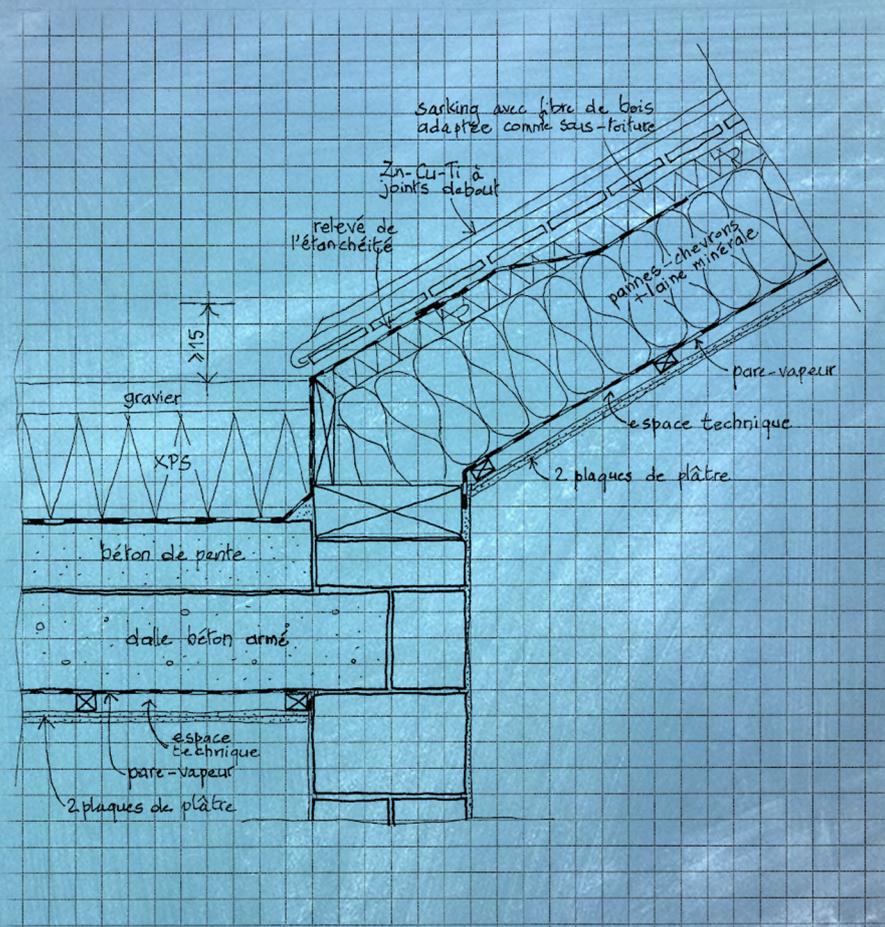


L'ISOLATION THERMIQUE DES TOITURES

Jean-Marie Hauglustaine
et Francy Simon



uide pratique pour les architectes



Wallonie

2e édition, 2018

Ce guide pratique a été élaboré sous la direction de :

- **Jean-Marie HAUGLUSTAINE**, dr. ir. architecte, chargé de cours au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, Directeur de l'équipe de recherche EnergySuD (Energy and Sustainable Development) ;
- **Francy SIMON**, Ir. architecte, professeur émérite à l'Université Catholique de Louvain ;

et avec la collaboration de **Julie DETROZ**, **Christelle HUBERTY**, ir. architectes de recherche et de **Stéphane MONFILS**, ir. architecte doctorant, tous trois à l'équipe de recherche EnergySuD.

Il constitue la mise à jour de deux guides pratiques pour architectes *L'isolation thermique de la toiture inclinée* (1999, réimpression en 2001) et *L'isolation thermique de la toiture plate* (2003) auxquels avaient collaboré Catherine BALTUS et Sophie LIESSE.

	PRÉFACE	4
	ENJEUX	5
	INTRODUCTION	5
	LE CONFORT ET L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE	6
	LES DONNÉES CLIMATIQUES, LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE COMPORTEMENT AU FEU	9
	LES FONCTIONS DE L'ENVELOPPE	13
	LES PERFORMANCES DEMANDÉES AUX PAROIS EXTÉRIEURES OPAQUES D'UN BÂTIMENT	13
	LES TECHNOLOGIES COMMUNES DES TOITURES PLATE ET INCLINÉE	20
	L'ISOLATION THERMIQUE	21
	L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR	25
	LE PARE-VAPEUR	28
	LA FINITION INTÉRIEURE	31
	LES COUPLES GALVANIQUES	31
	LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE	33
	ÉVOLUTION HISTORIQUE DU RÔLE DE LA TOITURE INCLINÉE	33
	LES CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES TOITURES INCLINÉES :	35
	LES PERFORMANCES DE LA TOITURE INCLINÉE	39
	CONTRÔLE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT	39
	LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE	42
	LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	43
	OBJECTIFS POURSUIVIS ET MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU DÉTAIL	65
	ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE :	
	- AU STADE DE L'ESQUISSE	66
	- AU STADE DE L'AVANT-PROJET	80
	- AU STADE DU PROJET	85

LA TOITURE PLATE	<i>LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES</i>	<i>86</i>
	HISTORIQUE	87
	LES PERFORMANCES DES TOITURES PLATES	88
	LA TOITURE CHAUDE	90
	CAS DE LA TOITURE INVERSÉE	91
	LA TOITURE COMBINÉE OU TOITURE “DUO”	92
	LA TOITURE VERTE	93
	LES TYPOLOGIES DES TOITURES À DÉCONSEILLER	98
	<i>LA TECHNOLOGIE DE LA TOITURE PLATE</i>	<i>100</i>
	LE SUPPORT DU COMPLEXE ISOLANT - ÉTANCHÉITÉ	101
LE PARE-VAPEUR	105	
L'ÉTANCHÉITÉ DE TOITURE	108	
L'ISOLATION THERMIQUE	108	
L'ÉTANCHÉITÉ DE TOITURE	113	
LES PROTECTIONS	116	
<i>LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE PLATE</i>	<i>118</i>	
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	118	
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE :		
- AU STADE DE L'ESQUISSE	66	
- AU STADE DE L'AVANT-PROJET	80	
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	<i>126</i>	
<i>ANNEXES</i>	<i>129</i>	
ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES	129	
ANNEXE 2 : L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES PLATES	136	
ANNEXE 3 : LE COMPORTEMENT AU FEU DES TOITURES PLATES	140	
ANNEXE 4 : LE SYSTÈME DE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATC	144	
<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	<i>148</i>	

L'intervention des concepteurs est essentielle car il leur revient d'intégrer les performances à atteindre, dès les stades initiaux du processus de conception. Ces performances ne doivent cependant pas freiner leur créativité; au contraire, il s'agit de construire des bâtiments alliant beauté, confort, durabilité et économie.

Consciente de l'importance de l'information à apporter aux professionnels d'une part et au public d'autre part, la Wallonie a mis en place, depuis quelques années, un dispositif multiforme d'information et de formation, relayant les recherches menées par le Centre Scientifique et Technique de la Construction et les Universités.

Une série de 9 guides pratiques destinés aux architectes explorait la méthodologie de conception de l'enveloppe. Ses auteurs, Francy Simon, Professeur émérite à l'Université Catholique de Louvain, et Jean-Marie Hauglustaine, chargé de cours à l'Université de Liège, poursuivent ici cette approche pour l'isolation thermique des toitures (inclinées et plates), proposant une démarche cohérente, de l'esquisse au projet.

Dans ce guide, l'architecte trouvera une démarche conceptuelle intégrée lui permettant d'orienter et d'adapter ses choix.

D'autres guides sont diffusés par le Fonds de Formation Professionnelle de la Construction, tandis que les particuliers peuvent trouver des brochures et des conseils qui vont dans le même sens, auprès des Guichets Energie Wallonie.

Ces réalisations s'intègrent dans la politique que mène la Wallonie depuis plusieurs années afin de favoriser l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (URE) dans les bâtiments. La Belgique s'est en effet engagée, à Rio, à Kyoto puis Paris, à diminuer la consommation d'énergie et donc les émissions de CO₂, afin de réduire l'effet de serre.

Annick FOURMEAUX,
Directrice Générale.

ENJEUX

INTRODUCTION	5
LE CONFORT ET L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (U.R.E.)	6
LE BILAN THERMIQUE DE L'HOMME DANS SON ENVIRONNEMENT	6
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST AUGMENTER LE CONFORT	6
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST ÉCONOMISER L'ÉNERGIE	7
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST RÉDUIRE LES DÉPENSES DU MAÎTRE D'OUVRAGE	7
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST PROTÉGER L'ENVIRONNEMENT	8
LES DONNÉES CLIMATIQUES, LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE COMPORTEMENT	
AU FEU	9
LES DONNÉES CLIMATIQUES	9
<i>Les précipitations</i>	9
<i>Le vent</i>	9
<i>Les températures</i>	10
<i>Le climat intérieur</i>	10
LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE	10
LE COMPORTEMENT AU FEU	11

INTRODUCTION

Depuis 1975, la tendance à isoler s'est largement accrue, initialement en raison de l'évolution des prix pétroliers, à laquelle se sont ensuite ajoutées des considérations écologiques et de confort.

L'accroissement de l'isolation thermique et la nature plus légère des constructions ont intensifié les interactions entre les différents éléments de la toiture. Ces différents aspects ont entraîné des sollicitations hygrothermiques, notamment au niveau de l'étanchéité de la toiture plate.

Les compositions et les matériaux de toiture des années 60 n'étaient pas conçus pour être mis en oeuvre dans de telles conditions, ce qui a engendré une forte diminution de la longévité de la toiture.

On dispose désormais de matériaux plus adaptés, qui permettent d'apporter une solution économique à ces problèmes.

Le présent guide décrit les compositions de toiture les plus fréquentes. D'autres solutions sont également possibles.

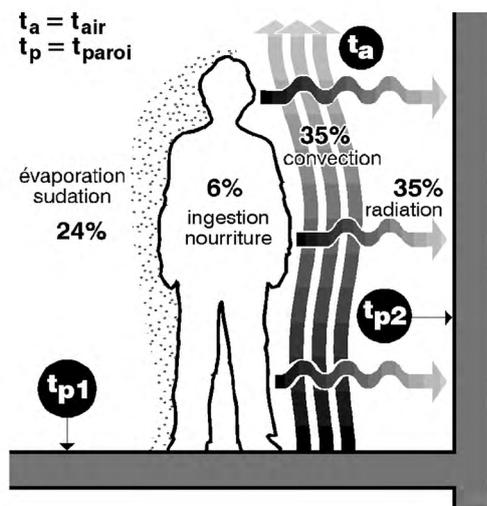
La toiture constitue le point le plus haut du volume protégé, où se concentrent les températures intérieures les plus élevées, par le jeu de la stratification des températures (l'air chaud, plus léger, "monte" au-dessus de l'air plus froid).

Isoler thermiquement une toiture est TOUJOURS intéressant, puisque l'on réduit ainsi les déperditions au travers de la paroi connaissant le plus grand écart de température entre ambiances intérieure et extérieure. La toiture est donc une paroi à isoler en priorité.

Si elle comporte une structure à ossature, cette dernière offre la possibilité d'un espace pouvant aisément accueillir un isolant, moyennant des précautions pour les noeuds constructifs.

Depuis 2004, les pouvoirs publics ont toujours encouragé, par des incitants financiers, à isoler thermiquement les toitures.

LE CONFORT ET L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (U.R.E.)



