



ENJEUX PATRIMONIAUX ET ÉNERGÉTIQUES

L'isolation des toitures représente un enjeu crucial, car cette partie du bâtiment offre la solution la plus simple et efficace pour améliorer le confort et réaliser des économies d'énergie. Bien que ces travaux sur la toiture soient souvent considérés comme des interventions mineures, car peu visibles de l'extérieur, il est essentiel de les réaliser correctement afin de préserver l'intégrité du bâtiment et de son environnement immédiat. Il est dans ce cadre important de préserver autant que possible les éléments constitutifs de la toiture, en veillant à conserver leurs dimensions, leurs proportions et leurs matériaux d'origine. Une exécution inappropriée peut entraîner des conséquences néfastes. Les toitures anciennes ouvertes hébergent souvent des oiseaux. Une rénovation favorable à la biodiversité est possible.

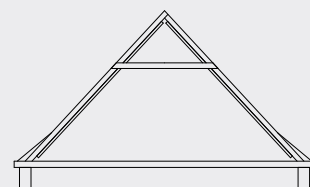
TYPES DE TOITURES. À la campagne et dans les bourgs, le caractère des constructions est marqué par l'aspect et la forme de la toiture en lien avec les matériaux de couverture utilisés et le type d'ouvertures ou l'absence de celles-ci. La surface des pans de toit est souvent aussi importante, si ce n'est plus, que celle des façades et abrite une part importante du volume.

Les pans de toit sont fréquemment prolongés par de profonds avant-toits, généralement fins et marqués par un larmier et un virevent de faible hauteur. Le défi majeur lorsque l'on isole une de ces toitures est de conserver ces proportions visuelles et cette finesse.

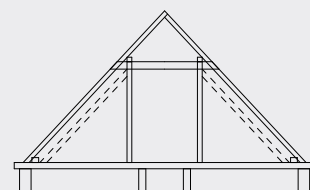
Dans les agglomérations, la toiture à la Mansart est répandue jusque dans les années 1920. Les toitures des immeubles construits avant 1945 sont souvent habitées, avec une pente importante et éclairées par des lucarnes. Par la suite, la pente diminue et les combles ne sont plus chauffés. Quelques toitures ont été faiblement isolées dans les années 50, puis une part plus importante vers le milieu des années 70, soit sur le plancher des combles, soit entre les chevrons de la charpente.

LA COMPLEXITÉ D'UNE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE. L'isolation des toitures est une opération essentielle de nos jours. Cependant, elle a souvent pour conséquence un épaississement significatif des profils de toiture. Il est indispensable de mener une réflexion spécifique visant à réduire cet effet. Il existe des solutions relativement simples et très efficaces qui permettent de s'adapter aux différentes typologies de toitures. Au niveau de la physique du bâtiment, il est crucial d'anticiper soigneusement les modifications importantes des conditions hygrométriques engendrées par ces travaux sur les charpentes en bois, afin d'assurer une préservation optimale de la substance historique.

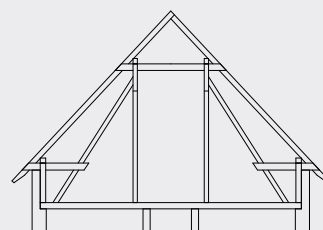
Cette fiche illustre la complexité de la problématique et montre les grandes lignes à suivre sur la base de détails fréquemment analysés et réalisés par des spécialistes. Elle concerne les bâtiments d'habitation à caractère patrimonial (hors bâtiments sous protection cantonale, INV et MH). En cas de travaux, une réelle étude de faisabilité et des calculs réalisés par des professionnels qualifiés s'avèrent indispensables. Les modes d'intervention ne devraient pas affaiblir les performances énergétiques requises au sens de la législation cantonale. Une coordination avec les administrations concernées est nécessaire.



