offrir une protection contre les intempéries et définir l'aspect esthétique de la façade (texture et couleur). La figure 10 montre de manière schématique ce genre de constitution avec les appellations en français. La figure 11 reprend le même schéma avec les appellations en anglais.



Figure 10 : Structure interne d'un système composite d'isolation thermique typique [23]

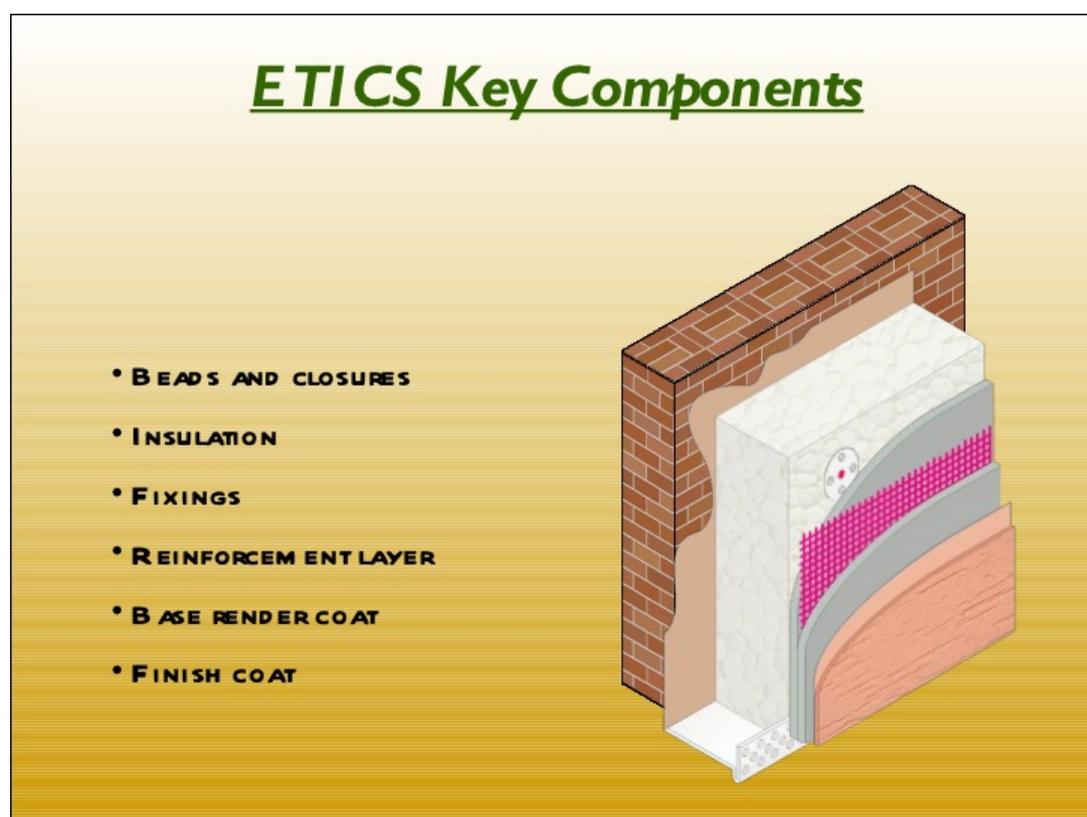


Figure 11 : Structure interne d'un système composite d'isolation thermique typique, tirée d'une présentation en ligne à l'adresse

www.slideshare.net/MichalHarcej/smartcrew4you

Dans les systèmes de crépi, il faut distinguer les systèmes minéraux et les systèmes organiques [24]. Büchli et Flüeler ont également attiré l'attention sur cette classification lors de leur interview, voir chap. 4.3 et 4.4. La limite entre les deux classes de crépi est déterminée par la proportion de 5 % de matières solides dans le liant de dispersion. Dans les deux cas, des particules sont tout d'abord mélangées dans une dispersion aqueuse, puis reliées en une matrice solide via le processus de séchage. Les particules traditionnellement utilisées sont des grains de sable. Il existe différentes tailles de particules de remplissage, généralement entre

1 mm et 6 mm. Des mélanges à base de ciment sont utilisés comme matrices pour les systèmes de crépi inorganiques (mélange de calcaire et d'argile). Pour les systèmes de crépi organiques, la matrice est élaborée d'une part sur une base d'acrylique, d'autre part sur une base de silicone [24]. Il existe également des versions mixtes. Les autres constituants sont des additifs permettant d'influencer la résistance aux UV (p.ex. nanoparticules de dioxyde de titane) et de prévenir l'apparition d'algues et de champignons (algicides, fongicides) ainsi que des pigments pour la coloration. Selon le produit de construction et les conditions de montage, il reste d'autres couches intermédiaires à insérer entre ces couches principales. Le fournisseur du système remet en général des instructions détaillées pour la mise en place, en vue d'éviter des erreurs de montage. Les exigences portent typiquement sur les contraintes climatiques (plage de température, humidité, rayonnement solaire, vent et poussière) et les temps de traitement pour préparer la colle / le crépi ainsi que les pauses pour le séchage des différentes couches. Même la dispersion des pigments (TiO_2 et autres) repose sur un mélange minutieux avant l'application, car sinon les propriétés mécaniques et visuelles requises pour le film polymérisé ne pourront pas être garanties [25]. Cette étude a montré qu'un liant à base de styrène et d'acrylique permet une meilleure prise des peintures qu'un liant à base d'acrylique pur (avec ou sans la technologie des capsules de pigments), et que les liants à base d'acrylique pur se décolorent moins lors d'un épisode d'intempérie sur 19 mois dans le sud de la France. D'autres additifs tels que les polymères opaques (PO) à la place de pigments et la technologie d'encapsulation des pigments (TEP) contribuent aussi à ces résultats [25, 26]. La durabilité des mélanges de peintures à base de polystyrène acrylique et de polysiloxane a également été étudiée. Il est toutefois difficile de bien mélanger ces deux composants de la dispersion. Les propriétés chimiques et physiques de ce type de peinture sont présentés dans [27] : les proportions de matière solide ont été déterminées, tout comme la température de transition et les propriétés dynamiques et mécaniques. La morphologie de ce type complexe de peinture a été analysée. Même les peintures bois ont évolué ces dernières années avec des dispersions à base d'acrylique [28]. Ces études permettent de mettre en évidence la structure complexe des peintures modernes.

La qualité finale des façades équipées de ETICS dépend essentiellement de la qualité des travaux de montage. De nombreux défauts de construction relevant de l'esthétique sont dus à une installation non conforme [22]. Les défauts de construction techniques, tels que la formation de fissures, peuvent également être le résultat d'erreurs d'application (p.ex. mauvaises proportions de mélange lors de la préparation, rayonnements solaires trop intenses lors du séchage, non-respect des temps de séchage, etc.) [22]. Des exemples de cas présentant des problèmes avec l'isolation thermique extérieure crépie sont abordés dans [17]. Dans [29, 30], Sulakatko décrit une systématique pour relever les causes présumées de dommages.

Künzel décrit dans un article [31] le fonctionnement des crépis extérieurs et leur traitement dans les normes DIN. En 2015 est paru un article du même auteur sur l'évaluation de la protection contre l'humidité selon DIN 4108-3 [32]. Ces deux articles abordent l'étude mathématique de l'équilibre des températures et de l'humidité au niveau des enveloppes de bâtiment. Il en ressort que les systèmes d'isolation les plus récents ont plutôt tendance à aggraver les problèmes d'humidité, notamment lorsque l'enveloppe du bâtiment n'a pas été parfaitement réalisée. Des dommages peuvent survenir en raison de l'humidité résiduelle intégrée, d'un manque de convection de l'air et/ou de pluies battantes.

Une étude scientifique compare le concept de l'isolation thermique extérieure avec l'isolation thermique intérieure pour les bâtiments construits dans des régions où le climat est de type méditerranéen [33]. Des courbes transitoires de la température et de l'humidité y ont été simulées. Un bilan économique et écologique de la durée de vie de l'ETICS est établi dans [34] pour des applications en Pologne. Les méthodes de "Life Cycle Impact Assessment" employées là-bas respectent la norme ISO 14040. Dans différents cas, elles ont permis d'établir l'épaisseur de couche d'isolation thermique optimale pour que l'impact économique et écologique soit le plus faible possible pendant 30 années. Il n'existe aucune indication sur un vieillissement prévisible des matériaux utilisés dans les ETICS.

3.1.2 Normes, directives et prescriptions d'essai techniques

En Suisse, les directives de la société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) tiennent une place importante. Pour le crépissage et la construction à sec, il existe la SIA 242. La SIA 243 porte sur les isolations thermiques extérieures, [35, 36]. Les exigences de la SIA 243 ont été entretemps repris dans la norme suisse SN 567 243.

- SIA 242 Crépissage et travaux à sec [35]
- SIA 243 Isolation thermique extérieure crépie [36]
- SIA 261 Actions sur les structures porteuses
- SIA 280 Lés d'étanchéité en matière synthétique (lés polymères) - Performances exigées et essais des matériaux

Ces normes posent des exigences en matière de construction, de traitement et d'application mais elles déterminent aussi les niveaux de résistance à atteindre pour les matériaux. La norme SIA 242 fixe en ce sens le module d'élasticité maximal, les capillaires absorption d'eau, la résistance à la pression, la masse volumique à sec ainsi que la force d'adhérence du crépi extérieur. Les instructions d'essai appropriées sur la méthode de détermination de ces valeurs sont référencées. Pour les plaques d'isolation thermique sont également requises les résistances à la traction, les forces d'adhérence et les masses volumiques minimales. Les épaisseurs de couche et leurs tolérances sont extrêmement déterminantes en ce qui concerne la résistance mécanique et la rigidité. Ces valeurs sont également données. La norme SIA 261 tout comme la SIA 280 contiennent une section sur le thème de la grêle, inscrivant ce phénomène parmi les charges à prendre en considération dans l'étude du projet.

Avant que l'AEAI ne mette au point ses directives pour déterminer avec des billes de glace l'indice de résistance à la grêle, la résistance à la grêle était définie avec des billes PA dans la norme SIA 271 « Étanchéité des bâtiments ». La dernière parution de cette norme date de 1986. Les directives AEA I ont ensuite repris l'essai de l'indice de résistance à la grêle des lés d'étanchéité. Les conditions d'essai suivantes sont déterminantes pour les systèmes de crépi sur un substrat rigide et les ETICS :

- Directive AEA I n° 00A Conditions d'essai de la résistance à la grêle - Partie générale A [37]
- Directive AEA I n° 00B Conditions d'essai de la résistance à la grêle - Partie générale B [38]
- Directive AEA I n° 08 Conditions d'essai de la résistance à la grêle - Crépi sur isolation extérieure [39]
- Directive AEA I n° 21 Conditions d'essai de la résistance à la grêle - Crépi sur substrat rigide [40]

Il existe d'autres conditions d'essai spécifiques dans cette série pour de multiples autres produits de construction, tels que les tuiles, les couvertures de piscine ou les volets roulants.

Il existe les normes DIN et EN suivantes pour les mortiers d'enduits, respectivement les crépis intérieurs et extérieurs :

- DIN EN 998-1 Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie – Partie 1 : Mortiers d'enduits [41]
- DIN EN 13914-1 Conception, préparation et mise en œuvre des enduits intérieurs et extérieurs – Partie 1 : Enduits extérieurs [42]
- DIN EN 13914-2 Conception, préparation et mise en œuvre des enduits intérieurs et extérieurs – Partie 2 : Enduits intérieurs [43]
- DIN EN 18550-1 Conception, préparation et mise en œuvre des enduits intérieurs et extérieurs – Partie 1 : Spécifications complémentaires à DIN EN 13914-1 pour les enduits extérieurs [44]
- DIN EN 18550-2 Conception, préparation et mise en œuvre des enduits intérieurs et extérieurs – Partie 2 : Spécifications complémentaires à DIN EN 13914-2 pour les enduits intérieurs [45]

La norme DIN suivante s'applique aux matériaux d'isolation thermique :

- DIN 4108-10 Protection thermique et économie d'énergie dans les bâtiments – Partie 10 : Exigences d'application pour produits isolants thermiques - Produits isolants thermiques manufacturés [46]
- DIN EN 13499 Produits isolants thermiques pour bâtiments - Systèmes composites d'isolation thermique par l'extérieur (ETICS) à base de polystyrène expansé - Spécification - Version allemande EN 13499 [47]

Franzoni fait référence dans sa publication [48] à une norme EN pour la spécification d'ETICS, ainsi qu'à d'autres normes pour la détermination de diverses valeurs caractéristiques des matériaux d'isolation, telles que la résistance à la traction, la résistance au déchirement, les propriétés mécaniques du réseau de fibres de verre, le comportement à l'impact, la résistance à la pénétration et les propriétés d'isolation thermique. Ces normes EN ont également été reprises comme normes DIN :

- EN 13499 Thermal insulation products for buildings - External thermal insulation composite systems (ETICS) based on expanded polystyrene – Specification [49]
- EN 13494 Thermal insulation products for building applications - Determination of the tensile bond strength of the adhesive and of the base coat to the thermal insulation material [50]
- EN 13495 Thermal insulation products for building applications - Determination of the pull-off resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS) (foam block test) [51]
- EN 13496 Thermal insulation products for building applications - Determination of the mechanical properties of glass fibre meshes as reinforcement for External Thermal Insulation Composite Systems with renders (ETICS) [52]
- EN 13497 Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to impact of external thermal insulation composite systems (ETICS) [53]
- EN 13498 Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to penetration of external thermal insulation composite systems (ETICS) [54]
- EN 12583 Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of hail resistance [55]
- EN 12667 Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance [56]

Il existe également des conditions d'essai aux États-Unis dont certaines méritent d'être mentionnées ici :

- ASTM D 3746 – 05 Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems
- ASTM F 320 – 05 Standard Test Method for Hail Impact Resistance of Aerospace Transport Enclosure [57]
- ASTM E 822 Standard Practice for Determining Resistance of Solar Collector Covers to Hail by Impact With Propelled Ice Balls [58]
- ASTM E 1038 Standard Test Method for Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls [59]
- ANSI FM 4470 Test Susceptibility to Hail Damage, Test Standard for Class 1 Roof Covers.
- ANSI FM 4473 Test Standard for Impact Resistance Testing of Rigid Roofing Materials by Impacting with Freezer Ice Balls [60].
- UL 2218 Impact Resistance of Prepared Roof Coverings
- ANSI FM Approval Standard 4881 Class 1 Exterior Wall Systems [61]

Dans deux articles, Crenshaw et Koontz mentionnent des prescriptions d'essai qui sont adaptées aux couvertures de toits pour définir l'indice de résistance à la grêle, [62, 63]. Ils arrivent à la conclusion que le FM 4473 et la NBS Series 23 représentent les méthodes d'essai les plus réalistes.

Kirschner a par exemple étudié la rupture d'adhérence dans plusieurs variantes d'enduits extérieurs selon la norme EN 13494 [64].

La European Organisation for Technical Assessment (EOTA) a quant à elle publié des Technical Reports définissant des méthodes d'essai pour fixer des exigences concernant les produits de construction dont : Watertightness, Impact Resistance, Resistance to Delamination, Resistance to Wind Loads, Resistance to Static and Dynamic Indentation, etc. Parmi les documents en lien avec notre problématique, les rapports ci-après peuvent être utiles :

- TR001 Determination of Impact Resistance of Panels and Panels Assemblies [65]
- TR004 Determination of Resistance to Delamination [66]
- TR006 Determination of the Resistance to Dynamic Indentation [67]
- TR010 Exposure Procedure for Artificial Weathering [68]
- TR011 Exposure Procedure for Accelerated Ageing by Heat [69]
- TR014 Exposure Procedure for Accelerated Ageing of Glass Reinforced Unsaturated Polyester Resins by Two-Hour Water Boil [70]
- TR037 Test Method for Elastomeric Insulating Elements – Determination of Creep [71]
- TR046 Test Methods for Foam Adhesives for ETICS [72]

Deux exemples de charges pour la détermination de l'Impact Resistance sont décrits dans TR001 : le Soft Impact et le Hard Impact. Dans le Soft Impact, on fait tomber un sac de sable de 50 kg sur l'éprouvette de manière à appliquer une énergie cinétique entre 60 J et 1200 J. La vitesse de l'impact reste inférieure à 7 m/s. L'énergie appliquée, la souplesse de l'impact et la vitesse ne correspondent pas du tout aux valeurs réelles pendant une averse de grêle représentative avec des billes de glace. Le Soft Impact Test n'est donc pas comparable à une averse de grêle (masse < 100 g, vitesse > 10 m/s, énergie cinétique entre 0,04 J et 27 J). Dans le Hard Impact, on utilise une bille d'acier d'une masse de 0,5 kg ou de 1 kg avec une énergie cinétique entre 1,3 J et 10 J. Ce test non plus n'est pas comparable avec une averse de grêle. L'énergie appliquée est certes comparable, mais la vitesse de l'impact est trop faible et la masse ainsi que la dureté de l'Impactor sont trop élevées.

Il existe aussi de la même organisation européenne les European Technical Approval Guidelines (ETAG). Ces documents décrivent des directives pour l'agrément européen de produits de construction spécifiques. Pour les systèmes composites d'isolation thermique, il s'agit de l'ETAG-004 [73]. Ce référentiel comprend la simulation d'une période d'intempéries avec 80 cycles chaleur-pluie et 5 cycles chaleur-froid, voir figure 12. Dans quelle mesure cette séquence représente-t-elle une bonne simulation des intempéries naturelles ? Cette question a été posée d'une part par Liisma pour le climat baltique et d'autre part par Daniotti pour le climat d'Italie du Nord. [7, 74].

Les exigences applicables aux ETICS sont les valeurs limites pour l'humidité admise à l'intérieur afin d'éviter l'apparition de champignons ou de moisissures ou même de condensation, tenant compte d'un potentiel de dégâts dus au gel par la formation de glace. Cette configuration s'obtient grâce à un bon équilibre entre l'apport d'eau pendant des périodes pluvieuses et l'évaporation pendant les périodes chaudes. Un essai selon ETAG-004 est toutefois contraignant. Il dure près d'un mois et doit être réalisé dans un grand laboratoire muni de l'équipement nécessaire.

Table 3. Ablauf der Bewitterung mit hygrothermischen Zyklen nach ETAG 004
 Table 3. Procedure of hygrothermal cycles according to ETAG 004

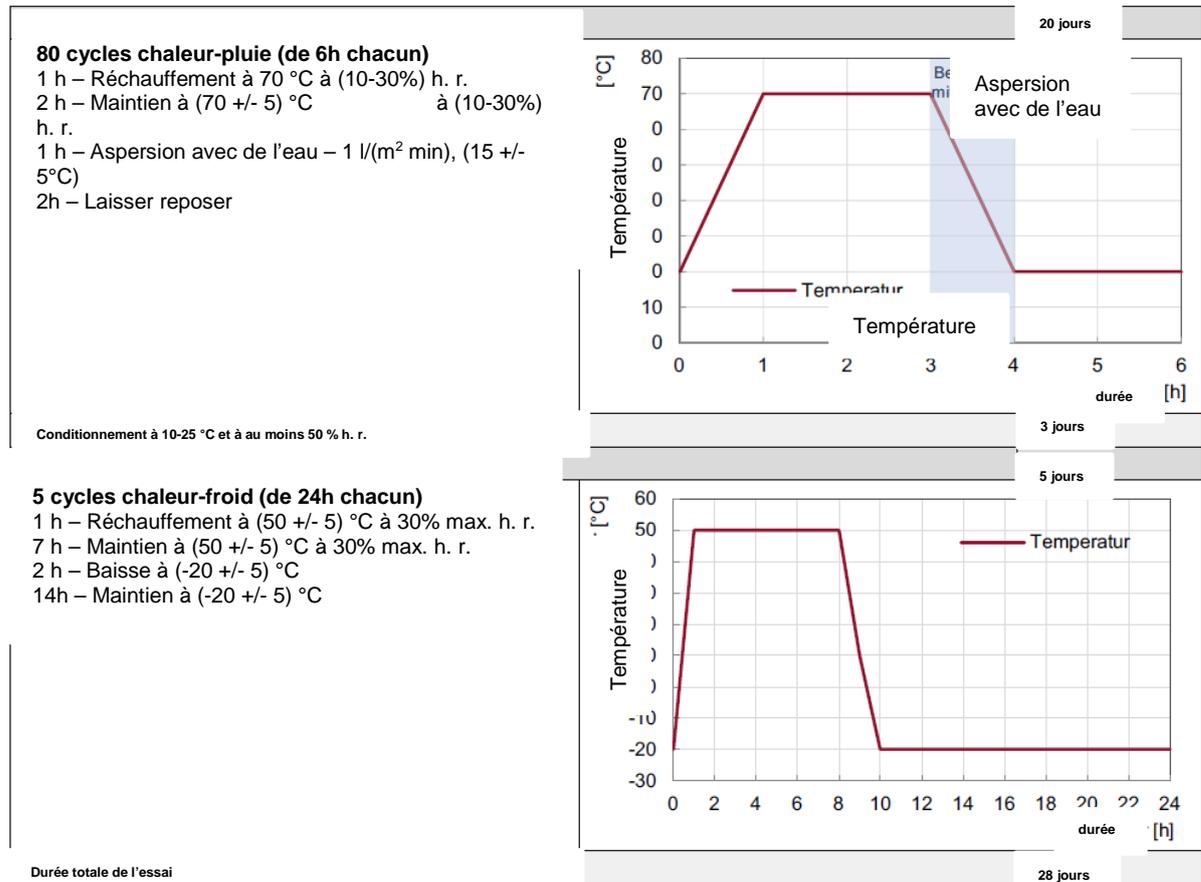


Figure 12 : Exposition artificielle aux intempéries selon ETAG-004 [21].