LE BILAN THERMIQUE DE L'HOMME DANS SON ENVIRONNEMENT

D'une température (36,6° C) en général plus élevée que la température ambiante, le corps humain dissipe une certaine quantité de chaleur vers l'environnement qui l'entoure.

L'activité réalisée, l'habillement, la température de l'air ambiant et la température de surface intérieure des parois du local sont autant de facteurs qui interviennent dans le bilan global de confort.

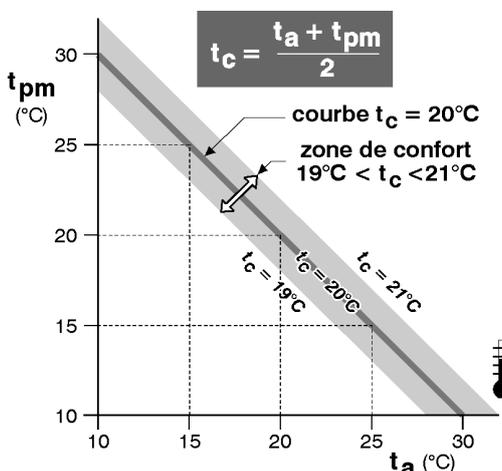
Pour éviter un échange thermique trop important et donc inconfortable entre le corps et son environnement, il y a lieu d'éviter :

- une radiation du corps vers des parois trop froides, en réduisant la conduction de la chaleur du local à travers elles ;
- une convection autour du corps, par des mouvements d'air trop rapides au sein du local.

ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST AUGMENTER LE CONFORT

Puisque les échanges par convection et rayonnement interviennent pour 70 % dans le bilan thermique, la température moyenne de surface intérieure des parois du local t_{pm} et la température de l'air ambiant du local t_a sont les facteurs essentiels du confort thermique. C'est la raison pour laquelle la température de confort t_c est définie comme la moyenne entre t_a et t_{pm} : $t_c = \frac{t_a + t_{pm}}{2}$.

Un autre facteur de confort est l'homogénéité des températures des parois du local. A une température de confort t_c



t_{pm} = température moyenne de surface intérieure de parois (°C)
 t_c = température de confort
 t_a = température de l'air (°C)

donnée, si t_{pm} est faible, on devra augmenter t_a et donc consommer plus d'énergie.

Isoler thermiquement une paroi, c'est la rendre moins conductrice de la chaleur et donc augmenter sa résistance thermique. Dans un local chauffé, la température de surface d'une paroi isolée sera toujours plus élevée que celle d'une paroi non isolée.

Si l'on se limite à chauffer l'air à 20°C, la température de surface intérieure d'une toiture inclinée est de l'ordre de :

- Pour une température extérieure de -9°C :
 - 13,5°C si la toiture n'est pas isolée ;
 - 18,8°C si elle est isolée (par ex. avec 23 cm de laine minérale) ; soit plus de 5°C de différence.
- Pour une température extérieure de 7°C :
 - 16,9°C si la toiture n'est pas isolée ;
 - 19,7°C si elle est isolée (par ex. avec 23 cm de laine minérale), soit presque 3°C de plus.

Cela signifie que, à proximité d'un versant de toiture non isolé, les conditions de confort ne sont plus remplies. Pour atteindre les objectifs de confort, il y a donc intérêt à augmenter la t_{pm} des parois extérieures, par le renfort de leur résistance thermique, c'est-à-dire en les isolant.

ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST ÉCONOMISER L'ÉNERGIE

Pour une paroi, augmenter l'isolation thermique accroît sa résistance thermique et, par conséquent, diminue les déperditions et, donc, la consommation d'énergie.

Comme on l'a vu ci-dessus, en accroissant la résistance thermique d'une paroi, sa température de surface intérieure augmente et donc il ne sera plus nécessaire d'autant chauffer l'air intérieur, d'où un second gain d'énergie.

A titre d'exemple, l'appoint de chauffage nécessaire pour compenser les déperditions thermiques traversant 1 m² de toiture conduirait à une consommation annuelle d'énergie qui représente un ordre de grandeur de :

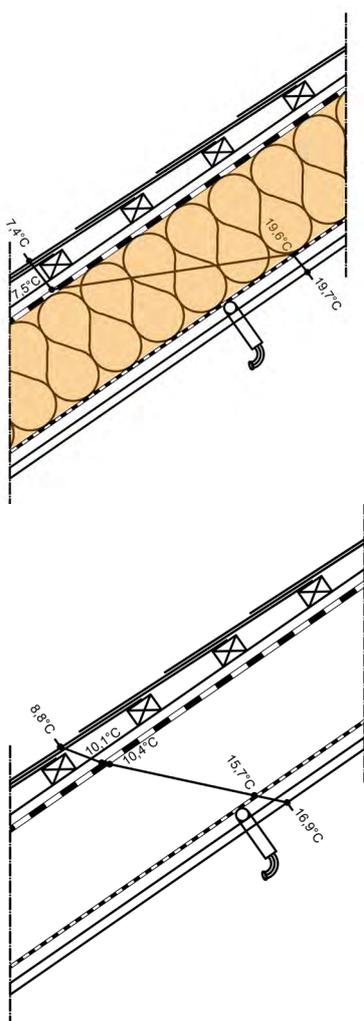
- 1,5 litres de mazout dans le cas d'un versant isolé ;
- 20 litres de mazout dans le cas d'un versant non isolé.

D'où les 2 conséquences suivantes :

- réduire les dépenses du maître d'ouvrage ;
- protéger l'environnement.

ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST RÉDUIRE LES DÉPENSES DU MAÎTRE D'OUVRAGE

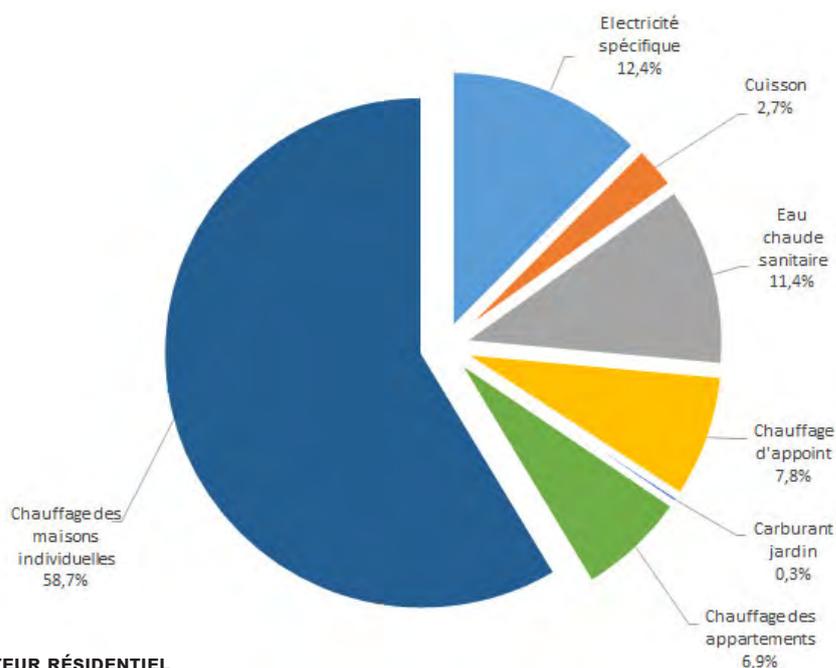
Isoler, c'est intervenir sur la consommation pour le chauffage résidentiel, qui représente 19,4% de la consommation d'énergie de la Wallonie. Au niveau d'un ménage, le poste chauffage intervient pour 72 % de sa consommation totale d'énergie.



ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST PROTÉGER L'ENVIRONNEMENT

L'utilisation massive des combustibles fossiles libère des quantités colossales de CO₂, ce qui accentue l'effet de serre et aggrave le changement climatique.

En fonction de ces deux aspects, économique et écologique, la conception des bâtiments ne peut qu'évoluer vers des bâtiments de mieux en mieux isolés. L'isolation thermique a conquis ses lettres de noblesse et tout le monde est, à présent, convaincu de la nécessité d'isoler les habitations.



RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DU SECTEUR RÉSIDENTIEL
PAR USAGE PRINCIPAL EN 2014 [SPWE-17]

Dans le cadre de ces considérations, la Wallonie est consciente de l'importance de l'intervention des concepteurs sur la consommation d'énergie des bâtiments et sur la qualité de vie dans les espaces bâtis.

Il leur revient d'intégrer, dès les stades initiaux du processus de conception architecturale, les concepts assurant des performances énergétiques compatibles avec les exigences actuelles.

Pour les y aider dans le domaine de la conception de la toiture, une méthodologie est proposée ci-après. Elle rappelle les performances à atteindre et propose une démarche cohérente, depuis l'esquisse jusqu'au chantier.

LES DONNÉES CLIMATIQUES, LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE COMPORTEMENT AU FEU

LES DONNÉES CLIMATIQUES

Lors de la conception d'une toiture, il convient de tenir compte du climat intérieur (voir encadré page suivante), du climat extérieur et, plus précisément, des précipitations, du vent et des températures.

LES PRÉCIPITATIONS [CSTC-96]

Les orientations sud-est à nord-ouest, plus sollicitées par les pluies battantes (voir figure ci-contre), demandent des précautions particulières contre la pénétration d'eau. Pour déterminer les dimensions et les dispositifs d'évacuation d'eau, il importe avant tout de prendre en considération le rapport entre l'intensité et la durée des fortes pluies. Le tableau ci-dessous précise la quantité maximale de pluie tombant pendant 10 minutes pour des périodes observées de 2, 10 et 50 ans.

PÉRIODE OBSERVÉE [années]	INTENSITÉ DE PLUIE		QUANTITÉ DE PLUIE EN 10 MIN [l/m ²]
	l/m ² .h	l/m ² .min	
2	52	0,87	8,7
10	80	1,34	13,4
50	107	1,78	17,8

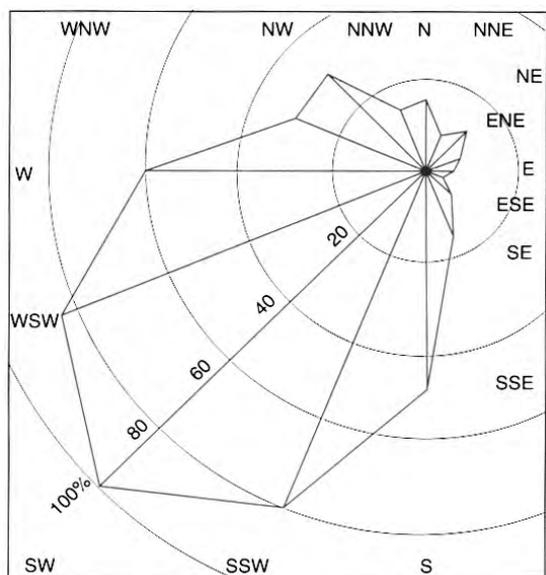
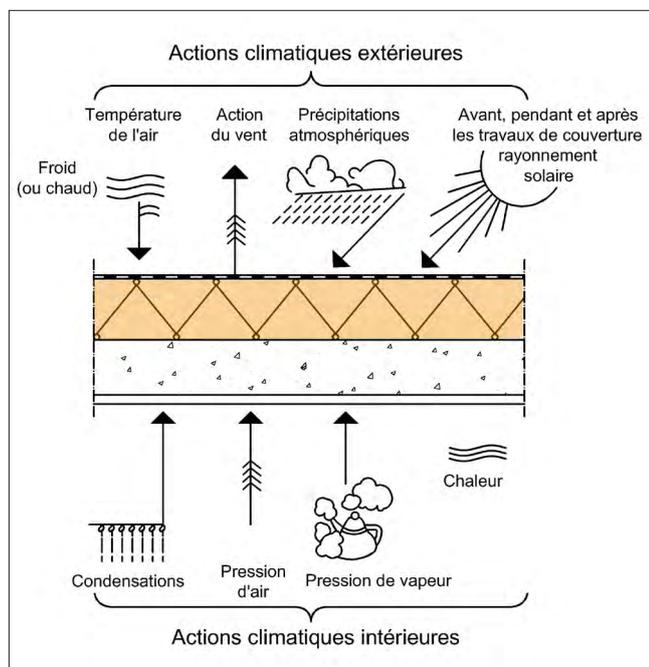
La NIT 191 "La toiture plate. 2^{ème} partie : Exécution des ouvrages de raccord" du CSTC [CSTC-94-2] et la norme européenne NBN-EN 12056-3 "Réseaux d'évacuation gravitaire à l'intérieur des bâtiments - Partie 3 : système d'évacuation des eaux pluviales, conception et calculs" [IBN -00] donnent les directives concernant la conception de l'évacuation des eaux pluviales de la toiture.