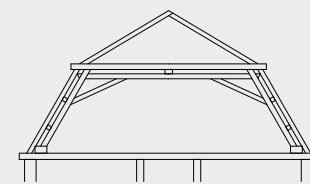
Toit avec entrain supérieur



Double droite avec pannes



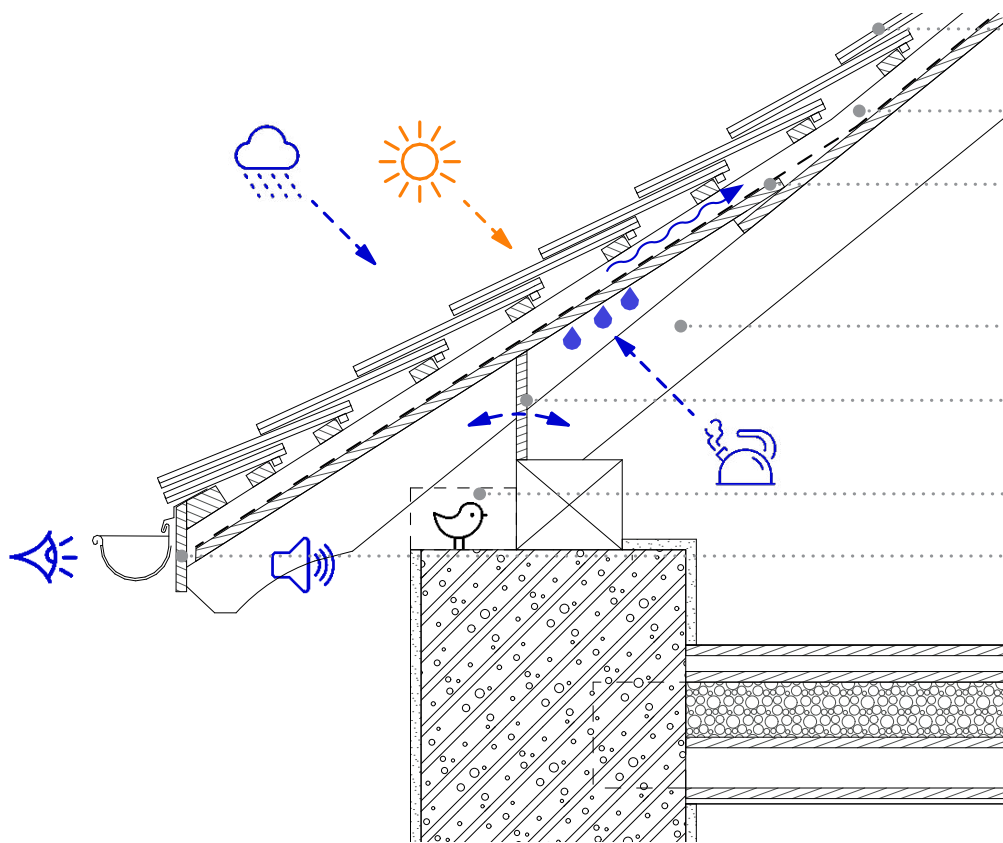
Ferme à pannes avec jambettes



Ferme à faux entrain pour toit Mansart

Types de charpentes traditionnelles employées jusqu'au début du XXe siècle ¹

ENJEUX DE RÉNOVATION



- Couverture, préserver la substance historique
- Contre-lattage, assurer la ventilation, limiter la surchauffe en été
- Sous-couverture, impérativement ouverte à la diffusion de vapeur pour éviter tout risque de condensation
Attention: retirer Eternit GEA ou carton bitumé existants
- Chevrons, éviter la surcharge de la structure existante
- Planche de fermeture, assurer l'étanchéité à l'air et la protection phonique
- Nichoirs à oiseaux, intégrer la faune pour préserver la biodiversité
- Larmier, veiller à la finesse des larmiers et des avant-toits

Toiture existante à brisis

PHYSIQUE DU BÂTIMENT: Les toitures anciennes n'étaient pas conçues pour être isolées. Leur isolation modifie l'équilibre hygrothermique des charpentes en bois. L'amélioration thermique ne doit pas bloquer le flux de vapeur d'eau ni confiner l'humidité. Il faut veiller à utiliser des matériaux présentant des résistances à la diffusion de vapeur strictement décroissantes de l'intérieur vers l'extérieur. Tout joint mal réalisé provoque des déperditions et de la condensation. Moisissures et pourrissement apparaissent dès que le bois reste trop longtemps humide. Dans le bâti ancien, il est donc indispensable de privilégier des produits respirants, capables de gérer les échanges de vapeur d'eau.

L'ISOLATION ET LE FREIN VAPEUR: Les fibres biosourcées telles que la laine de bois, de chanvre, de mouton, de lin ou un flochage à la cellulose assurent une meilleure régulation de l'humidité. Un frein vapeur à diffusion variable, posé du côté chaud de l'isolation et ouvert à la diffusion de vapeur, est nécessaire pour limiter la condensation dans l'isolation. Il laisse non seulement l'humidité s'échapper à l'extérieur, mais aussi vers l'intérieur. Le frein vapeur doit être installé avec soin de manière continue, par exemple entre les poutres en bois et les murs, ce qui s'avère complexe dans un bâtiment ancien.