Les standards internationaux sont entre autres l'ISO 7361, qui pose les exigences générales en matière de façades de bâtiments [75], ainsi que l'ISO 7897 [76] et l'ISO 7892 [77] qui définissent ensemble l'Impact Resistance Tests.

3.1.3 Publications générales et description de produits commerciaux

L'Association suisse des entrepreneurs plâtriers-peintres (ASEPP) a publié une fiche technique sur la rénovation et le doublage d'isolation thermique extérieure crépie (disponible uniquement en allemand) [78], qui contient des recommandations d'exécution pour différentes situations de rénovation. Elle décrit aussi les examens qui doivent être effectués lors d'un contrôle d'état d'un bâtiment à rénover : clarification d'une éventuelle imprégnation d'humidité dans le crépi, détermination de la résistance à la déchirure (capacité portante du sous-sol), détection de fissures (absorbant l'eau), formation de végétation, infestation d'insectes, etc.

Pour les crépis, l'entreprise Cemex Mortars a publié un « Educational Guide to Properties of Rendering Mortar » [79]. En plus des remarques sur l'exécution, ce guide spécifie également les valeurs de résistance à atteindre pour ces systèmes. Dans les brochures de l'entreprise Sto SA, on peut trouver des descriptions rudimentaires sur la composition et les propriétés spécifiques des différents systèmes de crépi [23, 24]. Le produit stoElasto apprécié pour sa résistance aux averses de grêles les plus violentes et censé satisfaire aux exigences les plus élevées en matière de résistance à la grêle.

Un article d'Oliver Berg paru dans le forum technique 01/2013 traite d'un système d'isolation de l'entreprise Caparol réalisé avec la technologie de réseau à nano-quartz dans la couche de peinture et avec des fibres de carbone dans le mastic [80]. Il traite du test de chute des billes comme essai en laboratoire pour déterminer la résistance au choc. Le produit est doté d'une matrice (mastic) avec des fibres de carbone, ce qui confère

au système d'isolation une résistance extraordinairement élevée aux chocs et à la fissuration. Les nanoparticules dans la couche de peinture confèrent une stabilité et une brillance optimales de la couleur. Le deuxième article de Dieter Stauder traite des avantages du matériau isolant PU par rapport au PSE [80]. Des propriétés telles qu'une bonne résistance aux UV, un faible coefficient de conductivité thermique (valeur U) et une faible fragilité sont décrites comme des propriétés avantageuses. Les autres propriétés souhaitées sont : une bonne stabilité dimensionnelle, c'est-à-dire pas de rétrécissement ou de gonflement, pas d'absorption d'eau, pas de sensibilité à l'humidité. Dans le troisième article, Thomas Brenner donne un aperçu du fonctionnement des couches de peinture à dispersion modernes à base d'acrylique et de silicone, qui sont mélangées à des nanoparticules (pigments) pour obtenir de meilleures propriétés (résistance aux UV, surfaces moins hydrophobes et donc une bonne résistance à la saleté) [80]. La technologie connue sous le nom de réseau à nano-quartz est essentiellement un polymère acrylique organique composé de nanoparticules de silicium inorganique solidement liées (25 nm) dans lequel sont incorporés du dioxyde de titane (250 nm) et des pigments colorés (300 nm). Le composant clé de la résistance est clairement le liant, dans ce cas-ci le polymère acrylique. Une teneur trop élevée en liant n'est pas souhaitable, car cela réduirait la perméabilité à la vapeur d'eau. D'autres additifs tels que les émulsifiants, qui assurent une bonne distribution des particules lors du mélange de la dispersion, sont également discutés. Des particules minérales dures sont également utilisées pour améliorer la résistance aux rayures des revêtements, par exemple [81]. Des antigels sont également employés dans certains pays nordiques, comme la Russie. S'ils sont mal dosés, ils peuvent entraîner des modifications indésirables de la porosité du ciment [82]. En particulier un effet de lixiviation est évoqué, ce qui peut entraîner une décoloration inesthétique. Un autre article souligne les conditions restrictives dans lesquelles ces systèmes complexes de peinture et de mastic peuvent être utilisés : des températures trop basses ou trop élevées entraînent une fonctionnalité insuffisante. C'est pourquoi les consignes du fabricant concernant la température, le vent et le rayonnement solaire doivent toujours être respectées lors du mélange et de l'application. L'article de Künzel aborde d'autres règles pratiques pour l'application de couches molles ou dures dans le cas d'enduits extérieurs à deux couches [31].

Une bonne adhérence du crépi sur le substrat est une propriété mécanique importante, qui a été étudiée théoriquement à l'aide du test d'arrachement (pull-off test) et de la simulation numérique [83].

3.2 Recherche dans la littérature scientifique

3.2.1 Critères de recherche et mots-clés pour la recherche bibliographique

La recherche bibliographique reposait sur la question centrale de l'étude en ces termes :

« Existe-t-il des effets du vieillissement, des intempéries, du gel, de l'humidité ou de la corrosion qui peuvent nuire à la résistance à la grêle ou à la résistance aux impacts des systèmes composites d'isolation thermique ou des systèmes de crépi ? »

Les termes clés de la question ont été remplacés par les termes anglais comme suit :

- 1) Vieillessement → aging, weathering, frost, humidity damp damage, corrosion
- 2) Systèmes composites d'isolation thermique → thermal insulation composite systems, rendering, render
- 3) Résistance à la grêle → hail impact resistance, hail resistance, impact resistance

La recherche bibliographique a été réalisée dans la base de données en ligne Scopus (www.scopus.com/home.uri) entre la mi-janvier et la mi-mars 2017. Les termes de recherche utilisés étaient :

- 1) « weathering » ou « aging » ou « frost » ou « humidity damp damage » ou « corrosion »
- 2) « thermal insulation composite systems with rendering » ou « rendering » ou « external thermal insulation composite systems » (ETICS)
- 3) « impact resistance » ou « hail impact resistance » ou « hail resistance »

Les premières requêtes de recherche ont rapidement montré qu'aucune publication ne contenait tous les trois critères de recherche. Par conséquent, des recherches moins restrictives ont dû être appliquées. Alors que le nombre d'occurrences des causes de « frost », de « corrosion » ou de « humidity damp damage » atteignait à lui seul près de 300 000 résultats, l'effet de la « impact resistance » ou de la « hail impact resistance » ou de la « hail resistance » donnait à elle seule plus de 9 500 résultats. Les différentes combinaisons de termes de recherche ont donné lieu à un nombre de résultats compris entre plusieurs douzaines et quelques centaines de publications. 65 000 publications ont été identifiées pour l'objet « thermal insulation composite systems with rendering » ou « rendering » seul.

Un ensemble gérable de 77 résultats a été atteint avec le terme de recherche « external thermal insulation composite systems ». Comme ce terme technique anglais correspondait exactement au terme technique « systèmes composites d'isolation thermique », la recherche principale a été basée sur cette sélection, ce qui nous a permis de travailler avec un nombre encore plus exploitable de publications. Ces listes ont ensuite été triées manuellement en vérifiant le titre et en partie l'*abstract*.

Au cours de l'examen de ces publications, les publications citées ont également été examinées plus en détail pour voir si elles contenaient des informations pertinentes. D'autres publications ont également été incluses dans la recherche via les noms d'auteurs qui ont publié des publications intéressantes.

3.2.2 Recherche bibliographique sur le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment

La série de conférences « Durability of Building Materials and Components » a lieu tous les trois ans depuis 1978. La dernière (la treizième) a eu lieu en 2014. Le compte rendu de la huitième conférence, celle de 1999, a fait l'objet d'une [84] recherche plus approfondie.

Les effets du vieillissement des matériaux de l'enveloppe du bâtiment peuvent entraîner des dommages liés au vieillissement [85]. Ces défauts de construction sont différents des dommages initiaux et des dommages aléatoires. Les dommages initiaux apparaissent dans les premiers 7 ans environ après la construction. Après une période d'incubation d'environ 20 à 30 ans, au cours de laquelle des dommages aléatoires se produisent, les dommages liés au vieillissement apparaissent de plus en plus fréquemment. La distribution de fréquence des dommages observés suit une « courbe en baignoire », voir figure 13.

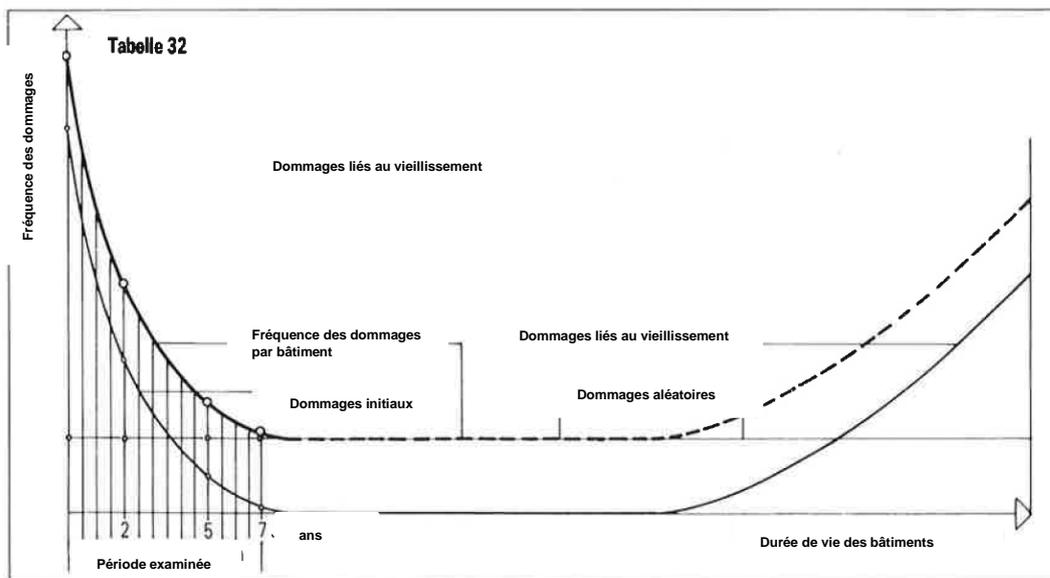


Figure 13 : Représentation schématique de la distribution de la fréquence des dommages sur la durée de vie des bâtiments, tiré de [85].

Le vieillissement normal (des matériaux) n'est responsable que dans une mesure relativement modeste du nombre de dommages aux bâtiments. Une enquête réalisée en 1979 par la Documentation suisse du bâtiment a montré que cela représentait moins de 5%, voir figure 14. Les matériaux défectueux sont responsables d'environ 10 % des cas. La majeure partie est due à une mauvaise conception (environ 55%) ou à une mauvaise exécution (environ 35%). Les murs sont à l'origine de la majorité des coûts (environ 45 %) [85].

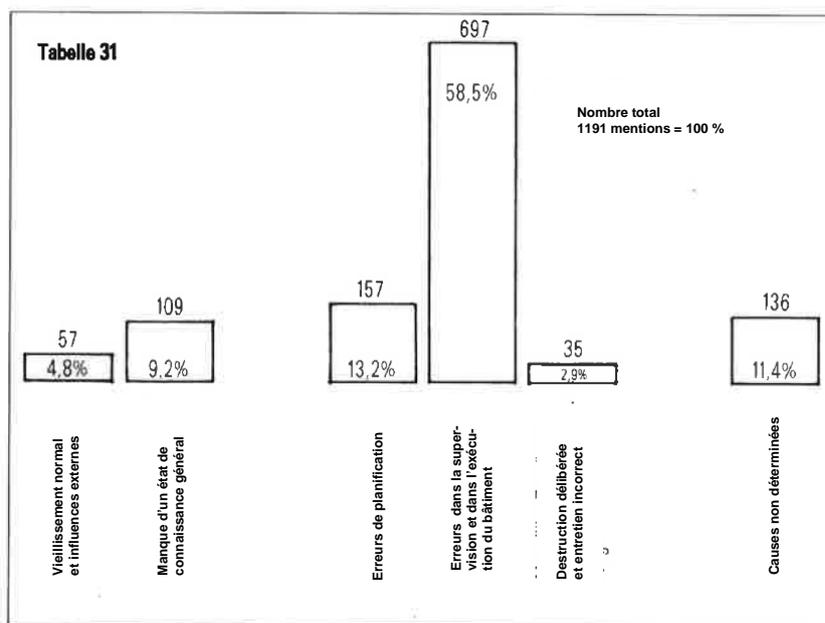


Figure 14 : Causes des dommages aux bâtiments selon une enquête [85].

Une étude récente a révélé que l'humidité élevée est la principale cause des dommages causés aux ETICS [48]. Ce document propose des mesures pour prévenir les dommages causés par l'humidité, comme les fentes de ventilation. Le principal type de dommage est la croissance biologique. Il est fait mention de l'ETAG-004, qui spécifie une limite de 1 kg/m^2 pour l'absorption d'eau. La durabilité des ETICS est abordée dans le chapitre d'introduction et les sources sur le sujet sont citées en référence : les ETICS affichent généralement une bonne résistance à long terme. Les études sur le terrain de Sulakatko et al. [29] et l'essai en laboratoire de Norvaisiene et al. [86] sont tous les deux référencés. Une fonctionnalité intégrale a été constatée même après 20 ans et une durée de vie possible allant jusqu'à 60 ans a été envisagée [87]. Dans cette étude, l'excès d'humidité est également mentionné comme principale cause des dommages aux bâtiments. Une humidité élevée peut également résulter d'un comportement de séchage défavorable du béton sous-jacent après l'application de l'ETICS [88]. La rétraction de la couche de finition pendant le séchage et un traitement inadéquat, par exemple une épaisseur de couche insuffisante, sont d'autres facteurs qui influent sur la durée de vie [89]. Dans une autre étude, on a découvert que l'eau de pluie introduite par le vent était à l'origine d'une perte d'adhérence des panneaux de laine de roche et de problèmes dans les façades en bois ou dans les enduits de plâtre [90, 91]. Une influence synergique de l'eau de pluie avec les cycles de température est également mise en évidence. De plus, les effets nocifs des rayonnements UV et de la pollution atmosphérique sont mentionnés, en particulier sur les systèmes d'enduit organique.

Dans les années 70, l'humidité due aux conditions climatiques ou à la diffusion de la vapeur d'eau a souvent joué un rôle dans les dommages causés, par exemple, aux fenêtres en bois à double vitrage, ou en présence d'une isolation thermique insuffisante [92].

L'humidité peut également causer des problèmes au niveau du socle des façades. Cette humidité peut provenir de projections d'eau ou d'infiltrations d'eau provenant du sol [93]. Bien que ces dernières puissent être largement empêchées par un joint soigneusement placé, l'exposition aux projections d'eau ne peut pas toujours être évitée [22]. Une humidité excessive sur les façades se traduit par l'apparition d'algues et/ou de champignons [94]. Dans une étude détaillée sur l'infestation d'algues, la fluorométrie et la simulation numérique ont été utilisées comme méthodes pour étudier cet effet sur les ETICS [95]. Une étude a examiné la valeur du pH dans la couche de crépi et son influence sur la formation d'algues [96]. Alors que le pH dans les enduits minéraux se situait entre 10,5 et 11,6, le pH dans les enduits organiques était de 6 à 7. Ceci explique le potentiel de dommages plus faible dus à la corrosion sous contrainte sur les armatures en fibre de verre avec enduits organiques par rapport aux enduits inorganiques.

Les altérations visibles les plus évidentes sur les façades causées par le vieillissement sont les taches et les accumulations de saleté. Celles-ci peuvent être considérées comme des indicateurs précoces de signes de dommages naissants dus aux effets du vieillissement. Une méthode de diagnostic pour les taches sur les façades a été proposée par Flores-Colen [97].

Les dommages typiques aux façades sont les fissures et les éclatements, qui sont causés par une imprégnation trop importante d'humidité ou par de l'eau pénétrant dans les fissures et les pores [98]. Dans une étude de cas réalisée au Portugal, les propriétés thermomécaniques de l'enduit de fond et des autres éléments de l'ETICS ont été analysées et, à l'aide de simulations numériques, il a été démontré que les différentes dilata-tions au cours des cycles de température peuvent provoquer des fissures dans la couche de finition. En particulier, si les panneaux d'isolation thermique ne sont collés sur le substrat qu'à certains endroits [99]. Le cycle de gel-dégel joue un rôle important, voir l'étude de cas [100] ou l'étude des matériaux de construction spéciaux en béton armé [101]. L'imprégnation d'humidité peut également entraîner la lixiviation de particules de liant du crépi. Cela entraîne inévitablement une modification des propriétés mécaniques du crépi et de l'ensemble de l'ETICS. D'autres exemples de dommages sur les façades crépies sont présentés dans [17, 102, 103]. Amaro et al. ont publié une méthodologie similaire pour la problématique susmentionnée [104]. Cette étude a également été conduite sur des bâtiments existants au Portugal. Dans cette étude sur le terrain, des fissures ont été relativement souvent documentées en tant que dommages (39,7 % des cas), mais dans la plupart des cas, elles présentaient une ouverture de moins de 1 mm, ce qui n'a pas été considéré comme pertinent d'un point de vue systémique. Les dommages d'étanchéité et les détachements étaient également très rares (3,4 % et 4,1 % respectivement). Dans l'étude, de nombreux dommages sont attribués aux erreurs de conception et de construction. Une couche de finition trop fine est également mentionnée ici comme un défaut d'exécution, considéré comme une cause de dommages ultérieurs. Des méthodes d'inspection et des scénarios de réparation / de rénovation y sont présentés. Dans une autre étude de Barreira et de Freitas, d'autres facteurs d'influence, tels que le rôle que peut jouer l'orientation géographique (nord, sud, ouest ou est) d'une façade sur l'atmosphère humide de la couche de finition, ont été étudiés [105]. Le comportement de séchage s'est révélé très différent, ce qui peut mener à différentes infestations d'algues. La condensation de surface était importante dans ce cas (un bâtiment à Porto, Portugal). Cela peut être différent dans d'autres conditions climatiques. Gaspar et de Brio ont réalisé des études similaires sur les façades à base de ciment au Portugal [106].

Des études de terrain portant sur les mêmes questions ont également été menées dans les États baltes [74]. Dans cette étude, contrairement à l'étude menée au Portugal, des défauts matériels ont été constatés dans plus de 50 % des cas. En outre, les dommages se sont produits plus tôt qu'au Portugal : après 1 à 6 ans au lieu de 10 à 20 ans. La plupart des défauts étaient des fissures dans le crépi de finition. Les causes présumées de ces fissures étaient la forte concentration d'humidité du sol et le traitement inadéquat des angles du bâtiment (93 % des cas de fissures). La période de construction, pendant laquelle la température extérieure était inférieure à 5°C, est également considérée comme la cause du nombre accru de dommages dans cette région.

Dans une étude de cas, l'efficacité de l'isolation thermique après 20 ans a été examinée en Italie dans un bâtiment d'habitation abritant plusieurs logements [107]. Pour ce cas, il a pu être démontré que l'effet d'iso-lation thermique et l'intégrité mécanique (adhésion de l'ETICS au mur) ont été intégralement préservés même après 20 ans. Il n'y avait aucun signe de décomposition chimique. Cependant, des fissures et des détache-ments superficiels ont été observés. L'infestation d'algues a également été étudiée en tenant compte de l'ab-sorption d'eau [108]. Les chercheurs ont aussi mis en évidence le fait que le degré de rugosité de la surface avait une influence sur l'absorption d'eau et sur l'accumulation d'algues.

Le vieillissement naturel et artificiel a été appliqué par Maggi et al. sur des murs en briques recouverts de crépi et de peinture acrylique pour étudier l'absorption d'eau en fonction de l'augmentation et de la diminu-tion du poids. [109]. Ils ont constaté une légère augmentation de l'adhérence, de la résistance à la flexion et à la compression ainsi que du module d'élasticité du crépi avec l'âge. L'étude ne traite pas la question de savoir si cela entraîne une fragilité et une sensibilité accrues aux charges d'impact, mais cela ne peut pas être exclu. Wonneberger et Bortz ont étudié dans quelle mesure le vieillissement artificiel, c'est-à-dire le vieillis-sement accéléré, peut être assimilé au vieillissement naturel pour les matériaux en grès [110]. Ils ont mesuré le module d'élasticité et la résistance en tant que paramètres caractéristiques du matériau dans différentes conditions d'intempéries. Ils en concluent qu'il existe une forte corrélation entre le vieillissement artificiel et

le vieillissement naturel : 12 à 16 cycles de gel-dégel correspondent à environ 12 ans d'exposition naturelle aux intempéries dans les climats nordiques. Cette conclusion est intéressante en ce sens que les 5 cycles indiqués dans l'ETAG-004, du moins pour le climat nordique, reflètent seulement environ 3 années d'exposition aux intempéries naturelles.