LE VENT [CSTC-96]

Sur une toiture plate, le vent exerce des efforts de succion dont l'importance dépend principalement de la localisation du bâtiment (littoral, ville, etc.), de sa hauteur et de la surpression qui règne à l'intérieur des locaux. La force du vent exercée sur la toiture n'est pas la même en tous points, en raison des tourbillons : elle est plus élevée au droit des rives et maximale au niveau des angles.

L'étude du comportement au vent d'une toiture plate peut s'avérer très complexe et intervient dès le stade de la conception. Elle est réalisée conformément à la norme NBN EN 1991-1 Actions sur les structures [IBN -13] et aux agréments techniques des membranes et isolants thermiques.

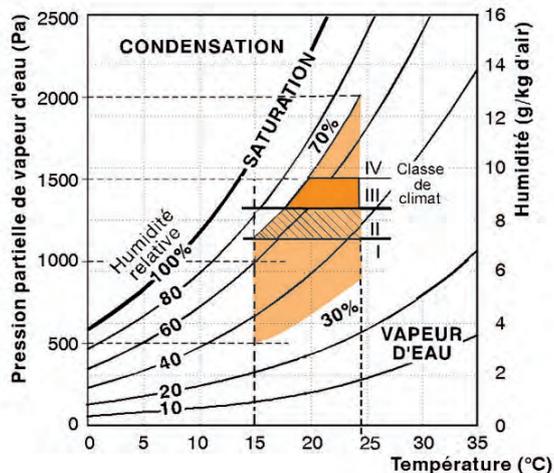
Quelques principes de base de cette norme sont repris dans l'annexe 2, pp. 136 et suivantes.



PRODUIT DE L'INTENSITÉ MOYENNE DES PLUIES BATTANTES PAR LEUR DURÉE MOYENNE, AU COURS D'UNE ANNÉE (1931 - 1960) [CSTC-98-1]

Classe de climat intérieur	Type de bâtiment	Exemples	p_i (Pa) [1 Pa = 1 N/m ²]
CC I	Bâtiments où la production d'humidité est faible à nulle en permanence	<ul style="list-style-type: none"> Entrepôts de marchandises sèches Eglises Salle d'exposition Garage Ateliers 	$1.100 \leq p_i < 1.165$
CC II	Bâtiments bien ventilés à production d'humidité limitée par m ³	<ul style="list-style-type: none"> Habitations ventilées selon la norme Ecoles Magasins Bureaux non climatisés Salles de sports et halls polyvalents 	$1.165 \leq p_i < 1.370$
CC III	Bâtiments moyennement ventilés, à production d'humidité plus importante au m ³	<ul style="list-style-type: none"> Habitations non ventilées selon la norme Hôpitaux, homes Salles des fêtes, théâtres Bâtiments faiblement climatisés (HR ≤ 60 %) 	$1.370 \leq p_i < 1.500$
CC IV	Bâtiments à production d'humidité élevée	<ul style="list-style-type: none"> Bâtiments fortement climatisés (HR > 60 %) Locaux d'hydrothérapie Piscines couvertes Locaux industriels humides tels que blanchisseries, imprimeries, brasseries, usines à papier, etc. 	$1.500 \leq p_i < 3.000$

LES CLASSES DE CLIMAT INTÉRIEUR



LE DIAGRAMME DE MOLLIER

LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les capacités des générations futures à répondre aux leurs. Le développement durable est une finalité qui s'inscrit dans le long terme.

L'acte de construire s'inscrit également dans la durée ; la vie d'un bâtiment est longue et, par conséquent, les répercussions des différents choix posés (d'implantation, paysagers, de conception, techniques, etc.) le sont aussi.

La construction durable est un processus qui intègre les trois aspects du développement durable :

- efficacité économique ;
- équité sociale et bien être ;
- préservation de l'environnement.

LES TEMPÉRATURES

Isoler thermiquement une paroi, c'est la rendre moins conductrice de la chaleur et donc augmenter sa résistance thermique.

Pour atteindre les objectifs de confort, il faut augmenter la température moyenne de surface intérieure des parois extérieures par le renfort de leur résistance thermique, c'est-à-dire en les isolant.

LE CLIMAT INTÉRIEUR

Dans le cadre du classement de leur climat intérieur du point de vue hygrothermique, les bâtiments se subdivisent en fonction de la pression de vapeur de l'air intérieur, en se basant sur la pression annuelle moyenne p_i de la vapeur du climat intérieur (exprimée en pascals Pa), comme repris dans le tableau ci-contre.

Dans des conditions habituelles de confort (zone orangée sur le diagramme de l'air humide ci-contre), le taux courant d'humidité relative de l'air ambiant est préféré autour de 50 %, pour des températures d'air avoisinant 20°C.

Dans le cas d'un local humide et chaud (salle de bain, de douche, cuisine), la température élevée de l'air le rend capable de contenir potentiellement plus de vapeur d'eau qu'en d'autres espaces du bâtiment. Lorsque cette vapeur d'eau rencontre une paroi froide ou un noeud constructif non conforme, des problèmes d'hygroscopicité peuvent apparaître et entraîner l'apparition de moisissures.

En matière d'humidité relative, il faut surtout veiller à évacuer l'humidité produite. La production de vapeur d'eau doit rester un pic et la ventilation doit permettre le retour rapide à la normale : une légère ventilation permanente reste préférable à une ventilation intense mais de courte durée.

LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les aspects environnementaux revêtent une importance croissante : ressources, fabrication, démolition, récupération, traitement des déchets et possibilités de rénovation... Les règlements régionaux en la matière explicitent les obligations à respecter.

Dans des circonstances particulières, telles que la proximité d'entreprises chimiques ou du secteur d'alimentation par exemple, l'environnement extérieur comporte des substances qui peuvent agresser l'étanchéité : il convient de se concerter avec le fabricant du matériau d'étanchéité afin de s'assurer de la compatibilité de celui-ci avec l'environnement.

Le concept de "construction durable" est apparu comme une problématique émergente du secteur de la construction. En effet, durant sa vie, le bâtiment est responsable, en Europe, de :

- 50 % du total des ressources naturelles exploitées ;
- 40 % des déchets produits ;
- 42 % des consommations d'énergie dont 70 % en chauffage et climatisation ;
- 30 % des émissions de CO₂ ;
- 16 % des consommations d'eau, soit 140 litres d'eau par personne et par jour.

Chaque site est unique, il ne peut donc y avoir de réponse toute faite, et les éléments à prendre en compte sont nombreux, divers et parfois contradictoires.

Un bâtiment durable n'est pas un bâtiment qui nécessite de recourir à des équipements et technologies très sophistiqués et chers. C'est, au contraire, un bâtiment qui met à profit une architecture de bon sens répondant au milieu local (site, climat, etc.), et aux besoins présents et futurs.

LE COMPORTEMENT AU FEU

Lors de l'étude du comportement au feu des toitures, il convient de faire une distinction entre la résistance au feu de la paroi toiture et la réaction au feu des matériaux.

Il faut en outre tenir compte du fait que la toiture peut être exposée au feu par un de ses côtés intérieur ou extérieur, ou par les deux côtés à la fois.

La nouvelle classification européenne de résistance au feu (cfr [IBN -09-1]) définit les 3 critères suivants (selon la NBN EN 13501-2) :

- R : capacité portante ;
- E : étanchéité au feu ;
- I : isolation thermique.

Les classes de résistance au feu sont exprimées comme suit :

- *Pour les éléments porteurs* :
 - o **REI t** : t étant la période durant laquelle tous les critères (capacité portante, étanchéité et isolation) sont satisfaits ;
 - o **RE t** : t étant la période durant laquelle les critères de capacité portante et d'étanchéité sont satisfaits ;
 - o **R t** : t étant la période durant laquelle le critère de capacité portante est satisfait.
- *Pour les éléments non-porteurs* :
 - o **EI t** : t étant la période durant laquelle les critères d'étanchéité et d'isolation sont satisfaits ;
 - o **E t** : t étant la période durant laquelle le critère d'étanchéité est satisfait.

La **période « t »** est exprimée **en minutes**. Par exemple, un poteau stable au feu durant une heure sera dénommé R60.

Par contre, la réaction au feu d'un matériau de construction se définit comme l'ensemble des propriétés de ce matériau, considérées en relation avec la propagation du feu du dégagement de fumée et/ou de gaz toxiques [IBN -09-1].

Si le feu provient de l'intérieur, c'est avant tout la résistance au feu du support de toiture qui est déterminante. En cas de feu provenant de l'extérieur, une couche de protection lourde et ininflammable constitue la meilleure solution pour empêcher la propagation de l'incendie.

L'annexe 3 (pp. 145 et suivantes) traite plus précisément la problématique du comportement au feu des toitures.

La nouvelle classification européenne, basée sur 3 scénarios d'incendie (ou 3 niveaux d'attaque thermique) et cinq méthodes d'essais, distingue sept classes principales de matériaux, suivant la NBN EN 13501-1 [IBN -09-1].

- les classes A1 et A2 pour les produits incombustibles ou à combustion très limitée ;
- les classes B, C, D et E pour les produits combustibles ;
- la classe F pour les produits non classés ou produits qui ont échoué à l'essai le moins sévère.

Outre ces 7 classes principales, des indices complémentaires sont définis pour les aspects suivants :

- la fumée (classe-s) des revêtements de sol (s1 et s2) et des autres matériaux de construction (s1, s2 et s3). L'indice s1 correspond à un faible dégagement de fumée et s3 à un dégagement de fumée illimité.
- la formation de gouttelettes et particules en feu (classe-d) pour tous les matériaux de construction (d0, d1 et d2), excepté les revêtements de sol. L'indice d0 correspond à aucune formation de gouttelettes, la classe d2 à une formation illimitée.

Lors du choix des produits de revêtements de sols, murs et plafonds, ce choix coordonné est soumis à la combinaison acceptable des produits de revêtements de sols et des produits autres que revêtements de sols, selon leurs indices spécifiques s et d. Ainsi, les produits autres que revêtements de sols de classe A1 se combinent avec des produits de revêtements de sols A1FL ; les produits autres que revêtements de sols de classe A2 indice s1 se combinent avec des produits de revêtements de sols A2FL s1, etc.