LA CHARPENTE: Il est nécessaire de garantir la bonne ventilation des bois de charpente et des supports de couverture. Idéalement, il faut soit les inclure dans les volumes chauffés, soit les en exclure totalement. Il faut éviter les surépaisseurs dans la mesure du possible afin de ne pas modifier la silhouette. Lorsqu'on transforme une toiture, les nouveaux matériaux entraînent une surcharge, ce qui nécessite de faire réaliser une vérification statique.

LA SOUS-COUCVERTURE: La sous-couver-

ture doit impérativement être ouverte à la diffusion de vapeur sous peine de retenir la vapeur dans l'isolation et la faire pourrir. Une sous-couverture sous forme de panneaux de fibres de bois sert également de complément d'isolation. Cela permet d'emballer complètement la structure en bois dans l'isolation et limite la condensation dans les poutres. Lorsqu'on isole une toiture existante par l'intérieur, il faut absolument vérifier la nature de la sous-couverture existante. Le carton bitumé ou l'Eternit GEA qui étaient couramment posés sont étanches et ne laissent pas diffuser la vapeur!

LE CONTRE-LATTAGE: Le contre-lattage sert à la circulation de l'air sous la couverture et permet l'évacuation vers le bas de l'eau de condensation. Il est à dimensionner en fonction du type de couverture, de l'altitude, de la pente, selon la norme SIA 232/1:2011 (al. 2.2.9.2), toitures inclinées. Lors de la pose de tuiles ou panneaux solaires photovoltaïques, le contre-lattage préconisé sera plus épais afin d'assurer la circulation de l'air et le refroidissement des éléments.

CADRE LÉGAL: La norme SIA 232/1:2011, toitures inclinées régit la conception et l'exécution des toitures inclinées, c'est-à-dire des couvertures, des sous-toitures et de la ferblanterie.

«Les toitures comportant une isolation thermique doivent être étanches à l'air. L'étanchéité à l'air doit être placée du côté chaud de l'isolation. Les vides entre l'étanchéité à l'air et l'isolation qui permettraient une convection ne sont pas admis (sia 232/1 al.2.2.4.1.)» L'isolation thermique et la protection contre l'humidité seront réalisées conformément aux normes SIA 180:2014 et 380/1:2016.



Toiture existante sans contre-lattage. Impossible d'isoler en l'état par l'intérieur, attention aux problèmes de ventilation

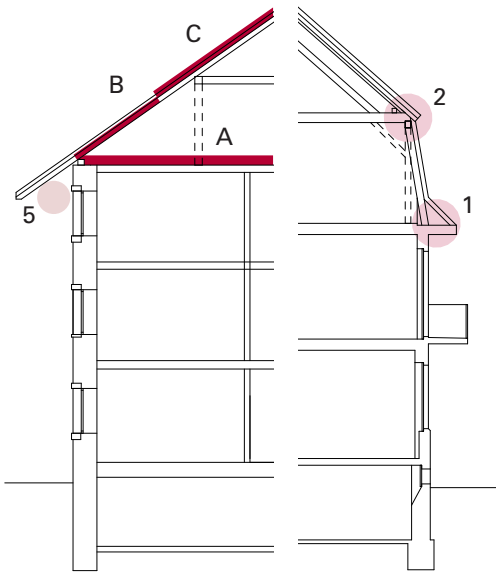


Pose d'un frein-vapeur, difficulté de mise en œuvre, attention aux raccords et aux percements

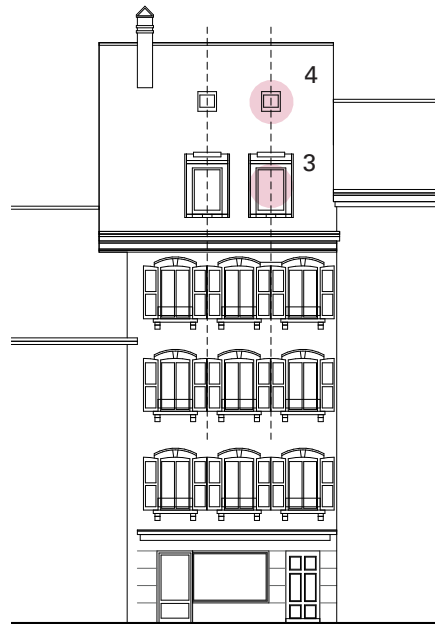


Attention: Sous-couverture en carton bitumé et plaques GEA à enlever, car totalement étanches à la vapeur