Bollmann et al. [111] ont étudié l'influence de l'exposition naturelle pendant 19 mois sur le comportement de lixiviation de substances biocides des systèmes d'enduit organique, à la fois ceux à base de silicone et ceux à base d'acrylique. Les expériences se sont déroulées au Danemark, sous un climat plutôt maritime. Grâce à un bilan massique, il a été possible d'identifier la décomposition de différentes substances biocides causée par les rayons UV.

En ce qui concerne le vieillissement artificiel, il est fait référence à l'ETAG-004, qui mentionne également des séquences de simulation climatique plus rudes, utilisées dans d'autres études [7]. Dans son étude [48], Franzoni a choisi les cycles gel-dégel et les cycles de température (mais seulement jusqu'à 60° au lieu de 70°) selon la norme EN 1348, qui a été développée pour les colles. Selon le rapport, le rayonnement solaire peut chauffer la température de surface jusqu'à 80°C, en fonction du matériau. Liisma et al. ont étudié l'influence de la température avec la superposition des fluctuations d'humidité pour le climat de la Baltique [112]. De tels cycles peuvent entraîner des contraintes résiduelles et des dommages dus au gel dans l'ETICS. Les dommages causés par l'exposition artificielle en laboratoire étaient la formation de fissures et le délaminage. Une étude lituanienne a étudié l'absorption d'eau et le comportement de séchage de l'ETICS en déterminant expérimentalement l'adhérence après un vieillissement artificiel en laboratoire [86]. Les expériences montrent que l'absorption d'eau dépend du type de crépi et des cycles d'intempéries. La résistance à la déchirure est également affectée négativement par les intempéries artificielles. L'auteur a critiqué les cycles d'intempéries artificielles stipulés dans ETAG-004 comme n'étant pas suffisamment représentatifs du climat baltique. L'absorption d'eau et le comportement de séchage sont sensiblement différents si l'on simule des cycles d'intempéries qui tiennent compte du climat plutôt pluvieux et frais des pays baltes. Dans cette étude, la durée de vie est jugée dépendante de l'absorption d'humidité dans la couche de finition, indépendamment des dommages causés. Pour cette raison, l'absorption d'eau et le comportement de séchage ont été décrits comme étant les principaux facteurs influençant la durée de vie de l'ETICS. Vallee et Rubaud ont également constaté une diminution de la flexibilité des systèmes composites polymères-ciment après un vieillissement artificiel (cycle chaud-humide) [113]. Une réduction marquée de l'allongement à la rupture a également été observée. Ils ont pu attribuer ces changements macroscopiques aux changements dans la morphologie du ciment : il en résulte une réticulation inorganique rigide à l'intérieur du composite. Par conséquent, on peut s'attendre à une augmentation de la sensibilité aux impacts. Aucune indication spécifique de la résistance à la grêle de l'ETICS n'a été trouvée dans les études mentionnées.

3.2.3 Recherche bibliographique sur les mécanismes de vieillissement des plastiques et des systèmes composites

Les facteurs qui influencent le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment (exemple ici de façades en bois) sont les suivants [84] :

Class of aging agents	Agent
Chemical agents	<i>CO_x</i> <i>NO_x</i> <i>SO_x</i> Sulfuric acid Carbonic acid Salts Cleaning products
Weathering agents	<i>Moisture</i> <i>Rain</i> Snow Ice Hail <i>Water vapor</i> <i>Wind</i> <i>Air pollutants</i> High temperature Low temperature Temperature cycle <i>Solar radiation</i> Thermal radiation
External artificial agents	Electromagnetic radiation Discontinuous mechanical stresses
Artificial agent due to use	Cleaning water Continuous mechanical stresses
Biological agents	Animals Vegetable

Figure 15 : Facteurs influençant le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment [84].

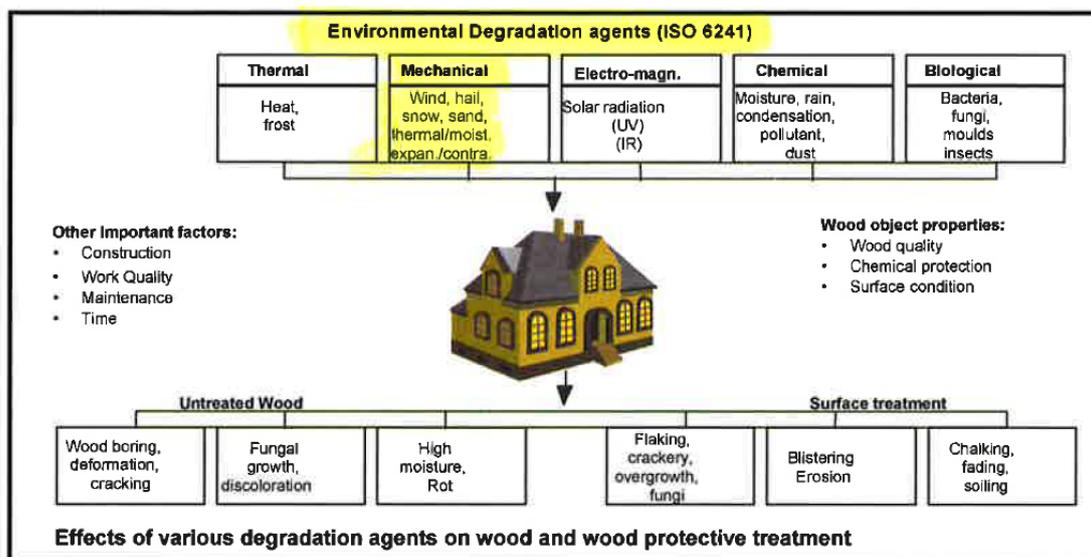


Figure 16 : Facteurs influençant le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment [84].

La norme ISO 6241 fournit de plus amples informations sur ces agents [114].

Le thème de la simulation environnementale a été abordé lors de la conférence de TEA AG à Neuhausen, le 8 juin 2016. Il s'agissait surtout de tester des appareils de construction mécanique générale plutôt que des bâtiments. Néanmoins, les approches méthodologiques qui y ont été discutées peuvent être utiles ici : la simulation environnementale est décrite dans la norme DIN ISO 17025. Les phénomènes naturels suivants peuvent avoir un effet néfaste : augmentation de la température, changement de température, changement climatique, conditions météorologiques (pluie, vent, sable et poussière) et rayonnement. Ces phénomènes peuvent déclencher des processus thermiques, chimiques ou biologiques qui ont un effet néfaste sur la durée de vie des matériaux. Dans le domaine de la construction d'appareils, il est intéressant de déterminer un taux de défaillance sur la durée de vie. On retrouve la « courbe en baignoire » illustrée à la figure 13 pour les appareils. Les approches méthodologiques pour l'analyse de l'accélération artificielle des processus de vieillissement sont intéressantes :

Dans les procédés chimiques, la loi d'Arrhenius (modèle d'Arrhenius) peut être utilisée pour raccourcir le temps au moyen d'une courbe maîtresse en augmentant la température. Cependant, l'énergie d'activation doit être prise en compte. Comme celle-ci peut varier, le résultat de la simulation n'est pas transposable à la réalité. Dans le cas des influences climatiques et de l'humidité, la loi analogue de Lawson (modèle de Lawson) s'applique, ce qui permet également de transposer le résultat à la réalité. Ici aussi, il faut émettre une hypothèse sur l'énergie d'activation. Le modèle de Coffin-Manson peut être utilisé pour les variations de température. Malheureusement, aucune source scientifique qui décrirait ces modèles de façon plus détaillée n'a été mentionnée.

Il reste à déterminer au cas par cas dans quelle mesure l'accélération est également possible dans les combinaisons de procédés thermiques, chimiques et de régulation de l'humidité. Il est alors important de connaître précisément le mécanisme des dommages afin de pouvoir prioriser correctement les effets. Quoiqu'il en soit, lorsque le vieillissement est accéléré, il est toujours très important de s'assurer que les « facteurs d'accélération » ne déclenchent pas de mécanismes de dommages qui ne se produiraient pas en conditions réelles.

Une étude réalisée en 2004 par l'entreprise Carbotech AG et l'Empa de Saint-Gall a examiné la résistance au vieillissement du PSE et a abouti à des mises en évidence sur le long terme [115]. Des plaques de PSE, qui étaient déjà utilisées depuis 25 ans, ont également été vieillies artificiellement. Un vieillissement à 70°C pendant 14 jours a été interprété comme une durée de processus équivalente à un vieillissement réel sur 1 à 10 ans (à des températures autour de 15°C). Le matériau PSE a vu ses performances inchangées au cours de cette période. Les caractéristiques thermiques et mécaniques sélectionnées comme critères sont la conductivité thermique selon DIN 526 16 / ISO DIS 830, la résistance à la compression selon SIA 279.066 / EN 826, la résistance à la perforation selon EN 388 / ISO 12236 et la résistance à la flexion selon EN 12089. Du point de vue des auteurs, le PSE peut donc être considéré comme un matériau de construction durable.

Les armatures en fibres de verre peuvent présenter des signes de vieillissement dans certains cas, si elles ne sont pas traitées correctement. Ceci peut conduire à une attaque alcaline par le milieu très basique de la matrice de ciment et provoquer une fissuration par corrosion sous contrainte. Ce dommage est compensé par le revêtement des fibres de verre avec du plastisol en PVC [116].

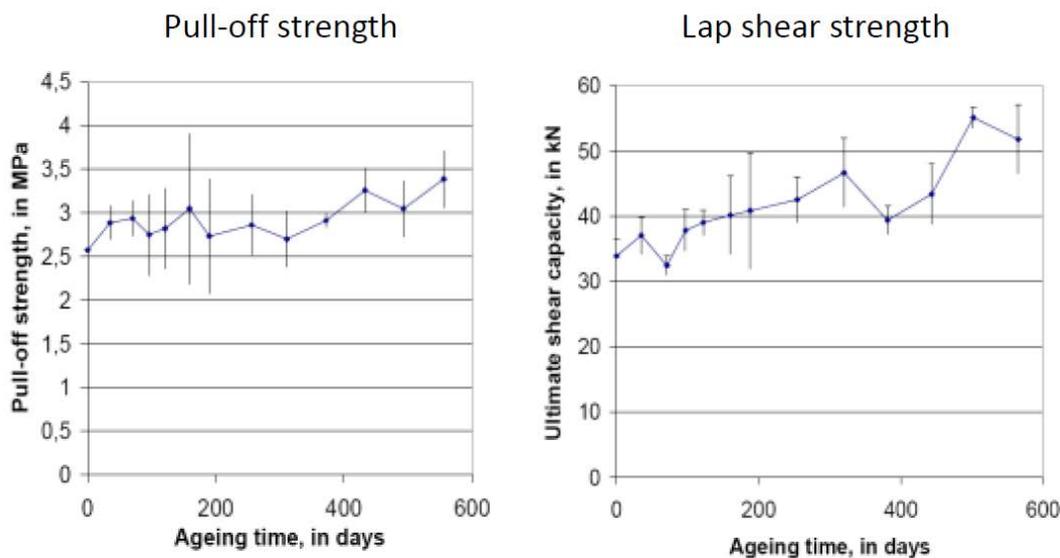
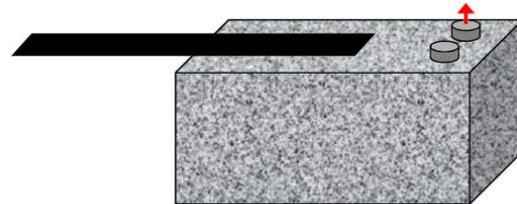
Les liants flexibles dans les systèmes de mortier ont été étudiés par Knotek et al. [117] Ils ont constaté que les liants en silicone pur résistaient mieux aux intempéries artificielles que les systèmes dans lesquels le silicone était mélangé avec du polyuréthane ou du polyester. Les liants de silicone pur modifient leur comportement d'hydrophobe à hydrophile lorsqu'ils sont exposés artificiellement à des intempéries, ce qui peut conduire à des problèmes ultérieurs directs et indirects liés à la teneur en humidité. Mais ils conservent une bonne résistance aux UV. Un inconvénient, cependant, est une plus grande sensibilité à l'humidité par rapport aux systèmes où le silicone est mélangé.

L'expérience faite dans d'autres applications, par exemple dans la construction de ponts, montre un très bon comportement à long terme lorsque l'on utilise le bon système adhésif : le pont autoroutier de Chillon « collé » à la colle époxy résiste aux intempéries depuis 45 ans sans signes de vieillissement [118]. Les essais en laboratoire sur des lamelles de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) collées sur béton ont également

démonstré un comportement à long terme très bon sous charge constante (essai de fluage) pendant des décennies. En cas de vieillissement accéléré (température et humidité plus élevées), les valeurs de résistance du liant ont même tendance à augmenter légèrement [118], voir figure 17.

Comportement à long terme Vieillissement artificiel

Température et humidité élevées
 $T = 40\text{ °C}$ et $RH = 95\%$



19



Figure 17 : Valeurs statiques de résistance en fonction du vieillissement artificiel des lamelles de CFRP collées sur béton, tiré de [118].

Des études menées par Reyer et Fouad décrivent des investigations expérimentales et numériques sur les ETICS, qui ont également été exposées artificiellement aux intempéries, [119, 120], [121]. Les essais ont été réalisés dans l'installation d'essai à grande échelle de Bochum. Des parois entières ont été exposées à des changements climatiques artificiels comme la pluie, la chaleur et le gel. Des déformations rigides du corps ainsi que des fissures dans les joints ont été observées et évaluées. Le pergélisol exerce une sollicitation considérable sur les ETICS. Il est également mentionné que l'augmentation de la teneur organique d'un enduit minéral de 2 à 2,5 %, la réduction de la dimension des mailles du treillis de renforcement ou l'amélioration de l'adhérence entre le treillis et la matrice ont pour effet d'améliorer les propriétés mécaniques du système. Des essais en laboratoire similaires ont également été effectués en Chine [122, 123]. Kirschner et Harmuth ont analysé le comportement d'apparition et de propagation des fissures sur les crépis d'intérieur appliqués aux panneaux de coffrage [124]. S'il y a suffisamment d'adhérence entre les éléments, il est possible d'éviter une fissuration, mais il est quasiment impossible d'empêcher la formation de l'ouverture des fissures macroscopique. Il faut veiller à choisir les matériaux appropriés (présentant une faible fragilité) et prévoir une couche de crépi suffisamment épaisse. De leur côté, Nilicia et Harmuth ont déterminé les caractéristiques mécaniques de rupture d'un matériau pour un ETICS typique après conditionnement sous humidité et température élevées en utilisant la méthode des éléments finis (*finite element method*) [125]. Ils ont constaté que l'énergie de rupture était nettement plus élevée pour les systèmes de crépi à base de polymère que pour les

mortiers à base de ciment. L'énergie de rupture du composite diminue à mesure que l'humidification augmente. Ce phénomène s'amplifie après un conditionnement dans l'eau pendant 25 jours à 20°C. Une augmentation de l'énergie de rupture a été observée après une déshumidification à 70°C de l'éprouvette pendant 7 jours. Cette étude ne contient aucune indication du comportement à l'impact des ETICS.

Daniotti et al. ont réalisé une étude très précieuse [7], qui traite des essais en laboratoire effectués sur des ETICS vieilliss artificiellement. Dans la première partie, la séquence des cycles de contraintes climatiques représentatives de la région de Milan (Italie du Nord) a été établie à partir de données météo. Suite à une recherche approfondie dans la littérature scientifique, y compris dans les normes et les recommandations (par ex. ETAG-004), ces données ont été réduites aux cycles suivants : cycle de choc thermique estival et hivernal, cycles gel-dégel, arrosage, rayonnement UV, variations cycliques de température et d'humidité relative. Ces cycles sont définis dans le tableau suivant :

Table 1 Ageing cycles. During freeze cycles relative humidity was not controlled. Rain was sprayed with 45° angle of incidence (1 Lt m⁻²)

Cycle	Times	Phase	T _{air,chamber} (°C)	RH _{chamber} (%)	T _{air,lab} (°C)	RH _{lab} (%)	Duration (min)
UV	25	UV	35	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
Winter	10	Rain	15 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60
		Freeze	-20 ± 2	-	20 ± 2	50 ± 5	180
		Winter heat	30 ± 2	50 ± 5	20 ± 2	50 ± 5	60
Summer	25	Dry heat	70 ± 2	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
		Rain	20 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60

Figure 18 : Cycles de vieillissement pour les essais en laboratoire sur des ETICS sur la base des données météo de Milan [7].

Les éprouvettes d'essai ETICS ont été équipées de différents capteurs de température, d'humidité et de flux thermique afin d'observer les propriétés hygrothermiques lors des essais. Un aspect important était la détection de changements dans les propriétés d'isolation thermique avec l'augmentation du vieillissement artificiel. Des éprouvettes plus petites ont été utilisées pour étudier en parallèle les propriétés de matériaux (absorption de l'eau, perméabilité à la vapeur d'eau, résistance à la déchirure ainsi que la résistance à la traction du substrat) et leur évolution en vieillissant. L'étude conclut que l'absorption d'eau dans le matériau d'isolation thermique entraîne des changements mesurables de la capacité thermique et de la conductivité thermique. L'eau pénètre principalement par les joints dans les couches inférieures. L'équilibre dynamique de l'humidité joue ici un rôle central. Celle-ci dépend fortement des cycles d'intempéries sélectionnés. L'exposition à des intempéries artificielles a révélé des signes de vieillissement sous la forme de grosses boursofflures (cloques), voir figure 19. Des cloques sont apparues sur toute la surface et atteignaient des diamètres allant jusqu'à 9 cm. Selon les observations, elles sont survenues à la suite du cycle de choc thermique estival. De légers changements de couleur et de porosité sur la surface extérieure ont également été observés. Cependant, les auteurs n'ont pas observé d'éclatements à proprement parler. Selon eux, c'est dû à la bonne élasticité de la couche organique de finition. Dans leurs conclusions, ils formulent une hypothèse sur le mécanisme des dommages : tout d'abord, le liant se décompose dans la couche de finition sous l'effet du rayonnement UV, ce qui entraîne des fissures capillaires. Ce processus est visible par le changement de couleur qui s'opère. Pendant les cycles d'hiver, la couche de fond et la couche de finition sont soumises à des contraintes de traction, ce qui provoque un agrandissement des fissures capillaires. L'eau de pluie peut ensuite pénétrer dans la couche pendant les cycles de pluies. Pendant les cycles de gel-dégel, la matrice du ciment est alors endommagée suite au gel de l'eau qui s'y était infiltrée.

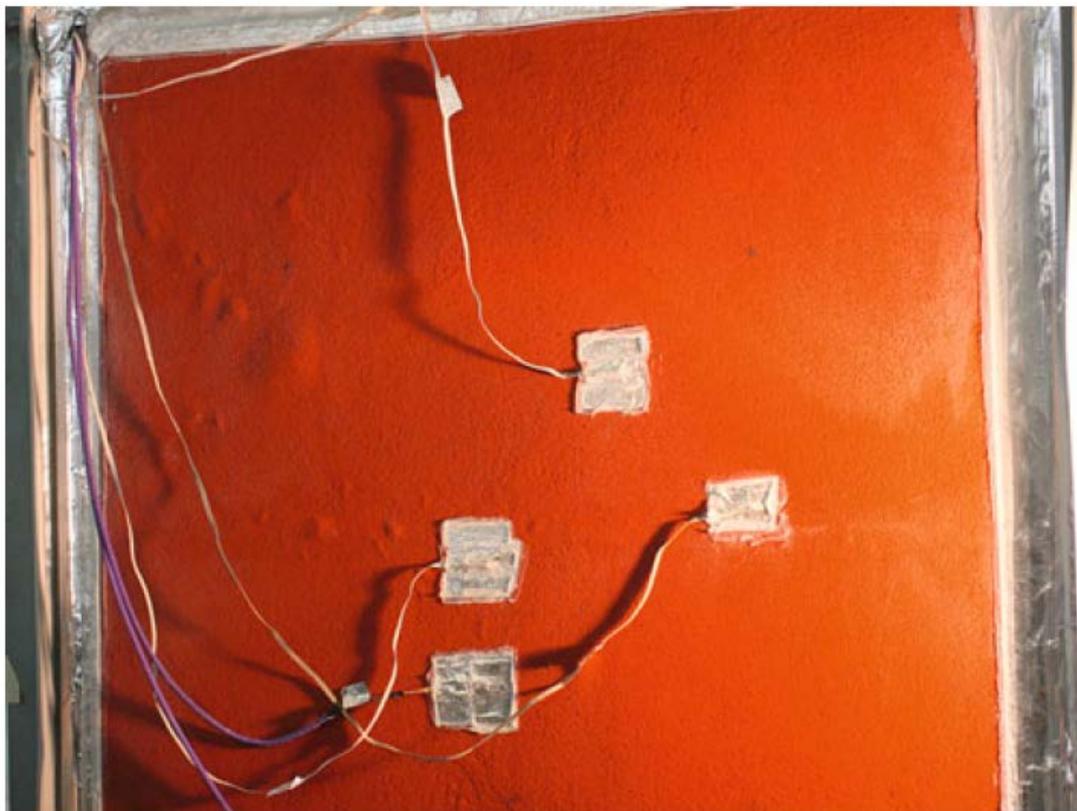


Figure 19 : Formation de cloques dans la couche de finition suite au vieillissement artificiel [7].