Signalons encore que :

- la Commission Européenne a pris une décision concernant les produits pour lesquels on suppose qu'ils peuvent toujours être considérés comme incombustibles (classe A1) et qui ne doivent donc pas être soumis aux méthodes d'essais. La liste des produits supposé incombustibles (classe A1) se retrouvent dans la décision 96/603/EG du 4 octobre 1996 de la Commission.
- en outre, pour certains produits de construction, les caractéristiques de réaction au feu peuvent être déterminées sans que des essais soient effectués. Ils sont repris dans une liste intitulée "Classified without further test".

LES FONCTIONS DE L'ENVELOPPE

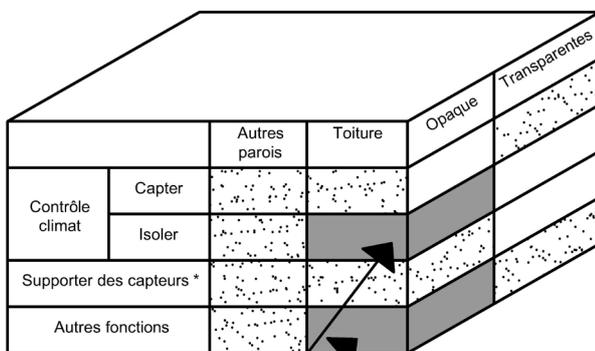
LES PERFORMANCES DEMANDÉES AUX PAROIS EXTÉRIEURES OPAQUES D'UN BÂTIMENT 13

FONCTIONS PRINCIPALES.....	13
LE CONTRÔLE DU CLIMAT.....	14
<i>Climat local et architecture.....</i>	14
<i>Notion de "peau respirante".....</i>	14
<i>La chaleur.....</i>	15
LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT.....	18
<i>Le bruit.....</i>	18
<i>Sécurité à l'effraction.....</i>	18
<i>Sécurité au feu.....</i>	19
LA FONCTION STRUCTURALE.....	19
LA FONCTION VISUELLE.....	19

LES PERFORMANCES DEMANDÉES AUX PAROIS EXTÉRIEURES OPAQUES D'UN BÂTIMENT

FONCTIONS PRINCIPALES

Le présent opuscule aborde la problématique de l'isolation thermique de la toiture en tant que paroi opaque. Il ne traite donc pas de la captation solaire ni des parois transparentes.



* thermiques ou photovoltaïques

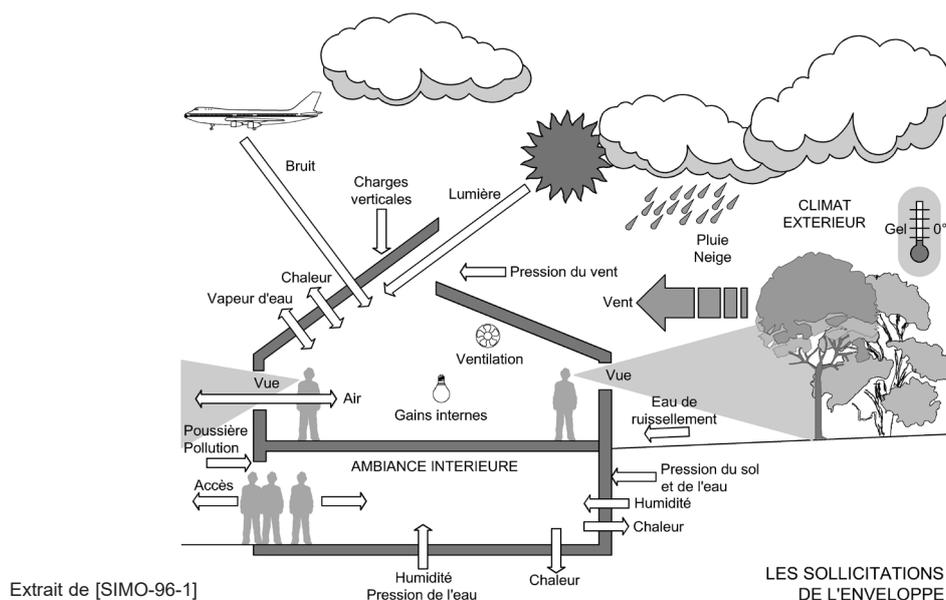
FONCTIONS ABORDÉES DANS CET OUVRAGE

La fonction principale de l'enveloppe est d'enclorre un espace, qu'elle protège de l'environnement extérieur. Elle contribue au contrôle du climat.

Une seconde fonction est structurale : soit l'enveloppe est elle-même la structure portante, soit ses éléments doivent résister localement pour transmettre les charges extérieures à une structure principale.

La troisième fonction est visuelle, car c'est l'enveloppe qui façonne le bâtiment, lui donne son expression architecturale et l'intègre dans l'environnement.

LES FONCTIONS DE L'ENVELOPPE



LE CONTRÔLE DU CLIMAT

CLIMAT LOCAL ET ARCHITECTURE

Le climat local peut influencer l'implantation du bâtiment et son architecture. Réciproquement, son enveloppe doit enclore un espace qu'elle protège des variations du climat extérieur.

NOTION DE "PEAU RESPIRANTE"

L'enveloppe, comme une "peau respirante", agit telle une barrière pour certains éléments et un filtre pour d'autres.

• L'eau

L'eau sous sa forme de liquide libre doit être arrêtée totalement par l'enveloppe.

• La neige

La neige représente une charge dont il faut tenir compte dans le calcul de la structure portante. La neige poudreuse peut s'infiltrer dans la zone de couverture et, à sa fonte, doit pouvoir être évacuée.

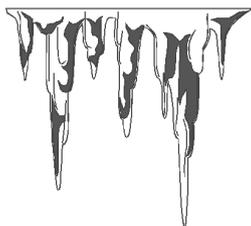
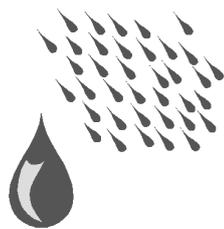
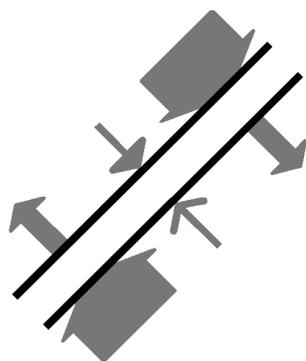
• La glace

L'eau pénétrée dans l'enveloppe, en gelant, peut causer de nombreux dégâts aux parois extérieures.

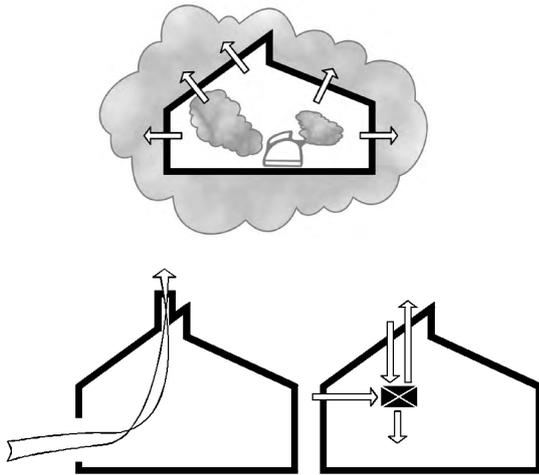
• La vapeur d'eau

En conditions hivernales, la température et l'humidité de l'air sont plus élevées dans le bâtiment qu'à l'extérieur.

L'intérieur du bâtiment est donc comme un réservoir de chaleur et de vapeur d'eau, qui tendent à s'échapper vers l'extérieur au travers des parois extérieures. Si la température est basse et le degré d'humidité élevé, le risque de condensation superficielle et/ou interne à la paroi est grand. La composition de l'enveloppe doit éviter les noeuds constructifs non résolus de sorte qu'en aucun endroit, on n'y rencontre des conditions de basse température qui, alliées à une forte teneur en vapeur d'eau, pourraient occasionner des dégradations.



LES FONCTIONS DE L'ENVELOPPE



En effet, l'eau de condensation peut favoriser le développement de champignons, entraîner la dégradation de certains matériaux et, combinée au gel, l'éclatement des matériaux imprégnés.

Toutefois, l'enveloppe à elle seule n'est pas capable de réguler l'humidité relative des locaux : seul le système de ventilation permet d'évacuer la vapeur d'eau en excès.

• L'air

Vis-à-vis de l'air, l'enveloppe agit plus comme un régulateur que comme une barrière.

Le renouvellement périodique de l'air de l'ambiance intérieure est indispensable, mais doit être géré.

LA CHALEUR

Le climat local extérieur est caractérisé par :

- la température de l'air ;
- les conditions de rayonnement solaire ;
- les mouvements de l'air ;
- l'humidité relative de l'air.

• Isolation thermique

L'enveloppe extérieure doit limiter les pertes de chaleur en hiver et protéger de la radiation solaire en été. Cette propriété d'atténuation dépend des caractéristiques de transmission thermique des parois par conduction, convection et radiation. La nécessité d'isoler thermiquement est surtout importante dans le cas des parois extérieures et de celles connexes à des espaces non chauffés (cave, grenier, garage...).

Dans le cas d'un espace sous toiture habité, l'isolation thermique des versants de la toiture est d'autant plus cruciale que, par stratification thermique de l'air intérieur, la température de l'air proche du versant est plus élevée que celle de l'air proche des autres parois extérieures. Cela accroît la différence entre les températures de l'air intérieur et extérieur entourant le versant de toiture et donc les déperditions à travers le versant.

La position de la zone de coupure thermique dans la paroi extérieure n'a guère d'influence sur la résistance thermique de la paroi. Elle peut, par contre, influencer d'autres performances, tant techniques qu'architecturales.

• Inertie thermique des parois

L'inertie thermique se combine souvent à l'isolation thermique des parois comme facteur de confort.

Le confort thermique des maisons anciennes aux murs très épais en matériaux peu isolants, provenait d'un compromis heureux entre une isolation thermique relativement médiocre et une grande inertie thermique, alliée à une occupation constante. Le temps nécessaire à la redistribution des calories accumulées par les parois résulte du volant d'inertie thermique. Un fort volant d'inertie thermique conduit :

- en hiver, à un fonctionnement plus régulier de l'installation de chauffage, permettant une puissance installée moindre et des variations de la température intérieure plus lentes et plus réduites, donc plus acceptables ;

	Débit nominal requis (m³/h)		
	par m² de plancher	avec min	et max
AMENÉE			
living	3,6	75	150
chambre à coucher, bureau, salle de jeu	3,6	25	72 (*)
EVACUATION			
cuisine fermée, buanderie, local où séchage du linge, sdb	3,6	50	75
cuisine ouverte	3,6	75	
W.C.		25	
couloirs, halls, dégagements	3,6		
TRANSFERT			
minimum = 50 m³/h, soit, pour $\Delta P = 2$ Pa, une ouverture de 140 cm² au total entre cuisine et living et/ou couloir et/ou hall et/ou cage d'escalier.			
minimum = 25 m³/h, soit, pour $\Delta P = 2$ Pa, une ouverture de 70 cm² entre :			
- living et couloir et/ou hall et/ou cuisine ;			
- chambre à coucher, étude, jeux et couloir et/ou hall et/ou salle de bain ;			
- salle de bain, buanderie et couloir et/ou hall et/ou chambre à coucher ;			
- W.C. et couloir ou hall.			
(*) Le débit nominal peut être limité à 72 m³/h			

DÉBIT NOMINAL DE VENTILATION, REQUIS PAR L'ANNEXE VHR DE L'AGW PEB DU 15/12/16 [GW -16-2]

Pour plus de détails, voir le Guide Pratique pour Architectes consacré à la ventilation.