STRATÉGIES DE RÉNOVATION



Coupe et élévation schématiques indiquant les détails étudiés dans la fiche



STRATÉGIES D'INTERVENTION

- A Isolation plancher des combles
- B Isolation entre chevrons
- C Isolation sur chevrons

DÉTAILS STRATÉGIQUES

- 1 Avant-toit à réveillon
- 2 Ligne de brisis
- 3 Lucarne
- 4 Prises de jour (dimensions réduites 55x78 cm)
- 5 Avant-toit



RIVES

L'isolation au-dessus des chevrons modifie la silhouette du toit. Il faut minimiser cet impact au niveau des virevents et des larmiers en les divisant en deux parties. On procèdera à un éventuel « blindage » de ferblanterie uniquement sur le larmier supérieur, le plus exposé aux intempéries.



INTÉGRATION DU PHOTOVOLTAÏQUE

L'intégration de tuiles ou de panneaux solaires représente un enjeu important pour la préservation de l'aspect des toitures et des sites protégés. Il est recommandé de les poser en priorité sur des constructions annexes ou sur un pan de toit peu visible. En cas de pose sur la toiture principale, il s'agit de garantir une intégration architecturale et chromatique en limitant aussi les brillances. Les cadres métalliques ne sont pas appropriés. De nouveaux produits permettant une bonne intégration existent sur le marché, mais il faut anticiper les délais de fourniture qui peuvent être longs. Si d'anciennes tuiles sont encore présentes, une pose reportée est à envisager. Depuis 2025, il est possible de créer des réseaux électriques virtuels. Dans le domaine du patrimoine on peut poser des capteurs solaires photovoltaïques sur des bâtiments non protégés dont la production sera reportée en faveur du bâtiment protégé.

✓ Bon exemple de larmier après rénovation. Il reste fin visuellement par le détail et sa couleur

✗ Mauvais exemple: virevent et larmier massifs et disproportionnés



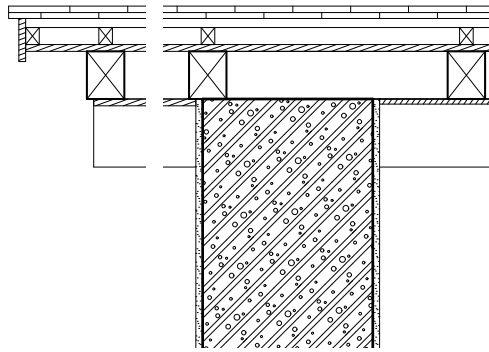
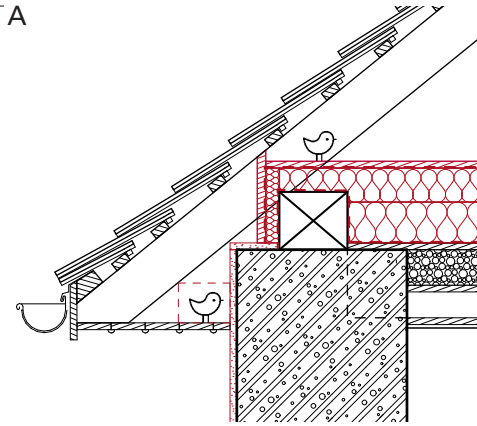
Exemple d'intégration de tuiles photovoltaïques



Exemple d'intégration de tuiles photovoltaïques

DÉTAILS CONSTRUCTIFS

À PRIVILÉGER

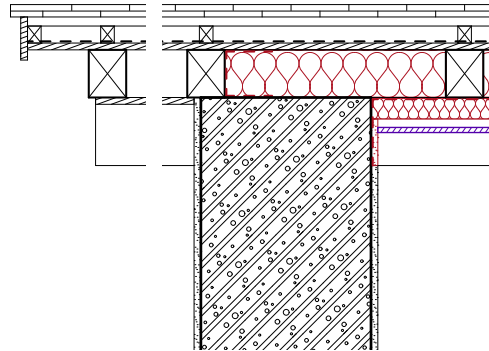
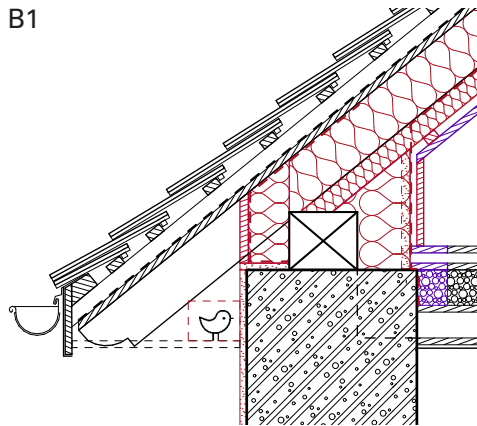