Pendant les cycles de choc thermique estival, la couche de fond et la couche de finition sont soumises à des contraintes de compression et perdent de leur adhérence. Cela entraîne aussi la formation de cloques. De la vapeur d'eau peut alors s'accumuler dans la cavité de ces cloques et exercer une pression sur la couche de finition pendant les phases chaudes. Par conséquent, cet effet peut entraîner un délaminage, ce qui à son tour augmente la sensibilité aux impacts. Une étude suédoise portant sur des murs en béton cellulaire avec un revêtement minéral ou organique a également relevé la formation de cloques comme étant un signe de vieillissement [126]. Outre la fissuration et l'adhérence réduite de la couche de finition dues à l'influence de l'humidité, les auteurs décrivent « l'élasticité décroissante et la capacité de déformation plastique » dans les enduits organiques avec liants à base d'acrylique (« [...] they lose elasticity and plastic deformation capacity »). Toutefois, aucun résultat quantitatif n'est présenté sur lequel appuyer cette observation dans des conditions réelles. Une étude du revêtement de carrelage sur des terrasses a également permis d'identifier les cycles du choc thermique estival à la suite d'un refroidissement soudain causé par des précipitations comme étant les plus dommageables [127]. Ce refroidissement rapide provoque des contraintes thermiques qui peuvent causer des fissures. Cependant, ces études ne comprennent pas d'informations sur le comportement face aux impacts.

Un modèle théorique des mécanismes qui interviennent pendant les cycles gel-dégel dans le béton est présenté dans [128]. Des fissures dans la façade peuvent se produire en raison du fluage, de la dilatation ou du gonflement des différents matériaux de construction, en particulier dans le cas de constructions à structure mixte [129]. Dans le cas de combinaisons de matériaux ou de détails de construction défavorables, des fissures peuvent également être causées par les différentes dilatations thermiques [100]. Une autre étude a révélé des différences dans la force d'adhérence des panneaux d'isolation thermique en PSE soumis à des intempéries artificielles par rapport aux panneaux en mousse de polyuréthane ou en granulés de polystyrène, en particulier dans les cycles de gel-dégel [130]. L'adhérence des plaques PSE est au début et pendant les cycles d'arrosage à chaud supérieures de 50 % à celle du groupe de référence, mais elle diminue ensuite

nettement en dessous du cycle gel-dégel et est à la fin inférieure d'environ 10 % à celle du groupe de référence.

Barreira et al. ont enregistré le comportement d'absorption et de séchage de l'eau dans un modèle analytique théorique [131]. Ce modèle théorique peut facilement reproduire les résultats expérimentaux des ETICS en laboratoire. La méthode a également été appliquée à des études de cas sur des bâtiments réels pour ainsi en vérifier l'applicabilité. Un phénomène important est identifié comme « undercooling phenomenon », c'est-à-dire la condensation sur le mur extérieur [105, 131-134].

L'inclusion de la pollution atmosphérique (pollution et pluies acides) parmi les intempéries créées artificiellement a été proposée par Norvaise pour les crépis de façade peinte, [86, 135, 136]. Il a documenté ses essais comparatifs avec des observations faites sur des façades exposées aux intempéries naturelles.

L'effet simultané des rayons UV sur les plastiques et, par exemple, des pluies acides accélère le vieillissement. Schulz a étudié ce phénomène sur des polyméthacrylates de méthyle (PMMA) et a constaté une réduction de l'allongement à la rupture après une exposition à des intempéries artificielles [137]. L'étude [138] a examiné l'effet du rayonnement UV sur le polycarbonate. Le rayonnement UV provoque des changements dans la microstructure du matériau, qui peuvent être visibles au niveau macroscopique : fragilisation, érosion superficielle, changement de couleur (jaunissement) et réduction de la translucidité. Ces actions sont même amplifiées lorsque l'humidité est élevée. Le vieillissement est aussi visible sous la forme d'une fragilisation dans d'autres matériaux polymères : l'énergie d'impact diminue ainsi parallèlement à l'allongement à la rupture dans le cas de l'acrylonitrile-butadiène styrène (ABS) après quelques heures à des températures élevées (90°C et 120°C). Cette fragilisation est due à une dégradation thermo-oxydante en surface, qui n'altère certes pas la résistance et la rigidité du matériau à l'intérieur, mais augmente le risque de rupture dû aux changements en surface (effet d'entaille causé par des microfissures dans la couche extérieure) [139]. Des émulsions acryliques contenant des pigments de couleur sont également utilisées dans l'industrie textile [140, 141]. Les effets du rayonnement UV provoquent l'oxydation des liaisons doubles transversales, ce qui entraîne une décoloration externe et une perte de flexibilité. Il faut donc s'attendre à une fragilisation du matériau. La lumière et la chaleur réduisent également la durabilité de ces produits. Les liants à base d'acrylique pour éléments composites sont également utilisés dans l'industrie automobile. Un article de l'entreprise BASF donne un aperçu de la chimie de ces liants [142].

Un article de Sperry examine la durabilité des peintures acryliques sur les tôles d'aluminium [143]. Bien que ce ne soit pas directement la même chose que pour les couches de finition d'un ETICS, les mécanismes qui se produisent dans les couches organiques contenant des pigments d'oxyde de titane sous l'effet des intempéries naturelles sont transposables : la couche externe sans pigment est d'abord érodée ; c'est un processus relativement lent. Dans une deuxième phase, on procède à une élimination accélérée du matériau au moyen d'un processus complexe de décomposition photoréactive (absorption UV des particules de TiO₂ et exposition à l'eau).

Une autre étude se penche sur l'influence des rayonnements UV sur les systèmes de crépi avec des liants organiques sous l'effet des intempéries artificielles et naturelles [144]. L'étude conclut que même si les rayons UV peuvent détruire le film polymère continu de la couche de finition, ils n'ont aucun effet sur l'absorption d'eau par les ETICS. Les pluies acides, par contre, augmentent l'absorption d'eau, ce qui a un effet négatif sur la fonctionnalité des ETICS.

Des méthodes d'essai pour déterminer la fonctionnalité des ETICS sont décrites dans l'étude de Franzoni [48], par exemple. Les systèmes de colle possibles sont sélectionnés selon la norme EN 12004. La directive [145] rassemble les normes et les standards de résistance aux chocs (pour le Royaume-Uni). Il n'y est pas fait mention de la grêle, mais seulement du Soft Impact, du Hard Impact et de la pénétration. Dans un rapport d'essai de l'institut d'essai Intertek à Middleton WI, USA, les instructions d'essai UL 2218 (Impact Resistance of Prepared Roof Covering Materials) sont mentionnées pour le Hard Impact [146]. Un *Scotch Tape Test* a été employé pour déterminer la quantité de matière détachée sous la forme de particules lorsque la surface est recouverte d'un ruban adhésif qui est ensuite arraché. Cela a permis de distinguer la qualité des différents mortiers après différents traitements [147].

Dans une étude expérimentale réalisée au Portugal, une méthode d'essai pour déterminer la résistance à l'Impact Resistance de systèmes de crépi a été appliquée aussi bien en laboratoire et que sur des bâtiments réels

[148]. Un martinet Baronnie muni d'une bille d'acier (3 J et 6 J) a été utilisé pour donner de légers coups sur le crépi. L'évaluation des bosses (taille, extension de la zone avec des microfissures) peut ensuite servir à déterminer un paramètre de mesure. Cette méthode a été employée dans l'étude susmentionnée sur les façades de différents types et âges. L'expérimentation avec le martinet est une méthode utile pour caractériser les façades, comme le montrent les comparaisons avec des essais en laboratoire. Cependant, les résultats de l'étude ne fournissent aucune information sur l'effet du vieillissement, car même si les systèmes de crépi testés avaient des âges différents, il ne s'agissait pas des mêmes systèmes. L'étude est intéressante dans la mesure où les énergies d'impact utilisées, de 3 J à 6 J, ont été certes produites avec une bille trop dure, mais se situaient quand même dans la fourchette d'un impact de grêle de classe 3 à 4.

D'autres méthodes d'essai non destructives, dont la thermographie, ont été appliquées pour étudier les ETICS [149]. Au moyen de la thermographie, il été possible de bien localiser les fixations mécaniques (si présentes) et les joints entre les plaques d'isolation thermique.

Ximenes et al. ont étudié la modélisation du vieillissement et de la durée de vie des façades [150]. Sur la base d'un inventaire de bâtiments au Portugal, un système de classification des dommages a été élaboré et appliqué. 170 façades ont été classées et évaluées selon cette méthode. Au moyen de méthodes statistiques, divers facteurs d'influence (distance à la mer, charge supplémentaire d'humidité, type de couche de crépi) ont été analysés pour déterminer dans quelle mesure ils influençaient la courbe maîtresse de dégradation, voir figure 20. Les courbes de dégradation générées donnent l'impression d'un déclin progressif de la fonctionnalité de la façade dans le temps. Toutefois, comme les critères d'évaluation sont principalement fondés sur des aspects esthétiques, il n'est pas possible de conclure que la fonctionnalité technique du système a été réduite en conséquence. Au contraire, le lien avec l'âge n'est pas évident pour les critères techniques, voir figure 21. Selon toute probabilité, une réduction de l'adhérence des ETICS sur le substrat ne devrait pas survenir avant environ 22 ans d'utilisation. L'étude conclut que la durée de vie effective est d'environ 17 ans et qu'elle est moins déterminée par une défaillance technique que par des exigences esthétiques, comme une coloration indésirable.

Antosova a développé une méthode d'évaluation des risques de croissance d'algues sur les ETICS [151]. Lair a également développé une telle évaluation des risques pour les bâtiments combinée à l'AMDE (Analyse des modes de défaillance et de leurs effets) [152]. Delgados, Ramos et al. ont mis au point une méthode statistique pour l'évaluation des risques d'infestation d'algues [134].

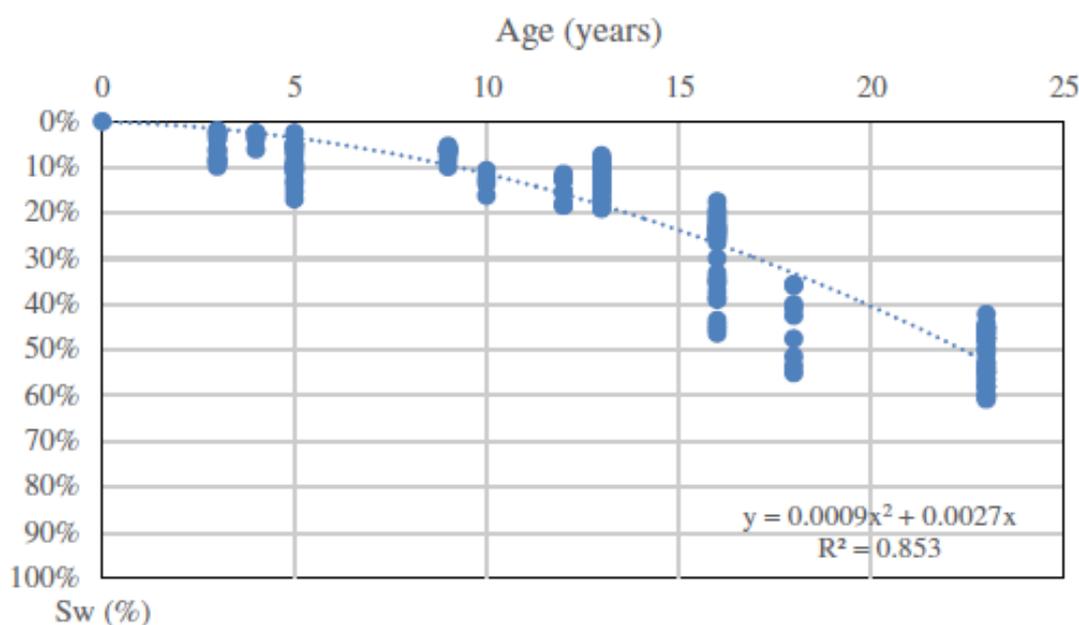


Figure 20 : Courbe générale de vieillissement de 170 façades [150].

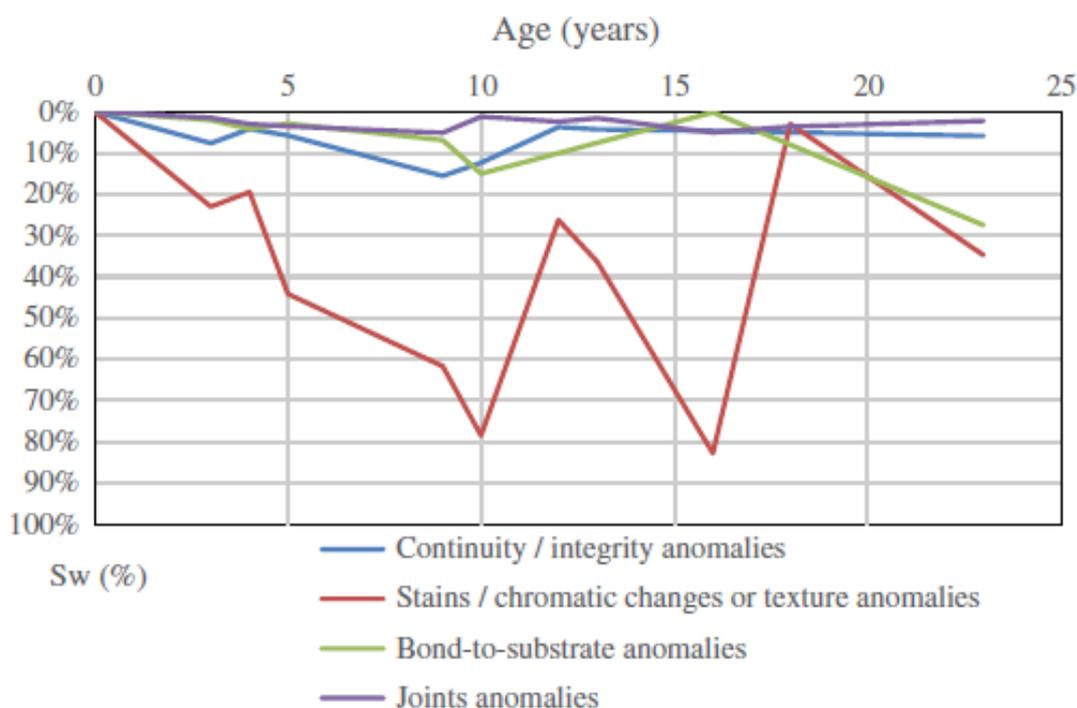


Figure 21 : Courbe de vieillissement selon le critère de dommage [150].

3.2.4 Recherche bibliographique sur le comportement à l'impact des plastiques et des systèmes composites

Même sous une charge relativement lente, les composites tissulaires de différents types de fibres et de matrices présentent des caractéristiques de contrainte-déformation différentes [153]. Le potentiel d'absorption d'énergie diminue généralement à cause de la fragilisation du matériau en fonction du taux de déformation. Par conséquent, dans le cas de processus bien plus dynamiques (comme les tempêtes de grêle), on peut s'attendre à ce que moins d'énergie puisse être absorbée que dans le cas de charges quasi statiques. Un aperçu de la résistance à l'impact des matériaux composites figure notamment dans [154]. Les dé laminages survenant sous charge dynamique entre les différentes couches de matériaux composites renforcés par des fibres, comme ceux qui se produisent lors des essais de choc de grêle [155], sont également être prévisibles avec des simulations FEM [156]. Cependant, une telle prévision nécessite une modélisation correcte du mécanisme d'endommagement, qui peut varier considérablement en fonction du type de laminés et de matériaux utilisés.

Dans un article, Keiller décrit le comportement de résistance à l'impact des ETICS selon un standard britannique de l'époque [157]. D'une part, il simule un choc avec un objet dur (vandalisme, guidon de vélo, etc.) au moyen d'une bille en acier de 0,5 kg tombant d'une hauteur de 0,4 m à 3 m ; le choc souple (corps humain) avec un sac de sable. 34 systèmes d'isolation thermique différents sont examinés et testés sur leur résistance aux chocs. Les manifestations typiques de dommages tels que les fissures circulaires sont décrites. Deux facteurs principaux influençant le comportement d'impact sont identifiés : l'épaisseur de la couche de finition et l'énergie d'impact. Le résultat de l'impact (fissures) dépend d'une manière secondaire de la résistance du crépi.

Franzoni et al. décrivent dans leur étude le profil d'endommagement des ETICS après l'impact selon la norme EN 13497 et la résistance à la pénétration selon EN 13498 pour différents systèmes composites collés [48]. Le comportement à l'impact a été étudié ainsi que d'autres propriétés mécaniques. Les éprouvettes renforcées

par un treillis en fibres de verre ont montré une meilleure résistance à l'impact que celles qui n'étaient pas renforcées. La résistance à la traction du liant a également été déterminée après un vieillissement artificiel. La défaillance s'est produite dans la plaque d'isolation thermique elle-même. La force d'adhérence exigée par la norme EN13499 (80 kPa) est bien atteinte. Pour cette raison, il a été conclu que la couche adhésive n'est pas le maillon faible des systèmes de colle étudiés. L'influence du vieillissement artificiel était différente selon la colle choisie. Des réductions de résistance allant jusqu'à 55 % ont été observées avec des colles de mauvaise qualité, contrairement aux valeurs constantes observées avec des colles de bonne qualité.

Dans leur étude, Naji et Albury ont étudié le comportement d'impact des armatures en ciment renforcées par des fibres de tailles différentes [158]. Dans leur expérience, ils ont simulé l'impact avec un sac de sable de 30 kg d'une hauteur de 20 cm à 50 cm. Cela correspond à un impact plutôt lent et léger, qui ne peut être comparé à de la grêle.

Une étude canadienne s'est penchée sur l'influence des intempéries naturelles sur la résistance à l'impact de huit plastiques disponibles dans le commerce et habituellement utilisés pour les impostes [159]. Les matériaux examinés étaient le PMMA non modifié et modifié, le polycarbonate revêtu et non revêtu (PC), l'ASA et l'ABS, ainsi que deux PVC. La résistance aux chocs de ces matériaux est déjà très différente à l'état neuf. Après 1 à 5 ans d'exposition aux intempéries, elle diminue rapidement ou de manière constante selon le matériau ; tous ces matériaux se fragilisent au fil des années. Une étude relativement récente s'est intéressée à l'influence des intempéries naturelles sur la résistance à la grêle des bardeaux en panneaux de fibres de bois sur une période de 10 à 15 ans [160]. Les chercheurs ont découvert des délaminages causés par des impacts de grêlons.

Une étude très intéressante a exploré la manière dont la résistance aux chocs des systèmes de crépi avec différents liants organiques pouvait être mise en rapport avec d'autres caractéristiques mécaniques [161]. Une série de huit différents systèmes de crépi typiquement utilisés dans les ETICS ont été étudiés en laboratoire. L'évaluation des caractéristiques mécaniques a été réalisée d'une part au moyen d'essais de traction et de flexion en 3 points et d'autre part au moyen d'un *Hard Drop Test* selon ETAG-004. Des propriétés telles que la courbe de contrainte-déformation ont été examinées en fonction de leur pertinence pour la prévision du comportement à l'impact. Une corrélation a été mise en évidence entre la résistance à l'impact et l'énergie dissipée dans les essais de flexion et de traction jusqu'à la rupture. Une résistance élevée à l'impact est expliquée physiquement comme suit : soit le matériau est très ductile à faible résistance, soit il est moins ductile mais possède une résistance élevée. Ces deux propriétés matérielles sont déterminées, entre autres, par la température de transition vitreuse.

L'impact en tant que cas de charge fait aussi l'objet d'essais dans l'ingénierie structurale des aéronefs. Dans un article, l'impact d'une bille d'acier sur une plaque composite a été analysé [162]. Les paramètres admis de la bille d'acier étaient : masse = 1,835g, énergie cinétique = 40 J. L'article montre comment les impacts dynamiques sur les plaques composites peuvent provoquer un délaminage.

3.2.5 Recherche bibliographique sur la résistance à la grêle de l'enveloppe du bâtiment

Le développement du répertoire grêle a été présenté lors la conférence [16]. Les publications de P. Flüeler sur le sujet sont [5, 6, 16, 163-165].