COMPOTEMENT THERMIQUE DE L'ENVELOPPE OPAQUE SANS CHAUFFAGE ET SANS ENSOLEILLEMENT		
Variation $T_{ext.}$	Type d'enveloppe	Variation $T_{int.}$ sans chauffage
<p>EXT.</p>	<p>Enveloppe légère non isolée</p>	<p>INT.</p>
<p>EXT.</p>	<p>Enveloppe légère isolée</p>	<p>INT.</p>
<p>EXT.</p>	<p>Enveloppe massive ou lourde non isolée</p>	<p>INT.</p>
<p>EXT.</p>	<p>Enveloppe lourde isolée à l'extérieur de la masse</p>	<p>INT.</p>

• Capacité thermique

C'est la capacité qu'a un matériau d'emmagasiner la chaleur par rapport à son volume ou la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 m³ de ce matériau.

Cette capacité est le produit de la masse volumique (ρ en kg/m³) et de la chaleur spécifique (C en J/kgK).

• Effusivité thermique E_f

Cette propriété des matériaux n'est pas prise en compte dans les bilans thermiques.

L'effusivité thermique est pourtant un paramètre non négligeable du confort thermique, et donc des besoins et des dépenses énergétiques, en tant que contreponds des inconvénients que peut représenter une trop grande inertie thermique. Elle mesure la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur provenant d'un autre matériau plus chaud que lui et mis en contact avec lui.

L'effusivité thermique E_f indique combien de kilojoules ont pénétré sur 1m² de surface du matériau, une seconde après qu'elle ait été mise en contact avec une autre surface de 1 m² plus chaude qu'elle de 1 degré Kelvin.

E_f est la racine carrée du produit de la capacité thermique ρC par la conductivité thermique λ :

$$E_f = \sqrt{(\rho \times C \times \lambda)} \quad [\text{kJ/m}^2\text{Ks}^{1/2}]$$

Un E_f élevé signifie que le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie, sans se réchauffer notablement. Par exemple, la plupart des matériaux de construction en maçonnerie ont un E_f de l'ordre de 1,5 à 2 kJ/m²Ks^{1/2}.

Un E_f plus faible signifie que le matériau se réchauffe plus vite. Par exemple, les isolants thermiques ont un E_f de l'ordre de 0,04 kJ/m²Ks^{1/2}. En pratique, les matériaux dont le E_f est faible sont isolants et ceux dont le E_f est élevé sont conducteurs :

- $E_f \leq 0,33 \text{ kJ/m}^2\text{Ks}^{1/2}$
⇒ matériaux subjectivement chauds ;
- $0,33 \leq E_f \leq 0,67 \text{ kJ/m}^2\text{Ks}^{1/2}$
⇒ matériaux chauds ;
- $0,67 \leq E_f \leq 1,25 \text{ kJ/m}^2\text{Ks}^{1/2}$
⇒ matériaux donnant une impression neutre à fraîche ;
- si $E_f \geq 1,25 \text{ kJ/m}^2\text{Ks}^{1/2}$
⇒ matériaux froids.

La chaleur subjective ressentie par le corps en contact avec la paroi est inversement proportionnelle à l'effusivité du matériau de revêtement de celle-ci.

Le bois est typiquement un matériau dont l'effusivité est faible, apportant une chaleur subjective de contact élevée, donc confortable. Contrairement au bois, le métal, la pierre ou encore le carrelage sont des matériaux dont l'effusivité thermique est importante.

Par exemple, quelques ordres de grandeurs :

- E_f du bois = 0,4 kJ/m²Ks^{1/2} ;
- E_f de la brique de parement = 1,1 kJ/m²Ks^{1/2} ;
- E_f du béton non armé = 1,8 kJ/m²Ks^{1/2} ;
- E_f de la laine minérale = 0,025 kJ/m²Ks^{1/2}.

- en saison d'été, à une température intérieure clémente en soirée et fraîche pendant la journée.

- **Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire réchauffe les parties opaques de l'enveloppe qui, par conduction, diffusent cette chaleur à l'intérieur du bâtiment. Le rayonnement solaire au travers des vitrages (lanterneaux, verrières) constitue, par effet de serre, un apport de chaleur important. Le contrôle des apports solaires est indispensable, car le rayonnement solaire peut produire des surchauffes, qu'une régulation usuelle maîtrise mal.

En conclusion, il est recommandé de stocker la chaleur dans les parois intérieures. Ce principe peut avoir une incidence sur les choix des matériaux des parties intérieures de l'enveloppe extérieure.

En ce qui concerne l'espace sous toiture, la conception doit tenir compte de sa sensibilité particulière par le fait de son exposition au rayonnement solaire. Dans le cas de toitures à structure légère, cette sensibilité est aggravée par la présence relativement limitée de parois massives susceptibles de stocker la chaleur.

La toiture peut participer à la captation solaire génératrice d'énergie en accueillant des capteurs thermiques et/ou photovoltaïques.

- **Pénétration de l'air extérieur**

La pénétration de l'air extérieur au travers des parois influence également la température de l'air ambiant, la température des parois, ainsi que le taux de renouvellement d'air.

- **Température de surface interne des parois**

Les grandes surfaces froides occasionnent la radiation du corps vers elles; il faut donc les éviter, par exemple en équipant les grandes ouvertures de vitrage isolant. La température de surface interne des parois est également importante et sera conditionnée par le choix du type de paroi et du type de matériau.

- **Mouvement de l'air ambiant**

Il y a lieu d'être attentif aux courants d'air qui résulteraient de la ventilation, des convections engendrées par le système de chauffage et de la disposition spatiale des locaux.

- **Humidité relative**

Le taux courant d'humidité relative de l'air ambiant est compris entre 30 et 70 % pour des températures d'air entre 20 et 25° C (voir p. 10).

Dans le cas d'un local humide et chaud (salle de bain, de douche, cuisine) situé sous la toiture, la température élevée de l'air le rend capable de contenir potentiellement plus de vapeur d'eau qu'en d'autres espaces du bâtiment. En cas de paroi froide ou de noeud constructif, des condensations importantes sont à craindre.

LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT

LE BRUIT

Les activités extérieures sont, en général, sources de bruits aériens, qu'il faut atténuer.

Suivant le type d'activités intérieures, des niveaux sonores maxima résultant de l'interférence de différents bruits ont été établis comme limite supérieure acceptable pour le confort acoustique des occupants.

Pour atténuer une trop forte transmission directe des bruits extérieurs aériens, l'enveloppe doit offrir le plus de résistance possible au passage d'air.

Le choix de l'enveloppe et sa conception d'ensemble jouent un rôle essentiel dans l'atténuation des bruits extérieurs.

Pour éviter la vibration de l'air intérieur sous l'effet des bruits extérieurs, deux systèmes peuvent être utilisés :

- une masse importante de l'enveloppe ;
- une enveloppe constituée de parties de masses différentes solidarifiées par des attaches amortissant les vibrations; elle peut être complétée d'une matière absorbant les sons, interposée entre ses deux parties.

En cas de toiture à ossature légère, on recourt en général au second système.

Pour éviter la vibration de l'air intérieur sous l'effet des bruits d'impact extérieurs (pluie, grêle), la deuxième solution s'impose.

Pour limiter la réverbération intérieure, on peut encore compléter le système choisi par le recours à des pièges à son intégrés à l'enveloppe. Le lecteur trouvera plus d'informations dans la NBN S01-400-01 [IBN -08-3] pour les logements et NBN S01-400-02 pour les écoles [IBN -12].

SÉCURITÉ À L'EFFRACTION

La sécurité est une condition absolue de la vie humaine, qui a amené l'homme à construire une enveloppe protectrice.

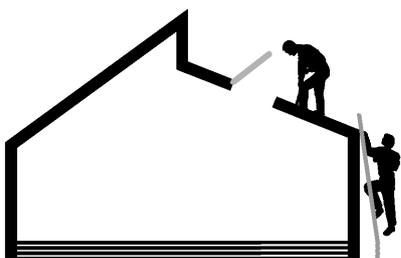
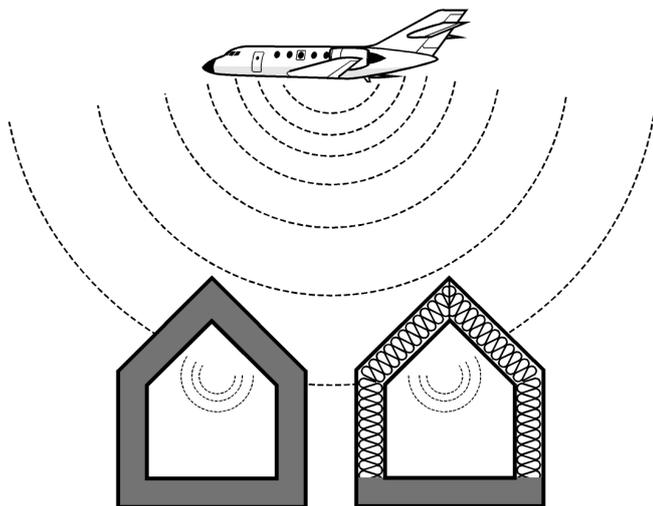
L'enveloppe externe lui fournit cette protection. Toutefois, les ouvertures restent des points sensibles :

- les éléments de l'enveloppe doivent être suffisamment solides, résister à un démantèlement rapide ou silencieux ;
- les ouvertures, fenêtres, portes, lanterneaux sont souvent autant de points fragiles, propices à l'effraction ;
- l'implantation des points sensibles doit permettre un contrôle efficace et prévoir un éclairage naturel ou artificiel adéquat.

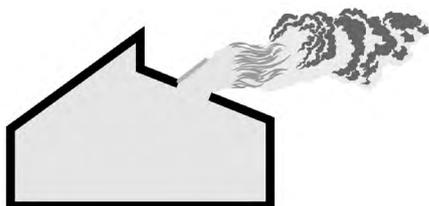
Lorsqu'elle est aisément accessible, la toiture peut constituer, en cas d'intrusion, un espace de circulation et de pénétration.

La performance acoustique des immeubles d'habitation en matière de résistance aux bruits aériens est définie dans la norme NBN S01-400-1 : 2008, où l'isolement acoustique standardisé in situ des façades doit être, selon l'environnement dans lequel se situe le bâtiment, au moins supérieur à :

- 30 à 40 dB pour les locaux de jour ;
- 30 à 42 dB pour les locaux de nuit.



SÉCURITÉ AU FEU



Le bâtiment est éventuellement divisé en compartiments, regroupant un ensemble de locaux, et délimité par des parois dont la fonction est d'empêcher, pour une durée déterminée, la propagation d'un incendie au(x) compartiment(s) contigu(s). Ainsi, l'enveloppe de chaque compartiment doit être conçue de façon à empêcher, durant une période définie, un incendie s'étant déclaré dans le compartiment, de se propager aux autres compartiments ou aux bâtiments voisins.

Ceci implique une bonne résistance au feu des parois (murs, planchers, plafonds) adjacentes aux autres compartiments et une bonne réaction au feu des matériaux de revêtement, pour limiter la vitesse de développement d'un incendie.

La résistance au feu d'une paroi exprime la durée pendant laquelle 3 critères restent satisfaits :

- la stabilité au feu ;
- l'étanchéité aux flammes et aux gaz ;
- l'échauffement réduit de la face non exposée de la paroi.

La réaction au feu est classée, dans l'ordre des performances décroissantes, de A1 à F (voir p. 11).

Les gaz et les flammes d'un incendie, montant naturellement vers la toiture, l'exposent tout particulièrement.