ISOLATION SUR PLANCHER DES COMBLES

U rénové: 0.25 / 0.20 W/m²K*

- . Plancher bois 20 mm
- . Coupe-vent
- . Isolation fibre de bois entre lambourdes $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$, 80 + 80 / 100 + 100 mm
- . Frein-vapeur à diffusion variable

- + aspect de la toiture et matériaux inchangés
- + facilité de mise en oeuvre
- + économique
- ! assurer la continuité du frein-vapeur et de l'isolation
- ! choix de matériaux ouverts à la diffusion de vapeur

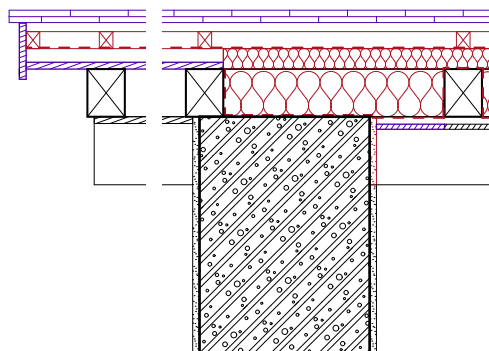
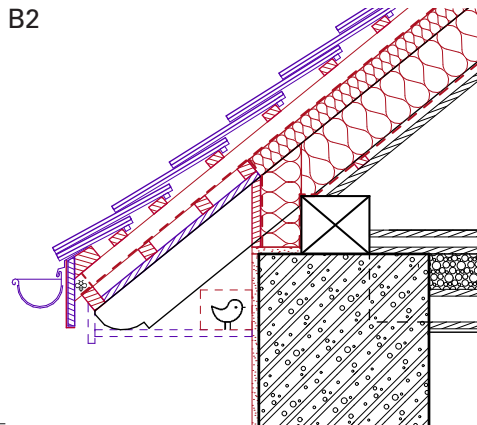


ISOLATION ENTRE ET SOUS CHEVRONS

U rénové: 0.25 / 0.20 W/m²K*

- . Sous-couverture ouverte à la diffusion de vapeur / voligeage bois 20 mm
- . Isolation fibre de bois, $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ entre chevrons, 140 mm
- . Frein-vapeur à diffusion variable
- . Isolation rigide, fibre de bois, $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$, 40 / 80 mm

- + aspect extérieur de la toiture et matériaux inchangés
- + mise en oeuvre par l'intérieur
- ! vérification présence contre-lattage et sous-couverture existante ouverte à la diffusion de vapeur (carton bitumé et plaques Eternit GEA sont étanches)
- ! mise en oeuvre continue du frein-vapeur

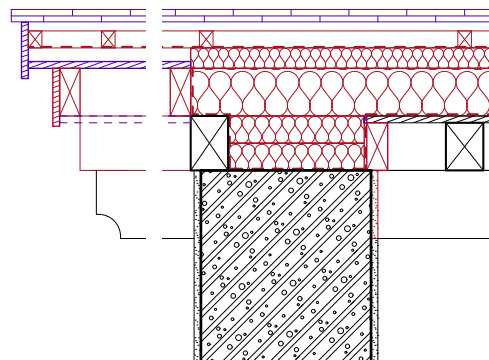
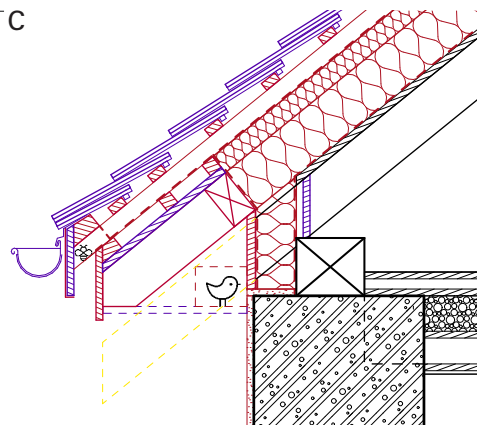