De 1991 à 1993, une installation d'essai de grêle a été mise en place à l'Empa. Sa conception a été basée sur les expériences réalisées avec une version précédente, sur laquelle avaient déjà été effectuées dans les années 80 des expérimentations de tirs sur des briques, des lés d'étanchéité, des membranes en matières synthétiques, des coupoles d'éclairage, des profilés de fenêtres, des tôles et du verre, [166]. À cette époque déjà, des tests étaient effectués sur les ETICS. Cependant, ce système était capable de lancer uniquement des billes en PA d'un diamètre de 40 cm. Les éléments plastiques en PVC et en polyéthylène chlorosulfoné (CSM) ont été testés à l'état neuf et après plusieurs années d'exposition naturelle. Une diminution significative de l'allongement à la rupture a été constatée pour les deux matériaux. Sur la base de ces études, de premières propositions de méthodes d'essai pour déterminer la résistance à la grêle ont été élaborées, [167].

Après la modification de l'installation de l'Empa, la simulation de la grêle a été étendue aux billes de glace dans les années 90. La publication [165] traite des aspects méthodologiques de l'essai avec des boules en PA et des boules de glace et contient un résumé des résultats des essais de grêle effectués sur des éléments de construction fabriqués à partir d'autres matières plastiques.

Des travaux ont été réalisés sur la résistance à la grêle des joints d'étanchéité des bâtiments à toits plats, appelés lés d'étanchéité. Les recherches de Crenshaw et Koontz [62, 168] s'inscrivent dans ce cadre. Les travaux de Koontz, en particulier, sont intéressants, car son programme d'essai comprend également le caoutchouc éthylène-propylène-diène (EPDM), qui a été exposé aux intempéries naturelles pendant 5 à 20 ans et a été testé sur sa résistance à la grêle. Aucun effet du vieillissement sur la résistance à la grêle n'a été observé dans cette étude. À l'Empa, la résistance à la grêle des lés d'étanchéité en bitume et à base de caoutchouc a également été testée, [166].

Herzog et al. ont effectué des essais de grêle sur des revêtements muraux, [169]. Ils ont constaté qu'un revêtement en vinyle était plus vulnérable à la grêle qu'un revêtement métallique en aluminium ou en acier.

Kashiwagi et al. ont effectué une étude de terrain sur une couverture de toit plat en mousse de polyuréthane, en utilisation depuis 15 ans. Ils ont également mesuré la résistance à la grêle et ils ont constaté que les exigences étaient encore satisfaites même après 15 ans ; le toit aurait donc pu servir encore plus longtemps, [170].

Koontz discute de l'effet de la grêle sur les bardeaux et les briques de différents matériaux tels que l'asphalte, le bois et le ciment, [171].

4 EXPÉRIENCES SUR LE VIEILLISSEMENT ET LA RÉSISTANCE À LA GRÊLE DES ÉLÉMENTS DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

4.1 Expériences antérieures conduites par l'Empa

Dans les années 80, l'Empa a mené des recherches approfondies sur les éléments de construction en matière synthétique. Diverses matières synthétiques ont été exposées aux intempéries naturelles et les propriétés des matériaux, dont la résistance à la grêle, ont été mesurées à l'état neuf et après un vieillissement naturel, [166, 167, 172]. Il a été constaté que le PVC et le polyéthylène chlorosulfoné (CSM) subissaient avec l'âge une diminution de l'allongement à la rupture, ainsi qu'une diminution de la résistance à la grêle, voir figure 22. Les autres matériaux testés sur leur résistance à la grêle à ce moment-là étaient le polyméthylmétacrylate (PMMA), le polycarbonate (PC) et le polyester renforcé de fibres de verre (PRV), voir figure 23.

Ces études ont montré que, soumis aux intempéries naturelles, ces matériaux voyaient leur résistance à la grêle diminuer avec le temps.

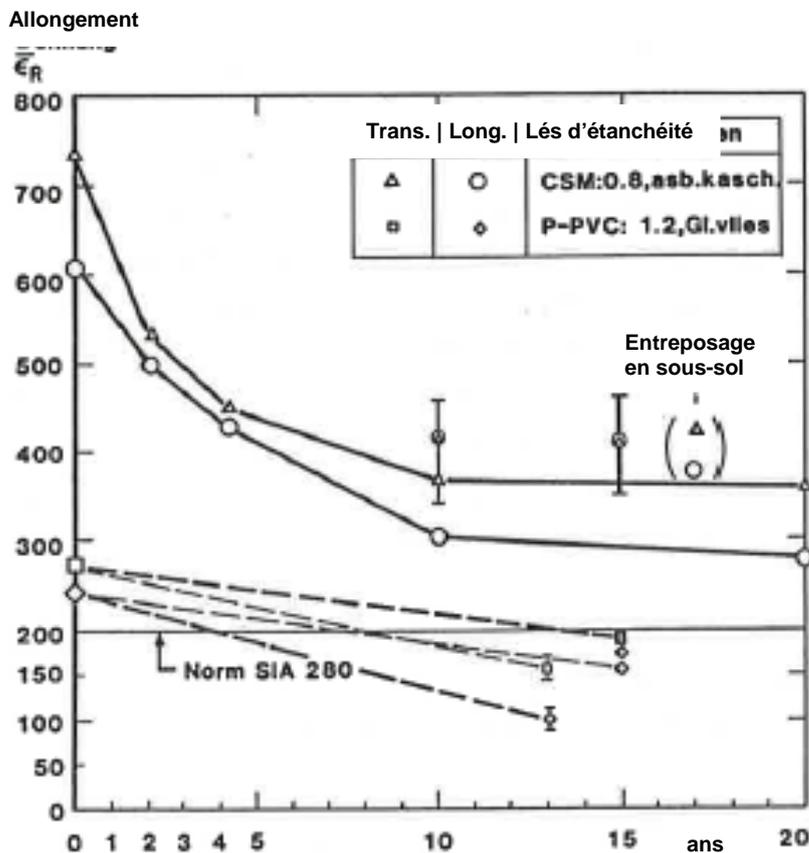


Figure 22 : Lés d'étanchéité en PVC souple et en CSM. Allongement à la rupture et résistance à la grêle selon SIA 280 en fonction de différentes expositions aux intempéries naturelles en Suisse [166].

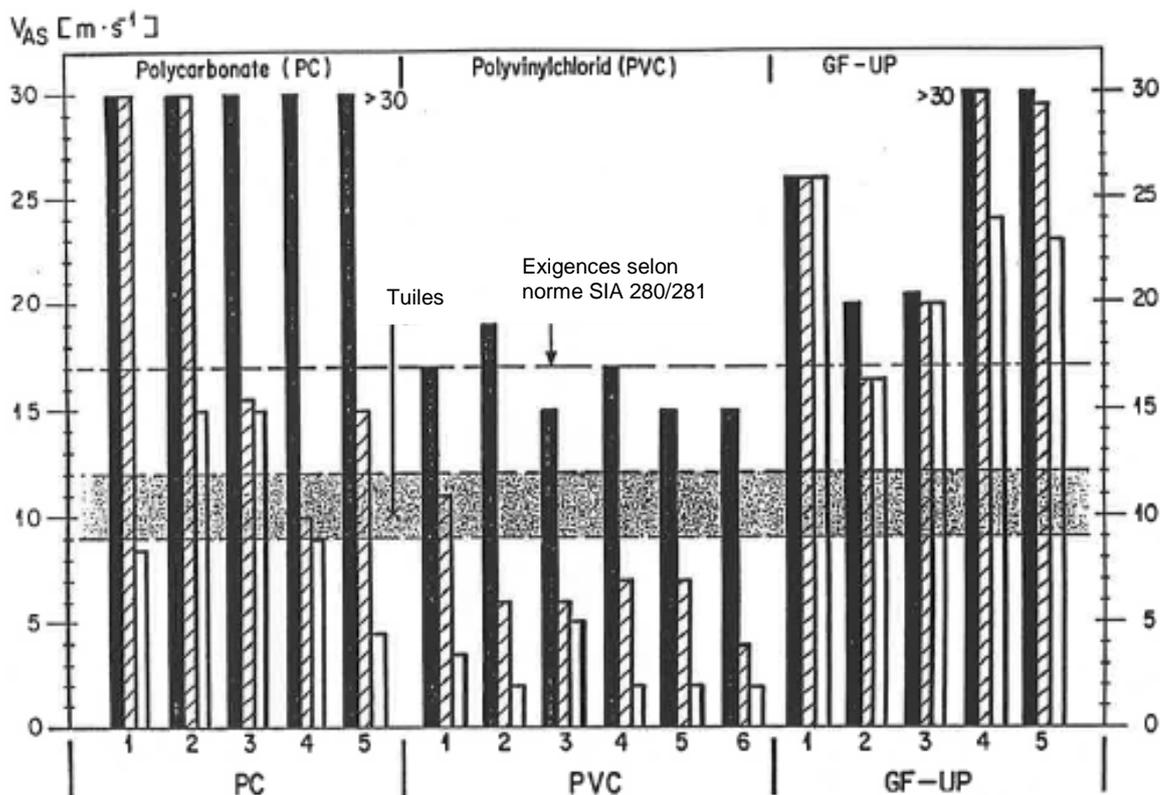


Figure 23 : Résultats obtenus sur des panneaux doubles et des plaques ondulées (PVC), polycarbonate (PC) et polyester renforcé fibre de verre (PRV) : Vitesse d'impact à laquelle les dommages sont observés en fonction de l'âge (neuf, après 2 et après 5 ans d'exposition naturelle) [166].

Une observation intéressante est faite dans le rapport [166] concernant le vieillissement des systèmes de crépi :

Le comportement à long terme des propriétés mécaniques suite à des intempéries naturelles est dans tous les cas difficile à estimer. En ce sens, une étude de l'influence de la proportion de composants organiques dans le crépi en « matière synthétique » et de l'épaisseur du crépi permettrait de mettre en évidence des conclusions intéressantes.

4.2 Expériences menées par le groupe d'experts et le bureau de l'AEAI

Dans le cadre du projet « Influence du vieillissement des matériaux de construction sur la résistance à la grêle » du bureau de l'AEAI, des expériences sur les impacts de grêle ont été réalisées avec des panneaux doubles en polycarbonate et des éprouvettes ETICS vieillies artificiellement. Les premiers résultats ont été présentés lors de la 45^e réunion de la CRP le 19 août 2016 et lors du colloque des organismes d'essai à la grêle les 10 et 11 novembre 2016 à Sursee. Au cours de la première expérience, des panneaux doubles en toiles de PC ont été vieillies artificiellement de 2½, 5 et 7½ ans avant d'être soumis à un essai à la grêle. Lors

de la phase de tir, les chercheurs ont constaté que l'énergie nécessaire pour endommager (fissurer) l'éprouvette diminuait significativement : l'énergie passe de 8,8 J après 2½ ans, ensuite à 5,2 J après 5 ans, puis à 4,0 J après 7½ ans, voir l'annexe 11 au protocole dans [173]:

Vieillessement des matières synthétiques

Réduction massive de la résistance !

6.1 Comparaison du comportement en fonction du temps des panneaux doubles en PC

Résultat après	2,5 ans entreposage A			5 ans entreposage A			5 ans entreposage B		
	v [m/s]	E _{kin} [J]	n =	v [m/s]	E _{kin} [J]	n =	v [m/s]	E _{kin} [J]	n =
Dommages esthétiques			0			0	38.8	29.3	5
Étanchéité			0			0	70.4	103.7	5
Fissures, ruptures	17.9	8.8	5	13.2	5.2	5	71.6	106.7	5

Résultat après	7,5 ans entreposage A		
	v [m/s]	E _{kin} [J]	n =
Dommages esthétiques			0
Étanchéité			0
Fissures, ruptures	12.3	4.0	4

vitesse d'endommagement et énergie cinétique

Figure 24 : Résultats des essais d'impact de la grêle sur des panneaux doubles vieillis en polycarbonate [173].

Vieillessement des matières synthétiques

Réduction massive de la résistance

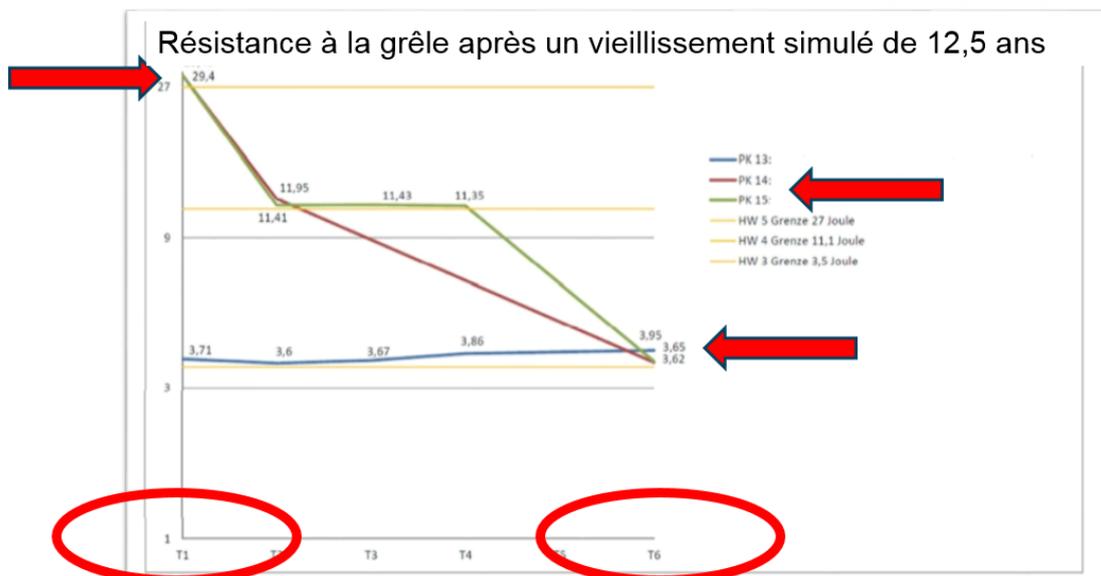


Figure 25 : Résultats des essais d'impact de la grêle sur des ETICS vieillis [173].

Dans la deuxième expérience, les ETICS ont été vieillis artificiellement dans un horizon temporel compris entre 0 et 12½ ans. Dans le cas d'une éprouvette, la résistance à la grêle est restée inchangée pour la classe de résistance à la grêle 3. Deux autres éprouvettes ont vu, à l'état non vieilli, leur résistance de RG 5 diminuer à RG 4 après environ 6 ans, puis à RG 3 après 12½ ans. Ces expériences ont été poursuivies en janvier/février

2017 à l'IBS de Linz, voir l'annexe 11 au protocole dans [173] et sont une indication que le vieillissement peut avoir un effet négatif sur la résistance à la grêle. La mise au point artisanale des éprouvettes représente toujours une difficulté méthodique pour ces procédures d'essai. Les dimensions des différentes couches varient inévitablement et entraînent une divergence relativement considérable dans les résultats d'essai. Par conséquent, une très grande reproductibilité de la production des éprouvettes d'essai serait une condition préalable essentielle pour obtenir des résultats plus solides sur le plan scientifique.

4.3 Expériences menées par les établissements cantonaux d'assurance

Le rapport de synthèse sur le répertoire de protection contre la grêle contient de nombreuses informations précieuses sur le danger de grêle et la résistance de l'enveloppe du bâtiment du point de vue des établissements d'assurance [174]. Ce rapport aborde les dangers de la grêle en Suisse, l'évolution de l'enveloppe du bâtiment et les épisodes de grêle de 2002 et 2004. On y trouve des informations techniques sur les dommages causés par l'exposition à la grêle, la création de simulations d'impacts de grêle en laboratoire et le développement du répertoire grêle de l'AEAI. Dans le même rapport, il est fait mention des archives de l'Empa de 1970 à 2005, qui ont été créées sous la direction de Peter Flüeler. Il est également fait référence au rapport rédigé en allemand « Hagelwiderstand der Gebäudehülle, experimentelle Ermittlung des Hagelwiderstandes (2007) » [*Résistance à la grêle de l'enveloppe du bâtiment, recherches expérimentales de la résistance (2007)*] menée sous la même direction de projet.

Un autre rapport traite en profondeur des épisodes de grêle du 26 mai et du 23 juin 2009 en Suisse [175]. Un paragraphe traite de la question du vieillissement des toitures en fibrociment, mais sans être en mesure de faire des affirmations concrètes sur le sujet (voir page 23, colonne de gauche, dernier paragraphe). Le chapitre 4 fait référence à une influence possible de l'âge (outre l'entretien) sur la vulnérabilité de l'enveloppe du bâtiment. La problématique des dommages subséquents causés par une pénétration ultérieure de l'eau (par ex. éclatements du béton dus au gel) est également abordée. On relève également que même les fissures capillaires, qui peuvent survenir pendant un épisode de grêle, sont capables de causer des dommages subséquents. Toutefois, il n'y est fait aucune mention d'examen plus approfondis.

Le chapitre 6 présente des estimations des coûts économiques de ces épisodes de grêle, ainsi que le potentiel de réduction des dommages des produits de construction testés contre la grêle (RG 3). Dans le dernier chapitre, les auteurs font à nouveau référence à l'effet du vieillissement et concluent que

les effets du vieillissement réduisent la résistance à la grêle de nombreux matériaux (notamment le fibrociment, la brique, le plastique).

Toutefois, ils ne renvoient à aucune référence bibliographique qui pourrait étayer cette affirmation. L'ouvrage de F. Barmet [176] contient plus d'informations sur les impacts de grêle. La directive sur la réglementation des dommages causés par la grêle aux bâtiments stipule que si plus d'un tiers de la surface de la façade est endommagée, il s'agit d'un dommage total [177]. Pour les façades crépies, les dommages mineurs sont considérés comme réparables. En cas de dommages importants, on part du fait que le crépi doit être entièrement enlevé et, selon les circonstances, une nouvelle armature doit être installée, et une nouvelle couche de crépi doit être appliquée. L'établissement cantonal d'assurance d'Argovie tient à jour une base de données sur les sinistres.

4.4 Expériences menées par des experts en enveloppe du bâtiment

Dans le cadre de cette étude, Monsieur R. Büchli a été interviewé par la société « QCexpert AG » (www.qc-expert.ch) le 19.01.2017. Il a travaillé pendant de nombreuses années dans le domaine des dommages aux bâtiments. Selon son expérience, les enduits de façade se divisent en deux groupes : les enduits non organiques et les enduits organiques. Les premiers peuvent également être divisés en systèmes à base de silicates et en systèmes minéraux. On parle de systèmes de crépi à base de matière synthétique lorsque la proportion de composants organiques dépasse 4 %. Selon ses propos, les dommages causés par le vieillissement à l'enveloppe du bâtiment sont principalement provoqués par les cycles de température et d'humidité. Le risque d'endommagement des bâtiments est déterminé en premier lieu par l'épaisseur du crépi utilisé. Pour les sys-

tèmes à base de matière synthétique, une épaisseur minimale de 2 mm est requise, pour ceux à base de minéraux, une épaisseur minimale de 6 à 10 mm est requise. Dans la plupart des cas, les dommages structuraux sont généralement causés par un non-respect de l'épaisseur minimale. La plupart du temps, ces dommages apparaissent après quelques années seulement. La pénétration d'humidité peut faire gonfler ou rétrécir les composants en plastique. Cependant, les dommages les plus fréquents sur les façades sont les algues et/ou les champignons, qui sont visibles par une coloration inesthétique. Ce phénomène est bien documenté, voir p.ex. [94] et, à sa connaissance, il n'existe pas de liens entre les dommages causés par la grêle et le vieillissement des matériaux.

4.5 Expériences menées par les laboratoires d'essai à la grêle

4.5.1 Expériences du IBS Linz

Le 09.02.2017, des essais de grêle sur des ETICS vieilliss artificiellement ont eu lieu à l'IBS de Linz. Dans le cadre d'une visite, des questions sur l'influence du vieillissement sur l'enveloppe du bâtiment ont également été abordées.

Le vieillissement artificiel est décrit dans la directive ETAG [73]. La détermination de la procédure de vieillissement spécifiée dans cette directive n'est pas connue plus en détail. L'ETAG n'est pas une norme, mais des essais et des exigences standard acceptés par la branche dans toute l'Europe. Le vieillissement artificiel consiste en une séquence de cycles de température et d'arrosage. Il s'agit d'expériences très complexes qui ne peuvent être réalisées que dans quelques instituts (par ex. Wacker Chemie AG Burghausen D).

Selon Hans Starl, spécialiste en essais grêle chez IBS depuis de nombreuses années, les tests effectués ont montré une plus grande variation des résultats pour les éprouvettes vieillies que pour les produits neufs. Dans certains cas, des dommages provoquant un délaminage des différentes couches ont également été observés.

Comme la proportion de composants organiques varie considérablement d'un produit à l'autre, les propriétés des ETICS disponibles sur le marché sont très différentes.

Des exemples de cas réels, qui démontreraient l'effet du vieillissement sur la résistance à la grêle, ne sont pas connus. L'importance de l'épaisseur du crépi a également été soulignée. Au fil des ans, on observe une tendance à appliquer à nouveau des couches plus épaisses, après une augmentation des dommages sur les crépis de faible épaisseur. On ne pourrait donc pas conclure à un effet de vieillissement.