LA FONCTION STRUCTURALE

La fonction structurale est la capacité de l'enveloppe à résister aux charges, à savoir :

- le poids propre ou poids mort de tous les éléments eux-mêmes (planchers, toitures, murs...) ;
- les charges extérieures ou surcharges (vent, accès pour entretien, neige, eau...) ;
- les charges intérieures ou surcharges d'utilisation.

LA FONCTION VISUELLE

Les façades et les toitures expriment l'architecture d'un bâtiment et contribuent à son intégration dans l'environnement.

La peau extérieure d'un bâtiment est amenée à changer d'apparence dans le temps, mais différemment selon la nature des matériaux et les conditions d'exposition.

Il faut donc :

- choisir des matériaux qui vieilliront le mieux en fonction des conditions d'exposition ;
- composer la peau extérieure pour que le vieillissement se réalise selon une évolution désirée.

Plusieurs matériaux possèdent en eux des caractéristiques de texture, de couleur, d'absorption de l'eau, etc. leur assurant une bonne tenue dans le temps.

LES TECHNOLOGIES COMMUNES AUX TOITURES PLATES ET INCLINÉES

L'ISOLATION THERMIQUE.....	21
INTRODUCTION	21
LES TYPES D'ISOLANTS THERMIQUES	23
CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE	23
<i>Coefficient de transmission thermique U d'une paroi opaque (cas habituel).....</i>	<i>23</i>
<i>Valeur U d'un élément de construction d'épaisseur variable.....</i>	<i>24</i>
<i>Correction pour les fixations mécaniques perforant la couche d'isolation.....</i>	<i>24</i>
<i>Éléments de construction constituées de couches homogènes et non homogènes.....</i>	<i>25</i>
<i>Cas de la toiture plate inversée.....</i>	<i>25</i>
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	25
BUT DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	25
CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	26
<i>Détermination du volume à étanchéfier.....</i>	<i>26</i>
<i>Construction bois.....</i>	<i>26</i>
<i>Passages de conduites.....</i>	<i>26</i>
TYPES D'ÉCRAN À L'AIR	27
VALEURS TYPES.....	27
<i>Taux de renouvellement d'air n_{50}.....</i>	<i>27</i>
<i>perméabilité à l'air de l'enveloppe v_{50}.....</i>	<i>27</i>
COMMENT MESURER L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR ?.....	28
RÉLGEMENTATION	28
LE PARE-VAPEUR.....	28
LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR.....	28
LES TYPES DE PARE-VAPEUR.....	29
LA FINITION INTERIEURE	31
LES COUPLES GALVANIQUES	31

L'ISOLATION THERMIQUE

INTRODUCTION

La **conductivité thermique** λ d'un matériau représente la quantité de chaleur traversant, par unité de temps, un mètre carré d'un matériau homogène ayant une épaisseur d'un mètre et soumis à une différence de température de un degré Kelvin entre ses deux faces [CSTC-92-2]. **A épaisseur égale, une plus faible conductivité signifie une meilleure résistance thermique.**

Il faut noter que la conductivité thermique d'un matériau peut être déterminée (λ_D ou "valeur déclarée") par :

- son Agrément Technique (ATG) délivré par l'Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction (UBAtc) ;
- son Agrément Technique Européen (ATE) ;
- son marquage CE accompagné de la déclaration de performance ;
- la valeur reprise dans la base de données produits (www.epdb.be).

On peut utiliser les valeurs λ_U par défaut reprise dans l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2]. Les valeurs λ_U sont supérieures à celles qui sont déterminées selon la méthode de calcul statistique et qui sont contrôlées dans le cadre de la certification ATG.

Les valeurs λ_{U_i} reprises au tableau ci-dessous correspondent aux conditions intérieures (matériau ne pouvant pas être mouillé) et les valeurs λ_{U_e} correspondent aux conditions extérieures (matériau pouvant être mouillé).

Lorsque la toiture est bien isolée, la transmission de chaleur et les mouvements thermiques du support de toiture sont limités et la formation de moisissures et de condensation superficielle est évitée.

Le pouvoir isolant est déterminé par :

- la valeur λ de conductivité thermique (voir définition ci-contre) ;
- l'épaisseur de l'isolation, ainsi que par la qualité de mise en oeuvre.

Le matériau doit également conserver une efficacité isolante suffisante dans le temps. Celle-ci dépendra du comportement du matériau aux sollicitations mécaniques, à l'humidité, au vieillissement, etc.

TYPE D'ISOLANT	CONDITIONNEMENT COMMERCIAL	MASSE VOLUMIQUE [kg/m ³]	CONDUCTIVITE THERMIQUE λ [W/mK]		PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU μ [état sec]	PERMEABILITE A L'AIR	RESISTANCE A LA COMPRESSION [daN/cm ²]	REACTION AU FEU
			λ_D	λ_{U_i}				
Laine minérale MW	Panneaux rigides ou semi-rigides, rouleaux, flocons	25 à 175	0,032 à 0,041	0,050	1,2 - 1,3	Totalement perméable	0,2 à 0,5 (*)	Non combustible (sauf si recouverte de papier) (***)
Verre cellulaire CG	Panneaux rigides	120 à 135	0,038 à 0,048	0,055	Infini	Imperméable	7 à 16 (à la rupture)	Non combustible
Perlite expansée EPB	Grains ou panneaux rigides	150	0,052 à 0,055	0,060	5 - 7	Perméable	3,5 (*)	Non combustible
Polyuréthane PUR	Panneaux rigides avec ou sans emboîtements	30	0,021 à 0,029	0,035	10 - 100	Très faiblement perméable	1,2 (*)	Combustible
Polyisocyanurate PIR	Panneaux rigides avec ou sans emboîtements	30	0,024 à 0,029	0,035	10 - 100	Très faiblement perméable	1,2 (*)	Difficilement inflammable
Polystyrène expansé EPS	Panneaux rigides avec ou sans emboîtements	25	0,031 à 0,040	0,050	15 - 60	Faiblement perméable	0,7 à 3,5 (*)	Combustible
Polystyrène extrudé XPS	Panneaux rigides avec ou sans emboîtements	30	0,027 à 0,034	0,045	150 - 300	Très faiblement perméable	3 à 7 (*)	Combustible
Mousse phénolique PF	Panneaux	40	0,020 à 0,025	0,045 (**)	1,5 - 3	Très faiblement perméable	1,2 (*)	Difficilement inflammable
Liège ICB	Panneaux	100 à 120	$\lambda_{doc} = 0,045$	0,050	4,5 - 29	Perméable	1	Difficilement inflammable
Cellulose CEL	Flocons à insuffler ou panneaux semi-rigides/flexibles	35 à 50 (en vrac) 70 à 100 (en panneaux)	0,037 à 0,050	0,060	1-2	Totalement perméable	(Sans objet)	Auto-extinguible (agents ignifuges)
Fibre de bois FB	Panneaux rigides Panneaux flexibles	140 à 280 35 à 50	0,040 à 0,060 0,040 à 0,060	0,060 0,060	3-5 1-2	Totalement perméable	1	Difficilement inflammable

(*) à 10 % de déformation (valeur moyenne)

(**) Pour les panneaux d'isolation revêtus en mousse phénolique à cellules fermées, cette valeur est ramenée à 0,030 W/(mK).

(***) La laine de verre fond beaucoup plus rapidement que la laine de roche. Cette dernière offre donc une meilleure résistance au feu que la laine de verre.

TABLEAU REPRENANT LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX ISOLANTS [IBN -01] [CSTC-89-2] [CSTC-92-2]

LES MOUSSES SYNTHÉTIQUES

- Le polyuréthane PUR et le polyisocyanurate PIR
Les panneaux de polyuréthane destinés aux toitures sont couverts d'un revêtement synthétique sur les deux faces. La résistance au délaminage dû au vent du PUR est bonne en soi, mais la plupart des étanchéités bitumineuses doivent être collées en semi-adhérence sur le PUR, ce qui les rend moins résistantes à la tempête. On peut améliorer cette résistance par un collage de la première couche d'étanchéité en adhérence totale avec une colle bitumineuse à froid, par lestage, ou par un collage partiel préalable de la couche perforée.

Les panneaux de polyisocyanurate présentent un meilleur comportement au feu que le polyuréthane. L'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2] détermine la correction de la valeur R à prendre en compte pour une isolation en PUR projetée in situ.

- Le polystyrène expansé EPS
En toiture chaude, il importe d'avoir des panneaux suffisamment stabilisés et recouverts sur les deux faces d'un voile de verre bitumé avec recouvrement au droit des joints. L'EPS ne peut pas être exposé à des températures excédant 70°C ; c'est pourquoi il est important de recouvrir l'étanchéité par un lestage.
- Le polystyrène extrudé XPS
Il se caractérise par une structure d'extrusion qui empêche l'absorption d'humidité, ce qui permet son application dans une toiture inversée.
Sa mise en oeuvre dans une toiture chaude est exclue à cause de son coefficient de dilatation thermique élevé.
- La mousse phénolique PF
Un panneau à base de mousse phénolique possède une structure cellulaire fermée, un bon comportement au feu. Seules les étanchéités de toiture lestées ou fixées mécaniquement sont autorisées.

LES MATÉRIAUX D'ORIGINE MINÉRALE

- La laine de roche MW
Les fibres de laine de roche sont liées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux et des panneaux. Ceux-ci peuvent présenter différentes rigidités et finitions de surface.
Les panneaux de laine de roche destinés aux toitures plates sont de densité importante et de fabrication particulière (sens des fibres) pour garantir une rigidité suffisante et une résistance suffisante au délaminage. Ces panneaux sont surfacés de voile de verre et/ou de bitume.
- La laine de verre MW
Les fibres de laine de verre sont liées à l'aide d'un produit thermodurcissant pour former des rouleaux et des panneaux. Ceux-ci peuvent présenter différentes rigidités et finitions de surface. La laine de verre a une composition uniforme.
La laine de verre est totalement perméable à la vapeur d'eau mais non hygroscopique. Elle est non capillaire et totalement perméable à l'air. Elle se caractérise par une bonne stabilité thermique et un comportement au feu un peu moins bon que la laine de roche.

- Le verre cellulaire CG

Le verre cellulaire est une mousse de verre obtenue par expansion de celui-ci lorsqu'il est en fusion. Les cellules ainsi formées contiennent un gaz inerte.

Le CG se caractérise par une grande étanchéité à la vapeur d'eau. Il n'exige habituellement pas d'écran pare-vapeur, à condition que le matériau soit enrobé de bitume sur toutes ses faces et que les joints soient bien remplis de bitume. Il faut tenir compte de la fragilité de ce matériau en faible épaisseur.

- La perlite expansée EPB

Elle est obtenue à partir de pierre volcanique rhyolitique concassée et expansée à une température d'environ 900°C. Elle est mélangée à des fibres cellulosiques et à un liant bitumineux pour former des panneaux.

Elle se caractérise par une grande résistance à la compression et au poinçonnement mais elle ne résiste pas à une humidification prolongée.

LES MATÉRIAUX D'ORIGINE VÉGÉTALE

- La fibre de bois

Elle est obtenue à partir des résidus de bois de scierie. Ceux-ci sont agglomérés, sans liant synthétique, grâce à la lignine du bois. Ils se présentent sous la forme de panneaux auto-agglomérés de diverses formulations, densités, profilages et épaisseurs. Ces panneaux s'utilisent comme isolation à part entière ou comme panneaux techniques complémentaires d'isolation. Ils sont difficilement inflammables.

- La laine de cellulose

Elle provient du papier recyclé. Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture et ignifugeants, variables selon les fabricants. Elle se présente en vrac, compactée ou décompactée, en panneaux isolants texturés ou en panneaux d'agencement. Elle est auto-extinguible.