ISOLATION ENTRE ET SUR CHEVRONS

U rénové: 0.25 / 0.20 W/m²K*

- . Lè de sous-couverture ouvert à la diffusion de vapeur
- . Sous-couverture rigide, fibre de bois, $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$, 40 / 80 mm
- . Isolation fibre de bois, $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$, entre chevrons, 140 mm
- . Frein-vapeur à diffusion variable

- aspect de la toiture modifié
- chantier important nécessitant des échafaudages
- ! assurer une mise en oeuvre continue du frein-vapeur, de l'isolation et du coupe-vent
- ! aux bruits extérieurs
- ! esthétique virevents et larmiers



ISOLATION SUR CHEVRONS

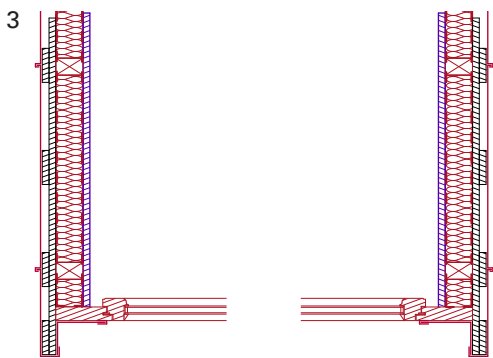
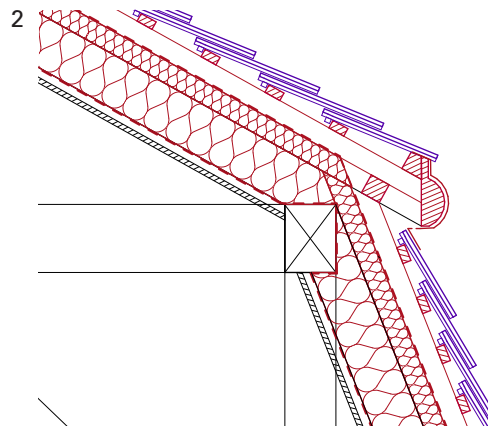
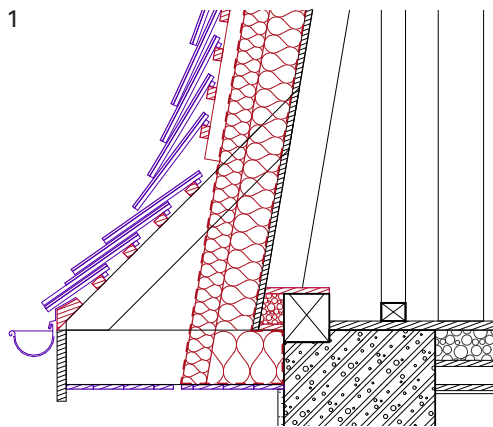
U rénové: 0.25 / 0.20 W/m²K*

- . Lè de sous-couverture ouvert à la diffusion de vapeur
- . Sous-couverture rigide, fibre de bois, $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$, 60/ 100 mm
- . Isolation fibre de bois, $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$, sur chevrons, 120 mm
- . Frein-vapeur à diffusion variable

- aspect extérieur de la toiture fortement modifié
- + mise en valeur de la charpente
- ! assurer une mise en oeuvre continue du frein-vapeur, de l'isolation et du coupe-vent
- ! aux bruits extérieurs
- ! esthétique virevents et larmiers

*Nécessaire à l'obtention de subventions

À ÉVITER DANS LA MESURE DU POSSIBLE



Lucarne jacobine rénovée



AVANT-TOIT À RÉVEILLON (1)

La ligne de cassure de réveil est légèrement déplacée lors de l'isolation. La validité de cette solution dépend de la valeur patrimoniale du bâtiment.

LIGNE DE BRISIS MANSART (2)

La ligne de bris de la toiture à la Mansart est décalée à cause de l'épaisseur supplémentaire d'isolation.

LUCARNE

Les lucarnes servent à apporter de la lumière et assurer une ventilation des espaces sous la toiture. Il en existe de différentes formes et tailles: lucarnes rampantes, à croupe, jacobines, etc.

Il est nécessaire de dissimuler au mieux l'épaisseur d'isolation ajoutée afin de ne pas les dénaturer. L'utilisation de blindage est à éviter, il faut privilégier des virevents bois à crémaillère. L'utilisation d'isolants en couches minces à haute performance (par ex. des nattes d'aérogel) peut s'avérer utile pour conserver le plus grand vide de lumière possible ainsi que les proportions de la lucarne.