L'hypothèse selon laquelle une fragilisation liée au vieillissement des systèmes à base de plastique pourrait survenir n'a jamais été étudiée scientifiquement. Il est connu que les colles à base d'époxy gagnent en dureté et en résistance dans les premiers mois suivant l'application [118]. Le rayonnement UV pourrait être un des facteurs possibles du vieillissement. Cependant, Hans Starl n'est pas au courant de recherches scientifiques à ce sujet.

4.5.2 Expériences menées par FPC

Le 16.02.2017, une rencontre avec Peter Flüeler et Michel Barbezat a eu lieu à l'Empa, lors de laquelle les aspects de la structure, des mécanismes de vieillissement, des méthodes d'essai et des sources bibliographiques ont été discutés.

La thématique a été traitée à l'Empa entre les années 1970 et 1990. Les rapports annuels de l'Empa pour cette période devraient se référer aux rapports de recherche correspondants. Deux des plus importants rapports de recherche sont [166, 167]. Ces rapports décrivent la méthode d'essai à la grêle mise au point à l'Empa. Outre Peter Flüeler et Fritz Rupp, les personnes clés étaient Messieurs Sagelsdorf, Hartmann et Pfefferkorn. Outre le département « Plastiques et Composites » (anciennement département 114), les départements concernés étaient « Chimie » et « Physique du bâtiment » (anciennement département 176). L'Office fédéral des constructions et de la logistique était également engagée dans le projet.

Aujourd'hui à l'Empa, M. Josef Kaufmann, département « Béton et Produits chimiques pour la construction » (département 308), est la personne qui connaît le mieux ces thèmes.

Un important mécanisme de vieillissement dans les systèmes de crépi minéral est l'hydrolyse (fission d'un composé (bio)chimique par réaction avec l'eau). Ce n'est pas un problème pour les systèmes à base de plastique. Par contre, le rayonnement UV naturel est susceptible d'avoir un impact sur ces produits. Les treillis en fibres de verre peuvent être attaqués par la corrosion alcaline.

La série de conférences DBMC est mentionnée comme source d'information. La 14^e conférence a eu lieu du 29 au 31 mai 2017 à Gand en Belgique (www.ugent.be/ea/structural-engineering/en/dbmc2017).

P. Flüeler et al. ont présenté la résistance à la grêle des membranes d'éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) à diverses conférences entre 2007 et 2015, [5, 6, 163, 164, 178]. Ils y attestent les bonnes propriétés physiques et chimiques à long terme de ce thermoplastique. Cependant, un bâtiment équipé de ce matériau a dû être complètement refait après un orage de grêle. Les dommages causés par cet orage ont été dus à la forme irrégulière des grêlons, qui leur a permis de transpercer les membranes [163, 179].

L'article de P. Flüeler cite la construction du toit du nouveau pavillon des éléphants au zoo de Zurich comme un exemple de preuve de résistance à la grêle [164]. Dans une section consacrée au vieillissement et au comportement à long terme, il renvoie à deux autres documents sur ce sujet. Les résultats des essais d'impact de la grêle sur des membranes ETFE de 8 à 22 ans sont documentés comme suit [5, 6]:

5 Ageing and Long Term Expectations

In a previous study 3 existing buildings 8 - 22 years old and covered by ETFE-cushions were investigated to explore the long-term behaviour [9]. Therefore extracted samples were examined in tension and for tear resistance for possible damage and changes in appearance. All samples showed a superior behaviour with only minor reductions of the mechanical-physical properties. Despite of the good long-term behaviour, all three buildings suffered from hail impact damages and as consequently most of the ETFE-cushions had to be replaced [10]. Wind driven debris from surrounding forests with pointed forms perforated very often the membranes in such a manner that replacements were necessary. Also severe snow conditions, its accumulation and clearing from it, have damaged the ETFE-constructions if not specially designed or reinforced.

Ces enquêtes préventives ont été lancées après qu'une autre construction du même zoo (serre Masoala) a été gravement touchée par un orage de grêle en 2002 [163].

Le développement du répertoire grêle a été présenté lors la conférence [16]. Les publications de P. Flüeler sur le sujet sont [5, 6, 16, 163-165].

4.6 Expériences menées par l'Université de Berne

En 2015, une étude a été réalisée à l'Université de Berne sous la direction du professeur Herrweg avec la participation de Roger Zurbruggen [180]. Des éprouvettes d'ETICS, qui ont été exposées aux intempéries naturelles entre 2000 et 2015, soit 15 ans, ont fait l'objet d'essais de résistance aux impacts selon ETAG-004 (billes d'acier de 0,5 kg, 3J et 10 J, orientation à 90°). Chaque éprouvette a également été testée dans le cadre de l'essai de résistance à la grêle. Des éprouvettes du même type ont été conservées dans des conditions contrôlées (23 °C / 50 % h. r.) en tant que groupe de référence. Les éprouvettes étaient essentiellement constituées d'une plaque en fibrociment Eternit pour la sous-construction et d'une plaque d'isolation en EPS enduite des deux côtés de mortier et renforcée d'un côté par un treillis en fibres de verre. Après 15 ans d'exposition aux intempéries extérieures, le crépi extérieur avait presque entièrement disparu. Le résultat de l'épreuve de grêle est résumé comme suit : dans l'essai de grêle, l'éprouvette vieillie naturellement est environ deux fois plus résistante que l'éprouvette entreposée selon la norme. Le long du joint de reprise, l'éprouvette vieillie naturellement est moins résistante. Il en va de même pour le joint vif. Cependant, il faut noter qu'il existait déjà une fissure au centre de l'éprouvette, le long de ce joint. Ces conclusions ne sont pas étayées par des données statistiques. La première conclusion est probablement basée sur l'observation individuelle

après une averse de grêle de 12 J, qui a causé une bosse d'environ la moitié de la profondeur et de la moitié du diamètre de l'éprouvette ; ceci par rapport à l'éprouvette de référence. Il est donc difficile de faire une déclaration générale sur un quelconque effet de vieillissement à partir de cette série d'essais.

C'était l'ancienne société HAGA (www.haganatur.ch) qui avait fourni les produits pour les essais.

4.7 Feed-back d'autres laboratoires d'essai et d'entreprises

Les laboratoires d'essai suivants ont été invités à fournir des informations sur l'influence du vieillissement sur la résistance à la grêle : Egli Engineering AG et TÜV Deutschland. Cependant, ces laboratoires n'ont apporté aucune information significative.

La société TEA AG (www.tea-ag.ch) est spécialisée dans les essais environnementaux des équipements électriques et électroniques dans le cadre de la certification CE. À l'occasion d'un séminaire sur le thème des « tests environnementaux » (Neuhausen am Rheinfall, 2016), différents mécanismes de vieillissement ont été présentés qui pourraient réduire la résistance et la fonctionnalité des produits techniques. Les procédures d'essai accélérées et les méthodes de détection correspondantes ont également été examinées au chapitre 3.2.3.

L'entreprise Sto AG (www.stoag.ch/) est un important fournisseur de systèmes de crépi. Elle organise également des séminaires de formation pour les praticiens. Lors de l'un d'eux, les questions liées à la prévention des dommages aux façades ont été abordées [181]. Un autre séminaire a traité du thème des dommages aux bâtiments et de leur prévention (Niederglatt, 01.03.2017), voir

<http://www.stoag.ch/de/service/weiterbildung/weiterbildung.html>. Cette formation portait sur l'importance d'une installation adéquate des ETICS. Le responsable du séminaire n'avait pas connaissance d'effets du vieillissement sur la résistance à la grêle des systèmes de crépi.

4.8 Nos observations de dommages aux façades

Ci-dessous, des photos de dommages causés aux façades sont présentées pour illustrer l'aspect typique d'une façade de bâtiment qui n'est plus entièrement neuve, dans le sens de « vieillie ».



Figure 26 : Formation de cloques et de fissures, exemple d'un bâtiment à Zurich



Figure 27 : Fissures et éclatements dans la couche de finition d'un mur en pierre crépi à cause de l'humidité excessive et des cycles de gel/dégel, exemple d'un bâtiment à Küsnacht.



Figure 28 : Détails de la figure 29 : écaillage de la couche de peinture et éclatements dans la couche de finition dans la zone d'une fissure étendue.

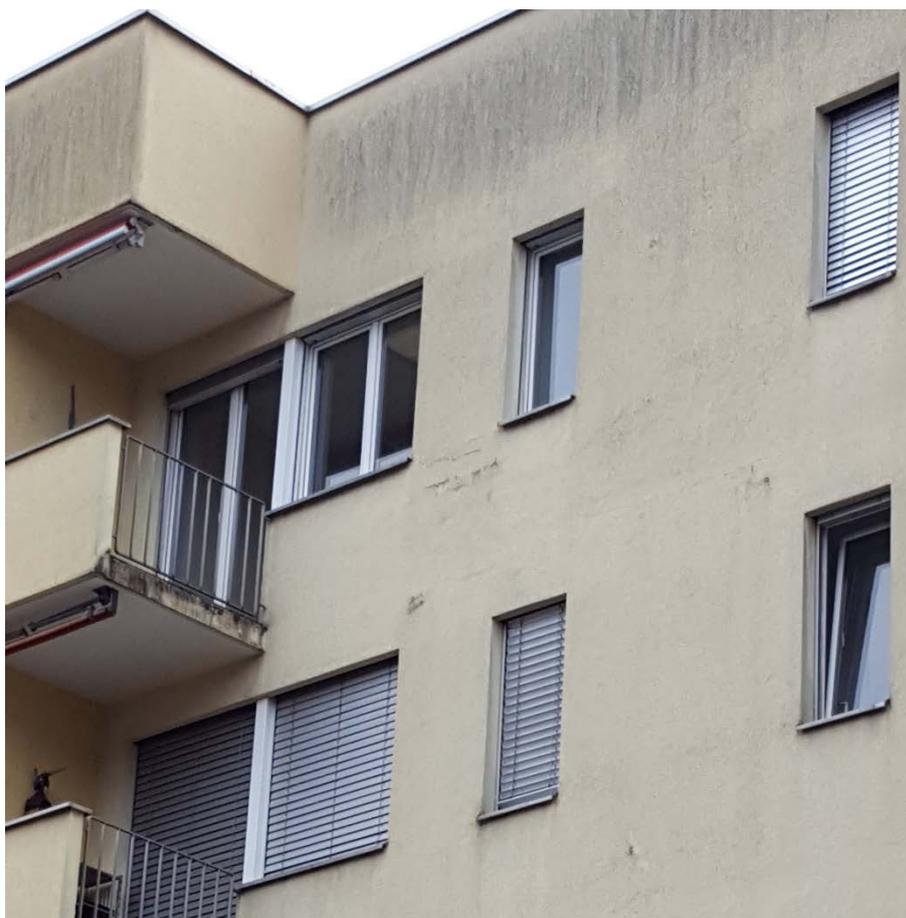


Figure 29 : Coloration de la couche de peinture due à une infestation d'algues, exemple d'un bâtiment à Zurich.



Figure 30 : Éclatement dans les couches de finition sur une façade rénovée avec un ETICS, causé par des dommages mécaniques (marques laissées par l'impact du container), exemple d'un bâtiment à Zurich.



Figure 31 : Éclatement dans la couche de finition dû à des dommages mécaniques (probablement causés par l'impact de raquettes ou d'une pelle à neige) combinés à des cycles de gel/dégel, exemple d'un bâtiment à Grindelwald.



Figure 32 : Éclatement dans la couche de finition dû à des dommages mécaniques (probablement causés par l'impact de raquettes ou d'une pelle à neige) combinés à des cycles de gel/dégel, exemple d'un bâtiment à Grindelwald.



Figure 33 : Éclatement massif dans la couche de finition sur crépi ; probablement dû à une mauvaise combinaison de matériaux (peinture acrylique sur enduit organique?) dans un climat méditerranéen agressif (eau salée et vent), exemple d'un bâtiment à Stromboli (île dans le sud de l'Italie).

Comme le montrent les figures 26 à 33, la cause présumée des dommages est l'exposition naturelle aux intempéries (figure 26, 29 et 33) ou l'humidité excessive (figure 27 et 28). Les éclatements, comme le montrent les photos 30 à 32, peuvent bien sûr être causés par des dommages mécaniques directs, par exemple par des chocs avec des objets durs comme des outils ou des véhicules, etc. Toutefois, ces effets additionnels ne sont pas en réalité des phénomènes de vieillissement du matériau, mais doivent être décrits comme un traitement inadéquat (par exemple, le vandalisme).

5 ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES ET DES EXPÉRIENCES

5.1 État de l'art concernant le vieillissement et la résistance à la grêle

À titre d'exemple sont brièvement présentées ici les connaissances acquises pendant les études en architecture à l'EPFZ, qui représentent les connaissances de base des architectes et l'état de l'art. La question qui se pose ici est de savoir dans quelle mesure les processus de vieillissement font partie des connaissances standard dans la branche. Comme nous nous intéressons en particulier aux matériaux de construction à base de matières plastiques, les documents du cours portant sur les matériaux de construction « Baustoffe II - Polymeric Building Materials » ont fait l'objet d'une recherche plus approfondie [182]. Au chapitre 1.4.1, le vieillissement des polymères dans le contexte de la stabilité chimique est expliqué dans les grandes lignes. Le chapitre 7 traite des matériaux isolants et des lés d'étanchéité, le chapitre 9 des revêtements et le chapitre 10 des colles.

En 2002, l'Empa a organisé un séminaire sur le thème « Quelle est la durée de vie d'un élément de construction en matière synthétique ? ». Les thèmes du comportement à long terme ont été abordés d'un point de vue matériel et technique, tant en théorie que par le biais d'exemples pratiques. Voici une liste des thèmes discutés : le comportement mécanique des matériaux en fonction du temps, le dimensionnement des pièces en plastique pour une utilisation à long terme, l'utilisation des lés d'étanchéité dans le tunnel NLFA ou encore les influences de l'environnement sur les matériaux de construction [183].

L'étude récemment publiée (2016 !) par Franzoni et al. donne un très bon aperçu des connaissances sur l'effet du vieillissement (artificiel) sur le comportement des ETICS [48]. C'est l'une des rares études qui se rapprochent le plus de notre question. L'introduction résume les connaissances existantes du point de vue des auteurs comme suit : la problématique de l'humidité en tant qu'inconvénient des ETICS est abordée dans diverses études. Cette problématique est encore accentuée avec les matériaux d'isolation thermique biologiques comme la laine de bois ou le chanvre, par rapport aux matériaux courants comme le polystyrène, le polyuréthane ou la laine de roche. Les auteurs mentionnent également les connaissances très limitées sur le comportement à long terme de ces systèmes (« ... their effectiveness and long-term behaviour in operational environments is still barely known, to the authors' best knowledge. »). La compatibilité des différents matériaux qui sont réunis dans un ETICS est décisive pour la fonctionnalité de ce dernier. La norme EN 13499 contient des méthodes d'essai pertinentes pour déterminer quelles parties de la fonctionnalité de ces systèmes peuvent être testées. En termes de longévité, les auteurs ne peuvent se référer qu'à trois articles : les travaux de Ximenes et al [150], un article de Sulakatko [184] et l'étude de Norvaisiene [86]. Ce dernier auteur déplore également le manque de connaissances dans ce domaine. Selon Künzle et Zirkelbach dans [87], le consensus qui se dégage est que les ETICS se comportent très bien lorsqu'ils sont appliqués sur des murs en béton ou des façades en maçonnerie. Künzle et Zirkelbach ont étudié l'efficacité des ETICS après 20 ans d'utilisation et prévoient sur cette base une durée de vie allant jusqu'à 60 ans [87].

Selon Franzoni et al., les dommages de construction les plus fréquents sont dus à une mauvaise exécution et rarement à la rétraction du mortier pendant le processus séchage, d'après [125]. Dans son article [89], Stastnik a souligné l'importance de l'épaisseur de couche. Selon M. Zirkelbach [90], une hypothèse d'erreur possible est la perte d'adhérence (pull-off strength) due à la pénétration de l'eau (par le vent et la pluie) dans les ETICS.

Selon Daniotti [7], l'humidité due à la condensation ou à la pluie, associée à la température, aux rayons UV et à la pollution peut provoquer un effet de vieillissement synergique, en particulier dans les couches de finition contenant des composants organiques. D'après lui, il n'est pas forcément possible de faire un pronostic sur la durée de vie en se basant sur des essais ETAG-004 pour des conditions climatiques rudes.

Malheureusement, le comportement à l'impact n'a été examiné dans l'étude que dans un état non vieilli. L'étude s'est concentrée sur les colles et l'effet de vieillissement n'a été examiné que sous l'angle de la résistance à la traction des colles. Une très bonne longévité et une résistance élevée aux intempéries (artificielles) ont été démontrées pour les colles. La défaillance des éprouvettes a toujours été constatée dans le matériau d'isolation thermique et non au niveau de la colle ! Les valeurs mesurées pour la résistance au choc,

la résistance à la pénétration et la résistance à la déchirure étaient généralement beaucoup plus élevées que les valeurs requises selon la norme EN 13499.

Table 8 Tensile bond strength (kPa) of the composite boards subjected to accelerated ageing, compared with unaltered ones (means of at least three samples)

Boards	Unaltered	After freeze–thaw cycles	After thermal ageing	After differential thermal deformation test at 70 °C
XPS-RS	357 ± 31	285 ± 25	339 ± 66	253 ± 25
SPT-S	497 ± 23	377 ± 51	453 ± 96	514 ± 11

Breaking always occurred inside the thermal insulating material

Figure 34 : Extrait de l'étude de Franzoni et al. [48]: résultats des essais de résistance à la déchirure sur des éprouvettes vieilles par rapport à des éprouvettes non vieilles.

L'étude examine de nouvelles approches méthodologiques pour les essais thermomécaniques sur les ETICS. En outre, des ETICS préfabriqués avec une couche de finition en céramique (grès porcelaine) ont été examinés.

5.2 Principales conclusions de la recherche bibliographique

La recherche bibliographique n'a pas donné de résultats d'études publiées concernant un effet possible du vieillissement sur la résistance à la grêle des systèmes de crépi ou des systèmes composites d'isolation thermique.

Ainsi, les essais non publiés de l'IBS de Linz, qui ont été présentés dans le cadre de l'échange d'expériences entre les laboratoires d'essais de grêle, restent la seule référence pour un tel effet (voir annexe 11 au protocole, [173]). Un effet du vieillissement sur la résistance à la grêle a également été démontré dans le même protocole pour les panneaux doubles en polycarbonate.

Franzoni a comparé, avec des éprouvettes n'ayant pas été soumises aux intempéries, la résistance à la déchirure d'ETICS collés après une exposition artificielle aux intempéries [48]. Dans les deux groupes, c'est le matériau isolant qui s'est révélé défaillant et non la colle. Il n'est donc pas possible d'affirmer que les intempéries ont un effet sur la colle. Les valeurs de résistance à la déchirure observées (tant à l'état vieilli que non vieilli) restent nettement supérieures aux valeurs nominales exigées par la norme.

Selon Künzel et Zirkelbach dans [87], le consensus qui se dégage est que les ETICS se comportent très bien lorsqu'ils sont appliqués sur des murs en béton ou des façades en maçonnerie. Künzel et Zirkelbach ont étudié l'efficacité des ETICS après 20 ans d'utilisation et prévoient sur cette base une durée de vie allant jusqu'à 60 ans [87].

L'étude de Ximenes [150] menée sur un groupe de bâtiments au Portugal a révélé que les dommages aux façades augmentaient avec l'âge. Cependant, les critères qui décrivent ces « dommages » ne sont en grande partie que des défauts esthétiques. Les défauts de fonctionnement ne se produisent que ponctuellement. Il n'y a aucune indication d'un effet de vieillissement sur la résistance à la grêle dans cette étude.

Daniotti a soumis des murs crépis à des intempéries artificielles pour étudier les dommages. Les dommages observés sont des cloques (blistering) causées par l'équilibre de l'humidité avec formation de pression de vapeur [7]. Si de telles cloques sont touchées par la grêle, il est fort probable que les dommages causés par la grêle augmenteront. En ce sens, la résistance à la grêle pourrait être réduite par cet effet de vieillissement. Toutefois, cette question n'a pas été étudiée scientifiquement dans l'étude susmentionnée.

5.3 Questions en suspens

Les approches suivantes pourraient constituer des hypothèses possibles pour un traitement ultérieur du sujet. Une diminution de la résistance à la grêle avec l'âge est due aux processus physico-chimiques qui modifient le comportement du matériau. Sont considérés :

- A) Évacuation/absorption de l'eau
- B) Décomposition/dégradation par attaque physico-chimique
- C) Post-réticulation et donc accroissement de la rigidité et, éventuellement, de la fragilisation

Une autre hypothèse est une usure thermohydromécanique causée par les cycles chaud-froid / dégel-gel. Ce phénomène cause :

- a) Formation de pores
- b) Microfissures/délaminage des couches
- c) Rétrécissement/gonflement et contraintes résiduelles résultantes
- d) Pénétration d'eau/accumulation d'eau de condensation suivie de dommages dus au gel (éclatements)

Toutefois, la relation de cause à effet entre ces effets de vieillissement et la résistance à la grêle doit pouvoir être prouvée physiquement : existe-t-il un changement dans l'élasticité/résistance du matériau et donc du produit de construction ? Observe-t-on un changement dans la ductilité ou une fragilisation du matériau ? Est-ce que ce changement réduit une ductilité qui aurait été encore présente à l'état neuf ?