- Le liège expansé

Le liège est réduit en granules puis expansé à la vapeur à haute température (300°C). L'aggloméré est ensuite découpé selon les épaisseurs désirées. Le pouvoir isolant du liège expansé tient à l'air enfermé dans ses cellules fermées. Il se présente en granules, en panneaux ou en éléments composites préfabriqués. Il est difficilement combustible.

- Le chanvre

Les particules issues de la partie centrale de la tige (chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues (filasse) sont soumises à un traitement d'imprégnation par les silicates.

Il existe plusieurs présentations :

- en granules de chènevotte : la chènevotte est défibrée mécaniquement en paillettes de 5 à 15 mm de longueur ;
- en granules et fibres longues (chanvre entier) ;
- en fibres longues seules (laine de chanvre) : la filasse séparée de la chènevotte est ensuite affinée et calibrée pour donner une laine homogène (en vrac, en rouleaux ou en panneaux semi-rigides). Il est difficilement inflammable.

- Le lin

Les produits actuels d'isolation sont fabriqués à partir des fibres courtes de la plante, non utilisées dans l'industrie textile. La matière brute reçoit un premier traitement aux sels minéraux, puis elle est cardée de manière à produire des couches superposées et thermoliées avec des fibres de

polyester pour former la ouate. Elle est ensuite séchée, aérée et découpée selon les différents conditionnements. La laine de lin se présente en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides ou en feutre. Elle est difficilement inflammable.

- La laine de coco

Elle est issue de la bourre entourant le péricarpe des noix de coco. Elle se présente en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides (les fibres sont liées et texturées par une colle au latex naturel) ou en feutre. Elle est ignifugée au sel de bore.

- La laine de coton

Les fibres ne reçoivent aucun traitement chimique ; elles sont simplement cardées et reçoivent un traitement ignifugeant au sel de bore. Elle se présente en vrac, en rouleaux ou en feutre.

LES MATÉRIAUX D'ORIGINE ANIMALE

- La laine de mouton

Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour les débarrasser des impuretés et surtout du suint, sécrétion de l'épiderme de l'animal. La laine reçoit ensuite un traitement insecticide et un traitement contre le feu, principalement à base de sels de bore. Puis elle est cardée et texturée au moyen de fibres thermofusibles (polyester), ou sur un canevas en polypropylène. Elle se présente en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides ou en feutre.

LES PRODUITS MINCES RÉFLÉCHISSANTS (PMR)

Un produit mince réfléchissant est constitué d'une mince couche de matériau recouverte, sur une ou deux faces, de feuilles réfléchissantes (feuilles d'aluminium ou films aluminisés). La couche de matériau intermédiaire peut être une mousse souple, un film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air, un feutre d'origine animale... Certains produits sont de type multi-couches. L'épaisseur totale des produits réfléchissants varie de quelques millimètres à quelques centimètres. Vu son épaisseur, un produit mince réfléchissant possède une résistance thermique intrinsèquement faible. Pour pouvoir bénéficier de l'effet réfléchissant des couches superficielles, le produit doit être placé en vis-à-vis d'une ou de 2 lames d'air non ventilées, ce qui est très difficile à réaliser en pratique (CSTC Contact n° 6 de juin 2005, article sur les produits minces réfléchissants [CSTC-05]). Selon cette étude, un produit mince réfléchissant posé de façon optimale pourrait prétendre, tout au plus, égaler une isolation en laine minérale de 4 à 6 cm d'épaisseur. A lui seul, un produit mince réfléchissant n'apporte donc pas la résistance thermique suffisante pour respecter les exigences réglementaires s'appliquant aux parois du bâtiment.

LES TYPES D'ISOLANTS THERMIQUES

Les encadrés des pages précédentes reprennent les principaux types d'isolants thermiques.

Pour plus d'informations, le lecteur est invité à consulter l'annexe 1 reprenant les caractéristiques thermophysiques des matériaux.

Nous ne considérons ici que les matériaux de toiture dont la valeur λ est tout au plus égale à 0,065 W/mK et qui disposent d'un agrément technique.

Vu la faible résistance au vent de la laine de verre qui se délamine plus facilement, celle-ci ne peut être utilisée dans une toiture plate que si la toiture est lestée ou si la laine de verre est fixée mécaniquement.

CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION

COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE U D'UNE PAROI OPAQUE (CAS HABITUEL)

En ce qui concerne les parois opaques, les normes de calcul des coefficients de transmission thermique s'accordent à considérer que la résistance thermique totale R_t est la somme des résistances thermiques partielles des couches composant la paroi :

LA RÉSISTANCE THERMIQUE D'UN MATÉRIAU R

C'est la capacité qu'a ce matériau de freiner le flux de chaleur à travers lui.

La résistance thermique d'une couche d'un matériau homogène donné est :

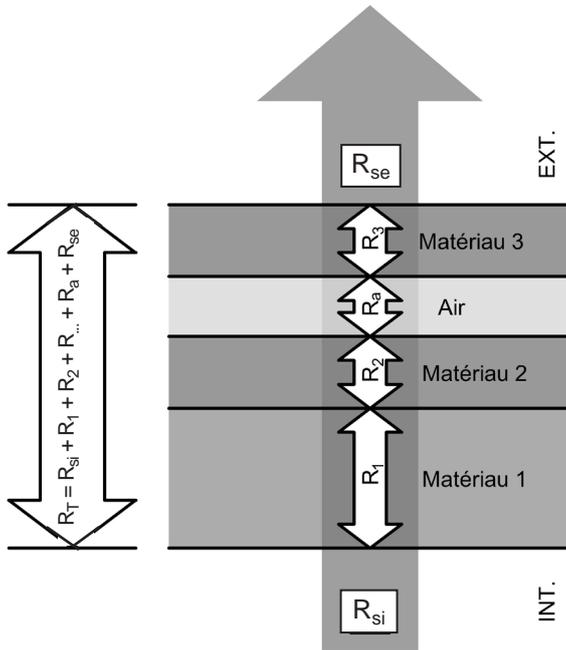
- directement proportionnelle à son épaisseur d [m] ;
- indirectement proportionnelle à sa conductivité thermique λ [W/mK].

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R_t = R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + \sum R_u + \sum R_a + R_{se} \quad [m^2K/W]$$

où :

- R_{si} [m^2K/W] = résistance thermique du côté intérieur de la paroi, que doit vaincre le flux thermique traversant la paroi, pour passer d'un échange par convection, à un échange par conduction ;
- d [m] = épaisseur d'une couche constituée d'un matériau homogène ;
- λ [W/mK] = conductibilité thermique de ce matériau homogène ;
- R_u [m^2K/W] = résistance thermique utile d'une couche constituée d'un matériau non homogène (blocs creux de béton, par exemple) ;
- R_a [m^2K/W] = résistance thermique d'une couche d'air (peu, pas ou moyennement ventilée) ;
- R_{se} [m^2K/W] = résistance thermique du côté extérieur de la paroi, que doit vaincre le flux thermique traversant la paroi, pour passer d'un échange par conduction, à un échange par convection.



Le coefficient de transmission thermique U (anciennement dénommé k) d'une paroi est, par définition, l'inverse de sa résistance totale :

$$U = \frac{1}{R_t} \quad [W/m^2K]$$

VALEUR U D'UN ÉLÉMENT DE CONSTRUCTION D'ÉPAISSEUR VARIABLE

Dans le cas d'éléments de construction composés de formes irrégulières et/ou de couches de construction d'épaisseur variable, la résistance thermique totale de l'élément de construction varie sur toute sa surface. C'est la raison pour laquelle une valeur U moyenne doit être déterminée pour l'ensemble de l'élément.

Une méthode de détermination simplifiée consiste à négliger la résistance de la couche d'épaisseur variable.

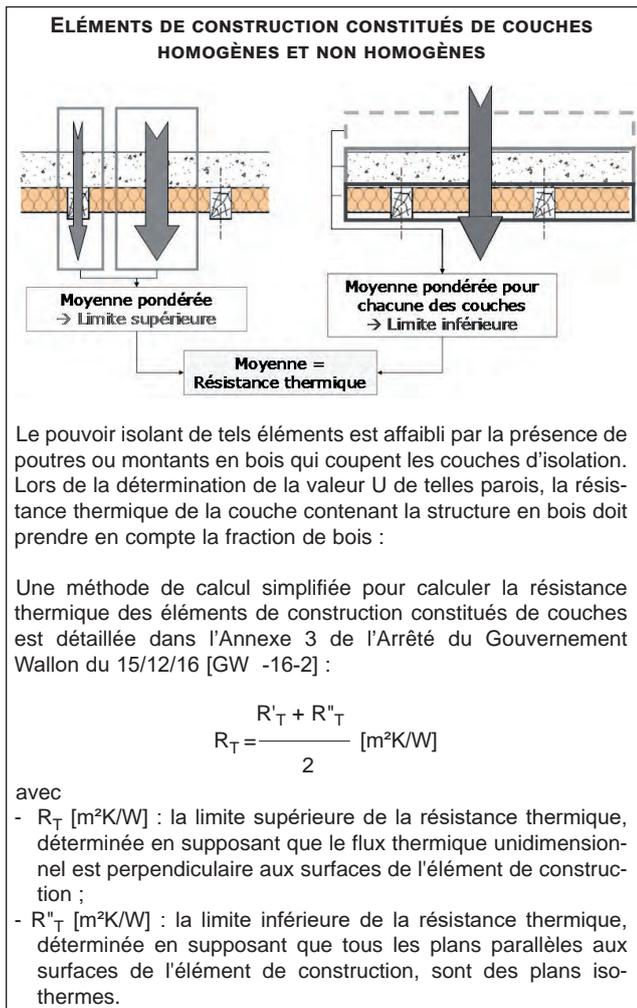
La méthode de détermination non simplifiée est expliquée dans l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2].

CORRECTION POUR LES FIXATIONS MÉCANIQUES PERFORANT LA COUCHE D'ISOLATION

Lorsqu'une couche d'isolation est traversée par des fixations mécaniques (ex : crochets de mur, fixations de toiture...), l'impact de ces fixations peut toujours être calculé avec précision par des calculs numériques selon la NBN EN ISO 10211.

Cette méthode de calcul précise doit toujours être appliquée si les deux extrémités de la fixation mécanique sont en contact thermique avec des plaques en métal.

LES TECHNOLOGIES COMMUNES AUX TOITURES PLATES ET INCLINÉES



Pour les autres cas, la méthode de calcul approchée décrite dans l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2] peut être appliquée.

ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION CONSTITUÉS DE COUCHES HOMOGENES ET NON HOMOGENES

Lors de la détermination du coefficient de transmission thermique U de la toiture, il faut tenir compte de la fraction de bois éventuellement présente (voir exemple ci-contre et l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2]).

CAS DE LA TOITURE PLATE INVERSÉE

Dans le cas de toitures plates inversées, où la membrane d'étanchéité est située sous la couche d'isolation thermique, un terme correctif ΔU_f doit être calculé afin de tenir compte de l'impact de l'eau de pluie qui s'écoule entre la couche d'isolation et la membrane.

Cette procédure corrective doit en principe être seulement appliquée pour le calcul du transfert thermique et non pour le calcul des besoins pour le refroidissement. Dans le cadre de la réglementation PEB, on peut toujours (même pour les surchauffes et les calculs des besoins de refroidissement) faire les calculs avec la valeur corrigée.

La procédure décrite dans l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2] est d'application uniquement pour les couches d'isolation composées de polystyrène extrudé (XPS).