PRISES DE JOUR

Il est important d'éviter un trop grand nombre de prises de jour, autant pour des raisons esthétiques que de surchauffe. De plus, il convient d'opter pour des formats étroits permettant de s'insérer dans le chevonnage existant sans devoir le modifier et de privilégier une pose affleurée des fenêtres de toit, plus discrète.

Les protections solaires extérieures ont un impact important et sont, si possible, à éviter. L'utilisation de tuiles de verre permet de conserver la surface plane des pans de toit et leur texture.

BIODIVERSITÉ

Les bâtiments historiques sont souvent accueillants par nature envers la faune et la flore. Il faut éviter de perturber cet équilibre lors des rénovations de toitures et renforcer les potentiels d'accueil. Par exemple en intégrant ou ajoutant des nichoirs pour oiseaux.

En noir: existant, en rouge: rénovation, en violet: réemploi.

GLOSSAIRE

VALEURS LAMBDA: La conductivité thermique λ (lambda) d'un matériau représente le flux de chaleur qui passe en une seconde à travers une surface de 1 m² et une épaisseur de 1 m, lorsqu'il y a une différence de température de 1°C (équivalent à un degré Kelvin) entre l'intérieur et l'extérieur. Son unité se donne en Watts par mètre et Kelvin: W/(mK). Plus le lambda est petit, plus le matériau est performant énergétiquement.

VALEUR U: La valeur U indique la performance d'isolation d'un élément de construction. Elle représente la quantité de chaleur qui passe en une seconde à travers une surface de 1 m² lorsqu'il y a une différence de température de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur. L'unité de la valeur U se donne en W/(m²K). Plus la valeur U est petite, meilleure est l'isolation thermique. La valeur U d'un élément dépend de la conductivité thermique λ des matériaux et de leurs épaisseurs, ainsi que des résistances superficielles intérieures et extérieures.

POINT DE ROSÉE ET RISQUES DE MOISSURES: L'air contient toujours de l'eau sous forme de vapeur, et sa capacité à en contenir dépend de la température. Lorsque la température de l'air baisse, il peut retenir moins de vapeur, atteignant un point de saturation où l'eau se condense. Cette température critique est appelée point de rosée si l'humidité relative est de 100 %. Un taux de 80 % d'humidité est suffisant pour permettre le développement des moisissures, surtout si l'air est stagnant.

FACTEUR DE DIFFUSION À LA VAPEUR μ : Les matériaux sont plus ou moins perméables à la vapeur. Le facteur μ indique la résistance à la diffusion de vapeur du matériau en rapport d'équivalence à une lame d'air d'un mètre d'épaisseur. Plus μ est élevé, moins le matériau est perméable. Une valeur entre 1 et 10 caractérise les matériaux possédant une bonne perméabilité à la vapeur d'eau.

Pour limiter les risques liés à la condensation, il faut utiliser des matériaux présentant des résistances à la diffusion de vapeur strictement décroissantes de l'intérieur vers l'extérieur. Cette résistance à la diffusion de la vapeur (épaisseur d'air équivalente) se calcule ainsi: $s_d = \mu * d$ (m).

ISOLANTS APPROPRIÉS: Les matériaux d'isolation adaptés pour une toiture en pente doivent être souples afin de s'adapter à la structure. Les matériaux conseillés sont de préférence biosourcés et ouverts à la diffusion de vapeur, afin de maintenir la perméabilité à la vapeur d'eau existante du bâtiment et réduire les risques liés à la condensation.

ISOLANTS BIOSOURCÉS AVEC FREIN VAPEUR: Les laines et flocons biosourcés (bois, cellulose, chanvre, mouton, etc.) ont une bonne valeur isolante. Ils sont ouverts à la diffusion de vapeur et permettent d'emmagasiner une certaine quantité d'humidité et de s'assécher ensuite. La pose d'un frein-vapeur est indispensable pour limiter la migration de la vapeur.

BIBLIOGRAPHIE

- Normes SIA 232/1 Toitures inclinées, SIA 380/1:2016, SIA 180:2014
- «Reconversion du patrimoine architectural rural», Service des biens culturels FR et HEIA-FR, 2015
- «eREN, Rénovation énergétique, approche globale pour l'enveloppe du bâtiment», HEIA-FR, 2015
- «Isolation des toitures anciennes», Fiche de la collection éléments du patrimoine VD, MIS
- «Der Altbau, renovieren, restaurieren, modernisieren», Otfried Rau, Ute Braune, DRWV-Verlag, 2004
- «Praxis-Handbuch Innendämmung», Herausgeber Fachverband Innendämmung e.V. (FVID), 2023
- «Bâtir, Manuel de la construction», René Vittone, 2010

Cette fiche a été établie en compilant les informations contenues dans ces publications ainsi qu'à partir de retours de professionnels. Image de couverture: Lucas Delachaux, Dépendances du château de Hauteville.