La résistance à la grêle, telle que déterminée dans la simulation de la grêle, est une propriété de l'élément qui dépend du matériau, mais aussi fortement de la structure (géométrie, conditions limites) du produit de construction. Par conséquent, il faut identifier les valeurs caractéristiques du matériau et de la structure qui sont pertinentes dans le processus hautement dynamique des tirs de billes de glace. Il peut s'agir de l'élasticité du matériau, de l'amortissement du matériau, de la densité du matériau (absorption d'eau ?), de mécanismes ou de critères d'endommagement (point de rupture du matériau). Il convient de créer un modèle physique correspondant dans lequel les caractéristiques pertinentes des matériaux sont incorporées.

Tout comme pour le comportement à l'impact des stratifiés sur lesquels différents dommages se produisent selon l'énergie d'impact (fissures de la matrice, détachement des fibres, délaminage à l'intérieur, propagation du délaminage de l'intérieur au côté opposé à l'impact, déchirement de fibres, perforations), les dommages causés aux systèmes de crépi varient aussi selon l'énergie d'impact.

Il faut s'attendre à ce que les propriétés matérielles suivantes des différentes couches de l'ETICS influencent le comportement de leur système et l'altèrent en causant son vieillissement :

- Couche de crépi : module d'élasticité, allongement à la rupture, résistance (cisaillement / flexion), adhérence aux fibres de renforcement, résistance à l'abrasion
- Treillis de renforcement : adhérence au crépi et au substrat (colle ?), sensibilité éventuelle à la fissuration par corrosion sous contrainte.
- Couche adhésive (entre le crépi et le matériau isolant) : adhésion entre les couches, module d'élasticité, résistance à la traction transversale, résistance au cisaillement.
- Matériau d'isolation (p. ex. mousse) : module d'élasticité, absorption d'eau

Les réactions locales à la pression et à la flexion du composite sur le substrat en mousse souple constituent les principaux comportements du système soumis à la charge d'impact. Ces comportements peuvent être altérés par le vieillissement et donc influencer la résistance à la grêle de l'ETICS. Cependant, l'étude bibliographique a surtout montré que très peu d'informations sont disponibles sur le sujet. Quelques études montrent qu'un vieillissement de l'ETICS peut être observé et qu'il est prévisible. La relation avec la résistance à la grêle n'a pas fait l'objet de suffisamment de recherches, à l'exception des plaques PC à double paroi [173] et des quelques données de mesure de l'IBS [173].

D'autres aspects tels que l'angle d'impact et la rugosité de la surface ainsi que la géométrie du grêlon et son influence sur la résistance à la grêle restent également peu recherchés à l'heure actuelle. Surtout, on ne sait pas comment cette influence est affectée par le vieillissement des ETICS.

Les quelques études qui se sont penchées sur l'effet du vieillissement sur les ETICS se sont limitées à l'observation des changements visibles tels que les cloques, les fissures et l'écaillage. Seuls Flores-Colen et al. [148] ont utilisé une méthode d'évaluation quantitative des dommages dus aux impacts. La méthode d'essai de résistance à la déchirure utilisée pour l'assurance qualité (une résistance à la traction macroscopique) est un cas extrême de combinaisons possibles de charges de traction et de poussée telles qu'elles se produisent dans la réalité sur les bâtiments. Étant donné que les averses de grêle ne provoquent pas seulement une charge de traction pure sur l'ETICS, mais aussi une combinaison de charge de traction, de compression et de poussée, on peut se demander si l'essai à la déchirure est la seule méthode d'essai correcte. L'impact de la grêle se traduit plutôt par des bosses, avec tout au plus un délaminage des couches, accompagné de microfissures au niveau de la zone d'impact. Par conséquent, des méthodes d'essai supplémentaires pour l'assurance qualité devraient être mises au point, en plus de l'essai à la déchirure. Une méthode intéressante est certainement le test d'impact avec le martinet Baronnie, qui a déjà été utilisé en laboratoire ainsi que sur des bâtiments réels [148]. Des procédures d'essai sont également nécessaires pour détecter les délaminations internes non destructives. Afin de mesurer la résistance à une propagation d'une délamination circulaire (étape précédant l'apparition d'une cloque), une méthode similaire au Peel Test serait intéressante. La force de charge d'une colle est beaucoup plus élevée lors de l'essai à la déchirure que lors d'un Peel Test, voir figure 31. Dans le premier cas, de nombreuses molécules de la colle sont chargées simultanément, alors que dans le Peel Test, seules quelques molécules sont fortement chargées. Pour la mécanique de rupture, la capacité de charge d'un matériau est examinée au niveau d'une fissure majeure. Pour la résistance statique conventionnelle des métaux, chacune des caractéristiques des matériaux est pertinente pour les deux types de charge, ces caractéristiques ne pouvant être transposées a priori d'un matériau à l'autre. La résistance à la rupture (valeur caractéristique de la mécanique de rupture) n'est pas comparable à la limite de fluage ou au point de rupture (valeur caractéristique de l'essai normal de traction). Ces différences sont encore plus prononcées lorsqu'il s'agit d'influences corrosives, comme l'ont montré des études sur la fissuration par corrosion sous contrainte, voir par ex. [185].

Défaillance de la colle dans le modèle macroscopique

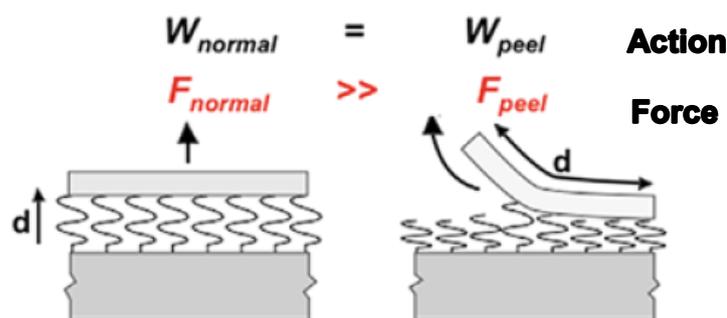


Figure 35 : Valeurs statiques de résistance en fonction du vieillissement artificiel des lamelles de CFRP collées sur béton [186].

5.4 Suite de l'étude

Sur la base des informations disponibles et des résultats de la recherche bibliographique, nous proposons de diviser la suite de l'étude en plusieurs étapes :

Traitement analytique des problématiques (A+B) :

- A) Description de l'événement de grêle en tant que charge dynamique (impact) pour les enveloppes du bâtiment avec détermination des propriétés impliquées pour les matériaux et le système au niveau de l'enveloppe du bâtiment. La structure multicouche, avec les matériaux correspondants et les dimensions typiques, doit être définie, y compris les caractéristiques dynamiques pertinentes du matériau, telles que le module d'élasticité, le module G, la densité, la vitesse du son, l'impédance acoustique, la résistance à la pression hertzienne, la résistance au cisaillement, la résistance à la fissuration et à la propagation d'un délaminage. Outre une modélisation analytique, il serait particulièrement utile de réaliser une étude de sensibilité en simulant le comportement de l'impact à l'aide de la méthode des éléments finis afin de pouvoir estimer l'évolution des propriétés des matériaux par rapport au comportement à l'impact.
- B) Description des mécanismes et des processus de vieillissement possibles, y compris leur superposition et l'estimation de leur effet sur les propriétés du matériau et du système qui sont pertinentes pour la résistance à la grêle. Les processus physico-chimiques possibles à étudier sont : la décomposition chimique, la décomposition photochimique induite par le rayonnement UV, l'oxydation, l'hydratation, la post-réticulation suivie d'un durcissement et d'une fragilisation et d'une attaque alcaline. Les effets physiques importants qui peuvent également influencer les caractéristiques mécaniques des matériaux sont l'absorption d'eau et le comportement au séchage : cet aspect est considéré comme le principal facteur d'influence de la durée de vie des ETICS.
- C) Développement d'essais de matériaux pour évaluer l'état des composants du système et restreindre l'étude du vieillissement artificiel des ETICS à des éprouvettes de petite taille, en vue de limiter les coûts. Le vieillissement artificiel doit être spécifiquement redéfini en termes d'effets attendus, car les méthodes d'essai standard communes (ETAG-004) peuvent ne pas être suffisamment représentatives.
- D) Essais comparatifs sur des bâtiments existants avec des conditions de vieillissement différentes (y compris les orientations géographiques).
 - a. Essais de grêle
 - b. Essais sur des matériaux selon C (caractérisation des composants du système)
- E) Tester éventuellement le vieillissement artificiel des ETICS (essais à grande échelle) sur de petites éprouvettes pour valider l'approche.

6 CONCLUSIONS

L'objectif de ce rapport, formulé au chapitre 1.3, était de résumer, comparer et évaluer l'état des connaissances et des expériences dans le cadre d'une étude bibliographique complétée par des entretiens avec des experts sur le vieillissement des enveloppes de bâtiment, en particulier des systèmes composites d'isolation thermique, et de résumer, comparer et évaluer l'impact de leur vieillissement sur la résistance à la grêle. L'étude bibliographique et l'enquête auprès d'experts indiquent que le vieillissement des composantes des ETICS ne peut pas être exclu. Toutefois, les rares indices d'un éventuel effet du vieillissement n'aboutissent pas à des faits scientifiquement vérifiés et documentés dans des publications scientifiques. Par conséquent, même après cette étude, aucune réponse concluante ne peut être donnée quant à la manière dont ce vieillissement simplement présumé pourrait à lui seul avoir une influence négative sur la résistance à la grêle. Contrairement aux éléments en matière synthétique utilisés notamment dans les impostes et dans les panneaux doubles en PC ou ETFE, pour lesquels le processus de vieillissement et ses effets sur les grêlons ont été étudiés, nous concluons que cette question n'a pas encore été traitée dans la littérature scientifique pour les crépis et les systèmes composites d'isolation thermique. Le fait que l'on sait très peu de choses sur le comportement de vieillissement des systèmes de crépi est également confirmé par une publication récente de Franzoni et al. [48].

Dans l'étude de la littérature scientifique, nous avons trouvé quelques publications précieuses sur le vieillissement des murs extérieurs sous l'effet des intempéries naturelles et artificielles. Des dommages typiques à long terme aux façades ont été documentés, classifiés et évalués dans plusieurs études sur le terrain. Nous avons également relevé quelques publications d'études sur la résistance à la grêle des enveloppes de bâtiments. Cependant, il n'existe que très peu d'indications scientifiquement fondées de mécanismes de vieillissement de nature structurelle ou matérielle qui pourraient passer inaperçus à l'intérieur des couches extérieures d'un mur crépi. En revanche, les effets du vieillissement causés par les rayons UV sont bien connus et bien étudiés dans divers produits en matière synthétique : ils provoquent une fragilisation et des modifications des propriétés visuelles.

L'expérience des experts en sinistres concernant les dommages à long terme aux murs extérieurs crépis dresse un tableau relativement clair : pendant la période d'utilisation, l'humidité peut provoquer la formation indésirable de cloques, de fissures et d'éclatements des couches de finition, en particulier lors des cycles de gel-dégel et de choc thermique. Une exposition excessive et continue à l'humidité peut provoquer des infestations d'algues et de champignons, en particulier dans les systèmes composites d'isolation thermique. Ces symptômes de vieillissement clairement visibles sont avant tout considérés comme des défauts esthétiques et entraînent tôt ou tard des travaux d'entretien, de réparation ou même de rénovation, même sans qu'il y ait eu une averse de grêle. Il n'y a pas d'indices fiables issus de la pratique pour laisser supposer d'autres phénomènes de vieillissement dans les façades. Cependant, on peut supposer que les petits dommages causés par la grêle (fissures de la matrice, détachement des fibres et/ou du matériau de remplissage) qui sont encore invisibles peuvent entraîner des dommages subséquents.

Altérations de la structure des couches extérieures d'une façade, comme les fissures, les cloques, l'écaillage ou l'éclatement de parties entières ne sont pas rares. Elles sont généralement dues aux intempéries naturelles ou à l'humidité excessive du sol. De telles zones endommagées ne sont dans un premier temps qu'un problème esthétique. Si toutefois un événement de grêle se produit, elles forment également des points faibles exposés, qui peuvent alors être aggravés par les impacts de grêle. Il est concevable que cette charge supplémentaire puisse compromettre la fonctionnalité de la façade, ce qui nécessite une réparation immédiate afin d'éviter des dommages subséquents.

La question demeure de savoir dans quelle mesure les propriétés pertinentes du matériau, telles que l'élasticité, la ductilité, la densité et la résistance des différentes couches de matériau dans le composite changent au fil des ans après de tels impacts de grêle. Par conséquent, ces altérations doivent d'abord être examinées, vérifiées et évaluées selon qu'elles ont une influence significative sur la résistance à la grêle afin de déterminer si elles sont pertinentes. Il y a des indications que les couches de colle époxy et les enduits inorganiques subissent une post-réticulation. Il reste à clarifier dans quelle mesure cette transformation chimique s'accompagne d'une fragilisation/réduction de la ductilité et/ou d'une réduction de la flexion/durcissement. Des résultats quantitatifs sur la fragilisation liée à l'âge sont disponibles pour les matériaux polymères courants,

mais pas pour les matériaux utilisés dans les murs extérieurs crépis et encore moins pour leur combinaison spécifique.

C'est pourquoi il est nécessaire d'investir d'autres efforts de recherche en science des matériaux pour permettre d'apporter une réponse définitive à la question de savoir si le vieillissement entraîne une réduction de la résistance à la grêle des ETICS. Une approche possible sous la forme d'un projet de recherche a été décrite au chapitre 5.4.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Beobachter-Ratgeber, *Lebensdauer und Pflege einzelner Bauteile*. 2016.
2. Kempton, J., a. Chap, K., and A. Alani, *Surveyor Element Lifetime Predictions and the Anchoring and Adjustment Heuristic* in *AR2002*. 2002. p. 145 - 154.
3. Moser, K., *Towards the Practical Evaluation of Service Life - Illustrative Application of the Probabilistic Approach*, in *DBMC-8th*. 1999.
4. Rottstegge, J., C. Han, and W. Hergeth, *Compatibility Investigations on Polymer-Fiber-Reinforced Cements Modified with Polymer Latexes*. *Macromolecular materials and engineering*, 2006. **291**(4): p. 345-356.
5. Flüeler, P.H., *Long-term performance of ETFE-buildings and hail impact resistance*, in *SKZ-Tagung*. 2010: Dessau.
6. Flüeler, P.H. and D. Aller, *Long-term expectations and experiences of ETFE-membrane constructions* in *DBMX 12th*. 2011: Porto, Portugal. p. 1029 - 1037.
7. Daniotti, B., R. Paolini, and F. Re Cecconi, *Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS cladding*. *Durability of building materials and components*, ed. V. De Freitas and D. JMPQ. Vol. 3. 2013: Springer.
8. Schmuki, D. *Sonntagsstory: Mit Raketen gegen Hagel*. 2016 [cited 2016 26.01.2017]; Available from: <http://m.srf.ch/meteo/meteo-news/sonntagsstory-mit-raketen-gegen-hagel>
9. MeteoSchweiz. *Extremwertanalyse (Version 2016)*. 2016; Available from: www.meteoschweiz.ch/klima-extreme.
10. Thams, J.C., *Die Ergebnisse des Grossversuches III zur Bekämpfung des Hagels im Tessin in den Jahren 1957-1963 : Schlussbericht*. *Wissenschaftliche Mitteilungen / Eidgenössische Kommission zum Studium der Hagelbildung und der Hagelabwehr*, ed. A. Aufdermaur and H. Schweiz. Eidgenössische Kommission zum Studium der Hagelbildung und der. Vol. Nr. 53. 1966: Zürich : ETH. 32 S.
11. VKF, *Schweizerisches Hagelschutzregister*. 2017, VKF: <http://vkf.ch/kgvonline/media/VKF/Downloads/Hagelschutzregister.pdf>. p. 2.
12. Kant. Gebäudeversicherungen, P., *Geschäftsbericht 2015*. 2015.
13. Glatfelder, *Risk communiqué Hail Damage Prevention Guide*. 2013, Public Practice.
14. Fennig, D., *Forecast Report on United States Hail Loss Claims*. 2016.
15. Kant-Gebäudeversicherungen, *Ereignisanalyse Hagel 2011*. 2015.
16. Flüeler, P.H., *Switzerland: Public Register for Hail Impact Resistant Building Materials Created*. 2009.
17. Kunz, H., *Probleme mit verputzter Aussenwärmedämmung = Problèmes liés à l'isolation thermique extérieure enduite*. *Baumängel, Behebung und Vorbeugung*. Vol. 12. 1984: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 82 S.
18. Walker, R. and S. Pavía, *Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings*. *Building and environment*, 2015. **94**(P1): p. 155-165.
19. Pasztory, Z., et al., *Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls*. *Energy and buildings*, 2012. **49**: p. 142-147.
20. Handler, S., A. Korjenic, and T. Bednar, *Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen auf das Sommerverhalten von Gebäuden*. *Bauphysik*, 2011. **33**(4): p. 225-233.
21. Fülle, C. and N. Leopold, *WDVS im Holzbau - Optimierter Nachweis des dauerhaften Witterungsschutzes durch Kombination von Messungen im Wandprüfstand und hygrothermischen Simulationen*. *Bauphysik*, 2016. **38**(3): p. 135-146.
22. Bannwitz, R., *Schadensprävention Fassade*. 2017.
23. Sto_AG, *Produktprospekt für StoElasto*. 2017.
24. Sto_AG, *stoRend Render Systems*. 2016.
25. Bleuzen, M., *Much adhesion with low amounts: Combining technologies for good cost performance balance*. *European Coatings Journal*, 2009(12): p. 98 - 101.
26. Bleuzen, M., *A longer life for masonry paints*. *European Coatings Journal*, 2011(11): p. 34 - 37.

27. Christopher, K., et al., *Synthesis and characterization of polystyrene-acrylate/polysiloxane (PSA/PSi) core shell polymers and evaluation of their properties for high durable exterior coatings*. Progress in organic coatings, 2014. **77**(6): p. 1063-1068.
28. Overbeek, A., *Studies for a new generation of acrylic binders for exterior wood coatings*. Macromolecular symposia, 2002. **187**: p. 177-186.
29. Sulakatko, V., I. Lill, and E. Liisma, *Analysis of On-site Construction Processes for Effective External Thermal Insulation Composite System (ETICS) Installation*. Procedia Econ. Financ., 2015. **21**: p. 297-305.
30. Sulakatko, V., I. Lill, and E. Witt, *Methodological Framework to Assess the Significance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) on-site Activities*. Energy Procedia, 2016. **96**: p. 446-454.
31. Künzel, H., *Funktionsweise und normative Behandlung von zweilagigen Aussenputzen*. Bauphysik, 2009. **31**(5): p. 326-331.
32. Künzel, H.S., K.P., *Neufassung von DIN 4108-3 zur rechnerischen Feuchteschutzbeurteilung*. 2015.
33. Kolaitis, D.I., et al., *Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings*. Energy and Buildings, 2013. **64**: p. 123-131.
34. Dylewski, R. and J. Adamczyk, *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*. Building and Environment, 2011. **46**(12): p. 2615-2623.
35. SIA, *Verputz- und Trockenbauarbeiten = Plâtrerie, crépissage, construction à sec = Opere da gessatore - Intonaci e costruzione a secco*. Norm / SIA Bauwesen, ed. A.-V. Schweizerischer Ingenieur- und. Vol. SIA 242:2012. 2012: Zürich : SIA. 28 S.
36. SIA, *Verputzte Aussenwärmedämmung : Leistung und Ausmass : verlängerte Vernehmlassung*. Ausg. 1998 ed. Empfehlung / SIA, ed. A.-V. Schweizerischer Ingenieur- und. Vol. V 243/2, Ed. 1998. 1998: Zürich : SIA. 12 S.
37. VKF, *Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes - Allgemeiner Teil A*. 2014.
38. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 00b - Allgemeiner Teil B*. 2010.
39. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 08 - Putz auf Aussendämmung*. 2014.
40. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 21 - Putz auf festem Untergrund*. 2014.
41. Deutsche_Norm, *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel*. 2010.
42. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Aussen- und Innenputzen - Teil 1: Aussenputze*. 2016.
43. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil2: Innenputze*, in EN 13814-2(2016). 2016.
44. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Aussenputze*. 2014.
45. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze*. 2015.
46. Deutsche_Norm, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe*. 2015, DIN.
47. Deutsche_Norm, *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) aus expandiertem Polystyrol - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13499:2003*. 2003.
48. Franzoni, E., et al., *A new prefabricated external thermal insulation composite board with ceramic finishing for buildings retrofitting*. Materials and Structures, 2016. **49**(4): p. 1527-1542.
49. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for buildings - External thermal insulation composite systems (ETICS) based on expanded polystyrene - Specification; German version EN 13499:2003*. 2003.
50. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the tensile bond strength of the adhesive and of the base coat to the thermal insulation material; German version EN 13494:2002*. 2002.
51. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the pull-off resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS) (foam block test); German version EN 13495:2002*. 2002.

52. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the mechanical properties of glass fibre meshes as reinforcement for External Thermal Insulation Composite Systems with renders (ETICS); German version EN 13496:2013*. 2013.
53. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to impact of external thermal insulation composite systems (ETICS); German version EN 13497:2002*. 2002.
54. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to penetration of external thermal insulation composite systems (ETICS); German version EN 13498:2002*. 2002.
55. EN, *Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of hail resistance*. 2011.
56. Deutsche_Norm, *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance, German version EN 12667:2001*. 2001.
57. ASTM, *Standard Test Method for Hail Impact resistance of Aerospace Transport Enclosure*. 2005.
58. ASTM, *Standard Practice for Determining Resistance of Solar Collector Covers to Hail by Impact With Propelled Ice Balls*. 2015.
59. ASTM, *Standard Test Method for Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls*. 2015.
60. ANSI, *Test Standard for Impact Resistance Testing of Rigid Roofing Materials by Impacting with Freezer Ice Balls*. 2011.
61. Approvals, F., *Approval Standard for Class 1 Exterior Wall Systems*. 2005.
62. Crenshaw, V. and J.D. Koontz, *Simulated Hail Damage and Impact Resistance Test Procedures for Roof Coverings and Membranes*. 2000.
63. Crenshaw, V., *Major Building Code Requirements for Impact Resistance of Low-Slope-Roofing Systems - A Review and Comparison of Test Procedures*. 2008.
64. Kirschner, A.V. and H. Harmuth, *Untersuchung des Haftversagens von Außenputzen*.
65. EOTA, *Determination of impact resistance of panels and panel assemblies*. 2003, European Organisation for Technical Assessment.
66. EOTA, *Determination of the resistance to delamination*. 2004.
67. EOTA, *Determination of the resistance to dynamic indentation*. 1999.
68. EOTA, *Exposure procedure for artificial weathering*. 2004.
69. EOTA, *Exposure procedure for accelerated ageing by heat*. 2004.
70. EOTA, *Exposure procedure for accelerated ageing of glass reinforced unsaturated polyester resins by two-hour water boil*. 2004.
71. EOTA, *Test method for elastomeric insulating elements – Determination of creep*. 2011.
72. EOTA, *Test methods for foam adhesives for External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*. 2014.
73. ETAG, *Leitlinie für die europäische technische Zulassung - Aussenseitige Wärmedämmverbundsysteme mit Putzschicht (External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering)*. 2013.
74. Liisma, E., *Defect analysis of renovated facade walls with etics solutions in cold climate conditions - CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*. 2016. 174-181.
75. ISO, *Performance standards in building – presentation of performance levels of façades made of same-source components*. 1986.
76. ISO, *Facades - Impact Resistance Tests*.
77. ISO, *ES ISO 7892 (2012): Vertical building elements - impact resistance tests - impact bodies and general test procedures*. 2012.
78. SMGV, *Merkblatt Renovation und Aufdopplung von verputzten Aussenwärmedämmungen*, G.T.K. Gipsergewerbe, Editor. 2016.
79. Cemex_Mortars, *Properties of Rendering Mortar*. 2016.
80. Neuer, F.X., *Nachhaltige Fassadensanierung*. Technikforum / Farben, Lacke, Bauschutz, 2013.
81. Bussell, S., *Green minerals solution*. Polymers paint colour journal, 2009. **199**(4543): p. 22-25.

82. Pashkevich, S., et al., *Pore Structure Formation of Modified Cement Systems Hardening over the Temperature Range from +22°C to -10°C Architecture, Building Materials and Engineering Management IV*. Vol. 584-586. 2014. 1659-1664.
83. Silva, C.M., I. Flores-Colen, and S. Gaspar, *Numerical analysis of renders' adhesion using an interface model*. Construction and Building Materials, 2013. **38**: p. 292-305.
84. DBMC_8th. *Durability of Building Materials and Components 8th*. in *Durability of Building Materials and Components 8th*. 1999. Vancouver, Canada: National Research Council Canada.
85. Kunz, H., *Problematik und Bedeutung der Mängel im Bauwesen*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung, 1981. **1**.
86. Norvaišiene, R., et al., *The Changes of Moisture Absorption Properties during the Service Life of External Thermal Insulation Composite System*. Medžiagotyra, 2013. **19**(1): p. 103-107.
87. Künzel, H. and D. Zirkelbach, *Influence of rain water leakage on the hygrothermal performance of exterior insulation systems*, in *8th Nordic Building Physics Symposium*. 2008: Copenhagen.
88. Vašková, A., et al., *Fallstudie zum Trocknungsverhalten von Außenwandkonstruktionen aus Porenbeton mit Wärmedämmverbundsystem*. Bauphysik, 2016. **38**(6): p. 378-388.
89. Stastnik, S., et al. *Computational Evaluation of the Effect of the Outer Layer Thickness on Moisture Saturation in the ETICS Insulations*. in *ICNAAM 2011: International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics*. 2011.
90. Zirkelbach, D., A. Holm, and H. Künzel, *Influence of temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS*, in *10th DMBC int. conf.* 2012: Lyon.
91. Künzel, H. and R. Wieleba, *Specific building-physical properties of ETICS on mineral-wool basis*, in *4th congresso portugues de le argamassas e ETICS*. 2012: Coimbra.
92. Sell, J. and B. Haller, *Wetterbeanspruchung und Wasserdampfdiffusion = Sollicitation aux intempéries et diffusion de la vapeur d'eau*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. Band 3. 1981: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 73 S.
93. Preisig, H., G. Lanfranconi, and B. Haller, *Wasserinfiltration im Hochbau = Infiltration d'eau dans le bâtiment*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung, 1982. **6**: p. 73 S.
94. Büchli, R. and P. Raschle, *Algen und Pilze an Fassaden : Ursachen und Vermeidung*. 3., durchgesehene Aufl. ed, ed. R. Büchli. 2015: Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag. 109 S.
95. von Werder, J., H. Venzmer, and R. Černý, *Application of fluorometric and numerical analysis for assessing the algal resistance of external thermal insulation composite systems*. Journal of building physics, 2015. **38**(4): p. 290-316.
96. Kučeriková, V., et al., *Analysis of the Degradation of External Plasters in the Buildings with ETICS - EnviBUILD 2014*. Vol. 1041. 2014. 15-18.
97. Flores Colen, I., J. de Brito, and V. de Freitas, *Stains in facades' rendering – Diagnosis and maintenance techniques' classification*. Construction & building materials, 2008. **22**(3): p. 211-221.
98. Gaspar, P. and J. de Brito, *Mapping defect sensitivity in external mortar renders*. Construction & building materials, 2005. **19**(8): p. 571-578.
99. Freitas, S.S.D., S. de Freitas, and V. de Freitas, *Cracks on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue*. Structural Survey, 2016. **34**(1): p. 57-72.
100. Porubsky, R., F. Theiler, and H. Kunz, *Schäden an Fassaden = Désordres dans les façades*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. Behebung und Vorbeugung, Band 2. 1981: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 71 S.
101. Liu, Y., et al., *Bond performance of thermal insulation concrete under freeze-thaw cycles*. Construction & building materials, 2016. **104**: p. 116-125.
102. Kunz, H., *Verputzschäden = Dégâts aux crépis*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 14. 1985: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 73 S.
103. Kunz, H., *Risse im Mauerwerk und ihre Auswirkungen = Fissures dans la maçonnerie et leurs effets*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 15. 1985: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 65 S.
104. Amaro, B., et al., *Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls*. Journal of civil engineering and management, 2014. **20**(4): p. 511-526.
105. Barreira, E. and V. de Freitas, *Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*. Building and environment, 2013. **63**: p. 31-39.

106. Gaspar, P. and J. de Brito, *Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators*. Building and environment, 2008. **43**(11): p. 1818-1828.
107. Stazi, F., C. Di Perna, and P. Munafò, *Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations*. Energy and buildings, 2009. **41**(7): p. 721-731.
108. D'Orazio, M., et al., *Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks*. Building and environment, 2014. **77**: p. 20-28.
109. Maggi, P.N. and e. al, *Experimental Program to Evaluate Building Elements Service Life: First Results on Brickwork*, in *DBMC-8th*. 1999.
110. Wonneberger, B. and S.A. Bortz, *Comparing Laboratory and Field Durability Testing of Stone*, in *DBMC-8th*. 1999.
111. Bollmann, U., et al., *Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions*. Environmental science & technology, 2016. **50**(8): p. 4289-4295.
112. Liisma, E., G. Lõhmus, and L.-M. Raado, *The Effect of Temperature and Humidity on the Permanence of External Thermal Insulation Composite Systems*. Procedia Engineering, 2015. **108**: p. 340-348.
113. Vallee, F., M. Rubaud, and e. al, *Investigation on the Behaviour of Polymer-cement Composites in ETICS Renderings*, in *DBMC-8th*. 1999.
114. ISO, *ISO-6241: Environmental Degradation Agents*.
115. Carbotech_AG, *Langzeitverhalten von EPS-Dämmstoffen*. 2004.
116. Venta, G.J., J.F. Porter, and M. Pierson, *Composite Scrim Reinforced-Cementious Boards: Accelerated Aging and Performance Prediction*, in *DBMC-8th*. 1999.
117. Knotek, V., *Flexible binders, their degradation and impact on cement substrate | Pružné tmely, jejich degradace a vliv na cementový podklad*. Korozie a ochrana materiálu, 2015. **59**(1): p. 24-29.
118. Baier, A. *Verstärken von Gebäuden und Infrastruktur mit Klebetechnologie*. in *SVMT Tag der Werkstoffe*. 2017. Zürich: SVMT.
119. Reyer, E., *Expansion joints in external thermal insulation composite systems with finishing cover made out of clinker-furring bricks - Arrangement at building coigns and plains | Dehnungsfugen in WDVS mit Klinker-Riemchen zum Erfordernis im Bereich der Gebäude-Ecken und in den Feldern*. Bautechnik, 2003. **80**(11): p. 796-814.
120. Reyer, E., *New results on the capability of External Thermal Insulation Composite Systems to rehabilitate Large-Panel-Structures | Neue Ergebnisse zur Eignung von Wärmedämm-Verbundsystemen bei der Sanierung von Großtafelbauten*. Bautechnik, 1997. **74**(1): p. 33-41.
121. Fouad, H.A., *New numerical modelling of external thermal insulation composite systems to judge their capability to rehabilitate Large-Panel-Structures | Numerisches Modell für Wärmedämm-Verbundsysteme Beurteilung ihrer Fugenüberbrückungsfähigkeit bei der Sanierung von Großtafelbauten*. Bautechnik, 1997. **74**(8): p. 505-516.
122. Xiong, H., *Analysis on temperature field of external thermal insulation composite systems with colorful steel plate*. 建筑材料学报, 2016. **19**(4): p. 688-693.
123. Xiong, H., et al., *Experimental Study on Hygrothermal Deformation of External Thermal Insulation Cladding Systems with Glazed Hollow Bead*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**: p. 1-14.
124. Kirschner, A.V. and H. Harmuth, *Mechanisms to reduce cracking in interior plasters attached to cement bonded permanent shuttering panels*. Construction and Building Materials, 2008. **22**(2): p. 99-105.
125. Nilica, R. and H. Harmuth, *Mechanical and fracture mechanical characterization of building materials used for external thermal insulation composite systems*. Cement and concrete research, 2005. **35**(8): p. 1641-1645.
126. Bohner, E. and K. Ödeen, *Durability of autoclaved aerated concrete*, in *DBMC-8th*. 1999.
127. Zurbruggen, R. and M. Herwegh, *Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling*. Materials and Structures, 2016. **49**(5): p. 1917-1933.
128. Djuric, Z., et al., *Modelling of the saturation behaviour of hardened*

cement paste during freezing and thawing action, in *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems – Strauss, Frangopol & Bergmeister (Eds)*

© 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62126-7. 2013.

129. Blaich, J., *Kriechen, Schwinden, Quellen im Hochbau = Fluage, retrait, gonflement dans le bâtiment*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 5. 1982: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 83 S.
130. Yin, X., et al., *Weatherability studies on external insulation thermal system of expanded polystyrene board, polystyrene granule and polyurethane foam*. Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science Edition, 2010. **25**(6): p. 1027-1032.
131. Barreira, E., et al., *Drying Kinetics of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) - Diffusion in Solids and Liquids VII*. Vol. 326-328. 2012. 662-667.
132. Barreira, E. and V. de Freitas, *External Thermal Insulation Composite Systems: Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. **2014**: p. 1-16.
133. Barreira, E., et al., *Exterior condensations on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon*. Journal of building performance simulation, 2013. **6**(5): p. 337-345.
134. Delgado, J.M.P.Q., et al., *Probabilistic Risk Assessment Methodology of Exterior Surfaces Defacement Caused by Algae Growth*. Journal of construction engineering and management, 2014. **140**(12): p. 05014012.
135. Norvaišiene, R., *Durability tests on painted facade rendering by accelerated ageing*. Medžiagotyra, 2010. **16**(1): p. 80-85.
136. Norvaišiene, R., et al., *Impact of acidic precipitation to ageing of painted facades' rendering*. Building and environment, 2007. **42**(1): p. 254-262.
137. Schulz, U. and e. al, *Service Life Prediction of Polymeric Building Materials Using the "Acid Dew and Fog Test"*, in *DBMC-8th*. 1999.
138. Tjandraatmadja, G.F. and e. al, *The effects of Ultraviolet Radiation on Polycarbonate Glazing*, in *DBMC-8th*. 1999.
139. Tiganis, B.E. and L.S. Burn, *The Effect of Heat Aging on Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Blends*, in *DBMC-8th*. 1999.
140. Sivaramakrishnan, C.N., *Binders for pigment printing*. Colourage, 2006. **53**(11): p. 84-86.
141. Drevelle, C., et al., *Influence of ammonium polyphosphate on the mechanism of thermal degradation of an acrylic binder resin*. Journal of applied polymer science, 2004. **94**(2): p. 717-729.
142. Gerst, M., *Zero-emission acrylic thermoset technology - 9th Annual Automotive Composites Conference and Exhibition, ACCE 2009*. 2009. 522-530.
143. Sperry, P.R. and A. Mercurio, *Exterior Durability of TiO2 Pigmented Acrylic Coatings*. American-Chemical-Society, 1970. **30**(1): p. 400 - 417.
144. Gričiūtė, G., G. Gričiute, and R. Bliudzius, *Study on the microstructure and water absorption changes of exterior thin-layer polymer renders during natural and artificial ageing*. Medžiagotyra, 2015. **21**(1): p. 149-154.
145. Association, I.R.a.C., *Impact Resistance of EWI Systems*. 2011.
146. Burt, R., *Test report Elastikote 1000 according to impact resistance of prepared roof covering materials (UL 2218)*. 2010.
147. Drdáčký, M., et al., *Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces*. Materials and Structures, 2015. **48**(6): p. 1947-1963.
148. Flores-Colen, I., J.d. Brito, and V.d. Freitas, *Expected render performance assessment based on impact resistance in situ determination*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(9): p. 2997-3004.
149. Simões, N., et al., *Thermographic inspection of external thermal insulation systems with mechanical fixing - Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*. Vol. 9485. 2015. 94851A.
150. Ximenes, S., et al., *Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls*. Materials and Structures, 2015. **48**(7): p. 2235-2249.
151. Antošová, N., K. Minarovičová, and D. Kubečková, *Risk Assessment of Biocorrosion Recurrence of ETICS - Contemporary Problems in Architecture and Construction*. Vol. 1020. 2014. 631-636.
152. Lair, J. and J.F. Le Teno, *Durability Assessment of Building Systems*, in *DBMC-8th*. 1999.

153. Bergmann, T., S. Heimbs, and M. Maier, *Mechanical properties and energy absorption capability of woven fabric composites under $\pm 45^\circ$ off-axis tension*. Composite Structures, 2015. **125**(2015): p. 362-373.
154. Cantwell, W.J. and J. Morton, *The impact resistance of composite materials - a review*. Composites, 1991. **22**(5): p. 347-362.
155. Dolati, S., A. Fereidoon, and A.R. Sabet, *Experimental investigation into glass fiber/epoxy composite laminates subjected to single and repeated high-velocity impacts of ice*. Iranian Polymer Journal (English Edition), 2014. **23**(6): p. 477-486.
156. Elder, D.J., et al., *Review of delamination predictive methods for low speed impact of composite laminates*. Composite Structures, 2004. **66**(1-4): p. 677-683.
157. Keiller, A.P., *Impact Resistance of External Thermal Insulation Systems*. 1980.
158. Naji, B. and D. Albury, *Characterization of Impact in Fibre-Reinforced Cement Corrugates*, in *DBMC-8th*. 1999.
159. Yamasaki, R.S., *Effect of Weathering at Different Exposure Angles on the Tensile Impact Resistance of Thermoplastics*. Journal of testing and evaluation, 1982. **10**(4): p. 156-161.
160. Bennett, B.J., J. Staebler, and S.C. Stoll, *Hail impact testing of Masonite Shingles*. Forensic Eng. , 2015. **2015**: p. 242 - 253.
161. Petit, J.-Y. and E. Wirquin, *Characterising impact resistance of latex-cement mortars for external insulation systems*. Advances in Cement Research, 2014. **26**(1): p. 21-28.
162. Heimbs, S., S. Heller, and P. Middendorf, *Simulation of Low Velocity Impact on Composite Plates with Compressive Preload*. Material II - Composites, 2008: p. D-II-11 - 24.
163. Flüeler, P.H., *ETFE-membrane structures - and what's about hail impact resistance?*, in *Intl. Convention & Trade show, RCI-Symposium 2007*: Orlando, FL, USA. p. 31 - 37.
164. Flüeler, P.H., W. Kübler, and A. Hohl, *Hail Impact Resistant ETFE Roof Lights for the New Elephant Park of Zoo Zurich*, in *ICBEST 2014*. 2014: Aachen, Germany.
165. Flüeler, P.H., et al., *Hail Impact resistance of Building Materials Testing, Evaluation and Classification*, in *11th CDBM*. 2008: Istanbul.
166. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *Zum Hagelschlagverhalten von Elementen der Gebäudehülle, insbesondere von solchen aus Kunststoffen*. 1987, Empa Abt. 114.
167. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *Hagelschlagversuche an Baumaterialien an der Empa*. 1988.
168. Koontz, J.D. *Hail Impact Testing of EPDM Roofs Assemblies*. in *RCI*. 2009. dallas, Texas, USA.
169. Herzog, R.F., et al. *Ice Ball Impact Testing of Siding*. in *RCI*. 2012.
170. Kashiwagi, D., et al., *Hail Study on a 15 Year Old Sprayed Polyurethane Foam Roofing System*. CIBW117.com, 2016: p. 106 - 116.
171. Koontz, J.D. *What are the Effects of Hail on Residential Roofing Products?* 1991.
172. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *The hail resistance of plastic components of the building shell*. International Journal of Roofing Technology, 1990. **2**: p. 88 - 95.
173. Jordi, M., *Protokoll des Erfahrungsaustausches unter den Prüstellen*, in *VKF-Erfahrungsaustausch*. 2016, VKF.
174. Präver, *Synthesebericht Elementarschutzregister Hagel*. 2007, Präventionsstiftung der Kant. Gebäudeversicherungen.
175. Kant-Gebäudeversicherungen, *Ereignisanalyse Hagel 2009*. 2012.
176. Barmet, F., *CAS Gebäudeschutz gegen Naturgefahren*, in *Architektur, Holz und Bau*. 2015, Berner Fachhochschule.
177. Schweiz.-Versicherungsverband, *Richtlinien zur Regulierung von Hagelschäden an Gebäuden*. 2015.
178. Flüeler, P.H., W. Kübler, and A. Hohl. *Hail Protected ETFE-Roof Lights for the new Elephant Park Building of Zoo Zurich*. in *XIII DBMC*. 2014.
179. Flüeler, P.H. and D. Aller, *Long-Term Expectations and Experiences of ETFE-Membrane Constructions*. DBMC, 2011. **12**.
180. Eberhard, L., *S13: Langzeitbewitterte EDVS*. 2015, University of Bern: Bern.
181. Bannwitz, R., *Schadensprävention Fassade*, Weiterbildungsseminar, Editor. 2017, sto AG: Niederglatt.
182. Richner, P., *Baustoffkunde II - Polymere Baustoffe*, S. Architektur, Editor. 2011, ETH Zürich

183. Merz, H. and H. Kramer, *Wie lange hält ein Kunststoffbauteil?*, in *Seminar für Anwender*. 2002, Empa: Dübendorf.
184. Sulakatko, V., et al. *Towards nearly zero-energy buildings through analyzing reasons foer degradation of facades*. in *Procedia Econ Finance* 2014.
185. Michel, S., *Environmental and frequency effects on fatigue crack growth rate and paths in aluminium alloys*. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 2005. **28**: p. 205-219.
186. Brändli, C. *Trends und aktuelle Themen in der Klebstoffforschung*. in *SVMT Tag der Werkstoffe*. 2017. Zürich: SVMT.