ISOLANTS MINÉRAUX AVEC FREIN VAPEUR: Les laines minérales ont une très bonne valeur isolante et une très faible valeur μ . Toutefois, elles ne permettent pas de gérer l'hygrométrie des surfaces. Elles nécessitent la pose d'un frein-vapeur et une attention particulière aux raccords.

FREIN VAPEUR À DIFFUSION VARIABLE: Avec des isolants de types laines, il est nécessaire de limiter la migration de vapeur par la pose d'un frein-vapeur. Celui-ci doit être installé avec soin surtout dans les raccords, par exemple entre les poutres en bois et les murs, ce qui s'avère complexe dans un bâtiment ancien. Les feuilles doivent être collées entre elles et contre les supports divers (dalles, poutres...) avec des bandes autocollantes spécifiques à haute performance. Par ailleurs, cette couche ne doit jamais être percée. Il est peu réaliste de croire que, dans les conditions de chantiers et en particulier dans la transformation, il est possible de répondre pleinement à ces exigences. La durée de vie des bandes autocollantes est limitée (5 ans de garantie). A long terme, il est fort probable que la vapeur puisse migrer plus facilement et provoquer de la condensation. Il existe des systèmes de frein-vapeur dits hygrovariables qui ont la capacité d'ajuster leur perméabilité à la vapeur en fonction de sa présence. Ces freins-vapeur, tout comme les matériaux hygroscopiques naturels, ont l'avantage d'adapter leur facteur de diffusion à la vapeur présente.

LA COUVERTURE: La couverture est une couche d'usure qui doit être périodiquement renouvelée. Il convient en cas de réfection de la toiture d'utiliser le même type de revêtement qu'à l'origine afin de conserver l'aspect général extérieur. L'histoire du bâtiment, son âge, sa localisation géographique précise, voire les caractéristiques des édifices voisins, orientent ce choix. Ces éléments peuvent même conditionner la teinte et les dimensions du matériau à employer. On peut retrouver du bois (tavillons, bardeaux), de la tuile (principalement de la tuile plate dans le cas de bâtiments anciens) ou de l'ardoise (combinée ou non à des ferblanteries), cela peut aussi être du métal ou du fibrociment. Il est également possible dans certains cas et certaines conditions de remplacer la couverture par des panneaux ou tuiles photovoltaïques qui s'intègrent au niveau couleur et brillance dans le contexte construit.

LA FERBLANTERIE: L'aspect de la ferblanterie doit correspondre à celle d'origine ou à celle de bâtiments similaires. L'usage du cuivre s'est généralisé à partir des années 1980 seulement. Au vingtième siècle on employait souvent de la tôle zinguée peinte. En utilisant différents métaux, la corrosion électrolytique peut causer la dissolution d'éléments. Par exemple, le cuivre au-dessus du zinc ou de l'acier galvanisé ne sont pas compatibles, mais à l'inverse, oui (ordre de haut en bas: aluminium - zinc - acier galvanisé - cuivre). Le cuivre et le zinc sont des métaux lourds qui polluent les eaux superficielles nécessitant alors un traitement spécifique. En lien avec l'électrification de la société, des pénuries de cuivre sont annoncées. L'utilisation de l'aluminium et de l'inox va se généraliser. Par souci d'intégration, il faut choisir une exécution prépatinée matte.



COUVERTURE
Tuile plate terre cuite historique
Toiture à la Mansart avec ardoise
Tuile mécanique historique avec décor



ISOLANTS BIOSOURCÉS
Laine de bois: $\lambda = 0.036$ W/mK, $\mu = 2$
Laine de chanvre: $\lambda = 0.040$ W/mK, $\mu = 1$
Laine de mouton: $\lambda = 0.036$ W/mK, $\mu = 2$
Ouate de cellulose: $\lambda = 0.038$ W/mK, $\mu = 1 - 2$
Laine de lin: $\lambda = 0.038$ W/mK, $\mu = 1$



ISOLANTS MINÉRAUX
Laine de verre: $\lambda = 0.032$ W/mK, $\mu = 1$
Laine de pierre: $\lambda = 0.035$ W/mK, $\mu = 1$



SOUS-TOITURE
Panneaux rigides
fibre de bois $\lambda = 0.040$ W/mK