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

BUT DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

L'étanchéité à l'air d'une construction définit sa capacité à empêcher le passage non contrôlé d'air de l'extérieur vers l'intérieur, et inversement (via des fissures, des joints, des matériaux non étanches...).

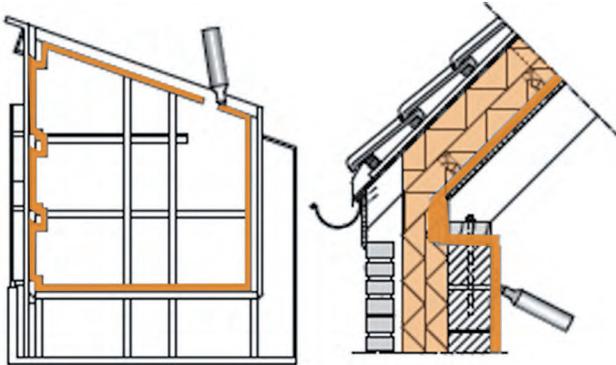
Le but de l'étanchéité à l'air est de garantir une enveloppe hermétique, par une mise en oeuvre soignée (exemple : plafonnage continu, raccords étanches, membrane étanche...). Une bonne étanchéité à l'air est nécessaire pour limiter les déperditions thermiques et pour éviter les courants d'air involontaires et incontrôlables, nuisibles au bon équilibre de pression et donc à la bonne ventilation du bâtiment. La plupart des fuites se situent aux raccords avec les parois, le toit, le plancher, les ouvertures, les passages des tuyaux, câbles électriques, etc.

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe fait partie d'une stratégie globale visant à réaliser un bâtiment confortable et peu énergivore. Les trois concepts de cette stratégie sont indissociables :

- l'isolation thermique permet de limiter les pertes par transmission ;

- l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment permet de limiter les pertes involontaires par infiltration d'air ;
- la ventilation hygiénique contrôlée permet d'amener la quantité d'air nécessaire.

CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR



Extrait de [CSTC-12]

Afin d'atteindre des performances d'étanchéité à l'air élevées, il faut étudier l'étanchéité à l'air du bâtiment dès sa conception. Certains défauts d'étanchéité étant par la suite inaccessibles et donc difficilement corrigibles, il est en effet important de consacrer le temps nécessaire à une étude préalable des points critiques. Une bonne étanchéité à l'air est une performance qui ne peut être atteinte que si tous les intervenants de la construction sont conscients de l'enjeu. Il faut non seulement assurer une conception et une exécution soignées, mais également accorder toute l'attention nécessaire aux détails de raccord. Le travail de chaque corps de métier doit être décrit dans le cahier des charges. Une attention particulière doit également être apportée à la coordination des travaux, tant au niveau de l'exécution de l'étanchéité à l'air que de la vérification de l'étanchéité à l'air après chaque passage d'un corps de métier.

DÉTERMINATION DU VOLUME À ÉTANCHÉIFIER

Après avoir déterminé le volume protégé du bâtiment, le concepteur doit déterminer la position de l'écran à l'air. Les percements de l'écran à l'air sont des sources potentielles de fuite et doivent être limités autant que possible. Afin d'éviter de tels percements, le choix et le positionnement des installations techniques sont cruciaux. Les locaux (par ex. chaufferie, garage) qui, pour des raisons de sécurité incendie ou de qualité de l'air, nécessitent une ventilation permanente et qui, par conséquent, pénalisent l'étanchéité à l'air, sont à exclure du volume protégé ou devront bénéficier de solutions adaptées.

CONSTRUCTION BOIS

La barrière d'étanchéité à l'air est constituée par le pare-vapeur (ou freine-vapeur). Il faut utiliser des bandes adhésives pour souder les lés et colmater les éventuels défauts ponctuels plus efficacement. On prévoit généralement un vide technique entre la finition intérieure et le pare-vapeur, afin d'intégrer les gaines et conduites sans percer le pare-vapeur. Les réseaux d'eau et d'électricité peuvent aussi être conçus de façon à ne pas faire courir de câbles ni de conduites le long des façades et toitures, en exploitant uniquement les parois intérieures.

PASSAGES DE CONDUITES

L'emplacement des conduites (ventilation, chauffage, électricité, télécommunications, sanitaire, gaz...) et des équipements encastrés (câbles électriques, spots, tuyaux d'eau...) doit avoir été correctement étudié dès la conception du projet. Si ces éléments percent l'écran à l'air, des

fourreaux ou manchons devront être utilisés afin d'obturer les traversées de parois. Des solutions spécifiques pour le percement des conduits de fumée métalliques doivent également être prescrites [CSTC-12].

TYPES D'ÉCRAN À L'AIR

Il est également important de bien sélectionner les matériaux et produits d'étanchéité. Les différents types d'écran à l'air sont :

- les membranes pare-vapeur telles que les films souples (en PE, PVC, polyamide...) pour les ossatures en bois et les charpentes ;
- les enduits (pour les murs en maçonnerie) ;
- les panneaux (pour les ossatures en bois) ;
- le béton coulé in situ ;
- les systèmes industrialisés ;
- les sous-toitures continues.

Il est également indispensable d'étanchéfier les jonctions entre les panneaux et les lés, à l'aide de bandes adhésives, mastic, profilés souples ou autres.

VALEURS TYPES

Le taux de renouvellement d'air est le débit de fuite rapporté au volume intérieur du bâtiment, c'est-à-dire le nombre de fois par heure que le volume d'air est renouvelé dans le bâtiment pour une différence de pression de 50 Pascals :

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{\text{int}}} \quad [\text{h}^{-1}]$$

La perméabilité à l'air de l'enveloppe représente le débit de fuite d'air à 50 Pascals, rapporté à la surface de l'enveloppe :

$$\dot{v}_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_{\text{test}}} \quad [\text{m}^3/\text{h.m}^2]$$

TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR n_{50}

Le taux de renouvellement d'air n_{50} peut varier de 9,5 à 35 h^{-1} pour des anciennes habitations où aucune attention particulière n'a été apportée à l'étanchéité à l'air. La moyenne sur un ensemble de maisons (1999) en Belgique est de 8,7 h^{-1} .

La norme NBN D 50-001 recommande un taux de renouvellement d'air de maximum 3 h^{-1} dans les habitations comprenant un système de ventilation D, et de 1 h^{-1} dans les habitations avec un système de ventilation D avec récupération de chaleur.

Les nouvelles constructions, pour lesquelles une attention particulière a été apportée à l'étanchéité à l'air, atteignent des valeurs de l'ordre de 1,4 h^{-1} .

Le standard passif impose, quant à lui, une valeur $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$.

PERMÉABILITÉ À L'AIR DE L'ENVELOPPE \dot{v}_{50}

Actuellement, des habitations construites sans prêter d'attention particulière à l'étanchéité à l'air ont une perméabilité à l'air \dot{v}_{50} comprise entre 6 et 12 $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$. On peut atteindre un objectif situé entre 2 et 6 $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$ grâce à une conception judicieuse et une mise en oeuvre soignée. En deçà de 2 $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$, une véritable expertise est nécessaire tant au niveau de la conception que de l'exécution : tous les noeuds constructifs doivent faire l'objet d'une étude adéquate et une sensibilisation de tous les corps de métier impliqués est indispensable.

COMMENT MESURER L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

Afin de mesurer l'étanchéité à l'air du bâtiment et de détecter les fuites d'air, un test de pressurisation du bâtiment (appelé aussi test d'infiltrométrie) peut être pratiqué, lorsque le bâtiment est complètement fermé. Ce test consiste à mettre les locaux en dépression ou en surpression, à l'aide d'un ventilateur, et de détecter les endroits où l'air s'infiltré au travers de l'enveloppe. Ce test est réalisé dès que tous les éléments ayant une influence sur l'étanchéité (pare-vapeur, membranes diverses...) sont mis en place. S'il faut faire des rectifications, cela posera moins de problèmes puisque les finitions ne seront pas encore réalisées.

Les fuites peuvent être repérées par thermographie infrarouge grâce à la visualisation des zones refroidies par le passage de l'air provenant de l'extérieur, par un anémomètre qui détecte le déplacement de l'air à l'endroit de l'infiltration lors du test d'infiltrométrie ou encore par une fumée artificielle et inoffensive qui s'infiltré aux endroits perméables et qui permet de visualiser facilement les fuites lors du test d'infiltrométrie.

Des essais de pressurisation réalisés préalablement, en cours de chantier (test d'orientation) permettent également de repérer les défauts d'étanchéité à l'air et de les corriger tant qu'ils sont facilement accessibles et corrigibles. Une simple mise en dépression ou surpression est suffisante.

RÉGLEMENTATION

Actuellement, il n'y a pas de valeur d'étanchéité à l'air à respecter mais celle-ci est prise en compte dans le calcul du niveau de consommation d'énergie primaire E_w dans la PEB. L'étanchéité à l'air reste donc un poste incontournable afin de respecter ce critère.

La valeur par défaut de l'étanchéité à l'air dans la PEB est de $12 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. Si l'étanchéité à l'air est correctement réalisée lors du chantier, en réalisant un test d'infiltrométrie, on peut améliorer le niveau E_w de 10 à 15 points.

LE PARE-VAPEUR

LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR

Le pare-vapeur (parfois aussi appelé freine-vapeur) diminue plus ou moins la diffusion de vapeur d'eau au sein d'une paroi. Il est utilisé afin d'éviter que les conditions de températures et de pressions à l'intérieur d'une paroi y entraînent une formation dommageable de condensation.

Grâce au pare-vapeur, on évite ainsi une condensation excessive et on empêche, dans l'isolant thermique, l'ab-

sorption d'eau par capillarité en provenance des éléments de construction contigus.

Il participe également à l'étanchéité à l'air du bâtiment.

Dans certains cas, il peut assurer une étanchéité (très) provisoire à l'eau de pluie lors de la construction.

LES TYPES DE PARE-VAPEUR

La nécessité d'un écran pare-vapeur et le type à utiliser dépendent de plusieurs facteurs, dont le climat extérieur et intérieur, la présence d'humidité de construction (dans la structure), les caractéristiques des matériaux composant la toiture, leur comportement en présence d'humidité, l'ensoleillement de la toiture et le facteur d'absorption de l'étanchéité ou de la couche de protection.

On distingue quatre classes de climat intérieur en fonction de la pression de vapeur à l'intérieur des locaux (voir tableau p. 10).

La performance d'étanchéité à la vapeur d'un écran pare-vapeur, s'exprimant en $[m]$, est représentée par sa valeur μ_d (épaisseur équivalente de diffusion) où :

- μ est un coefficient sans dimension qui indique la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qu'oppose un matériau d'une épaisseur donnée, comparée à celle d'une couche d'air immobile de même épaisseur. Les valeurs μ sont étroitement liées à la nature des matériaux ;
- d est l'épaisseur du matériau exprimée en mètre.

La valeur μ_d qualifie la résistance qu'offre une couche de matériau à la diffusion de vapeur d'eau.

On distingue quatre classes de pare-vapeur. Celles-ci sont reprises dans le tableau ci-contre, qui donne des informations relatives aux matériaux entrant dans la composition des pare-vapeur, ainsi qu'à leur épaisseur équivalente de résistance à la diffusion μ_d [CSTC-96].

Le soin dans la pose du pare-vapeur, en ce qui concerne la fermeture des joints entre lés ainsi que la finition en périphérie ou autour des pénétrations, est essentiel à son efficacité. Il est indispensable pour une mise en oeuvre convenable des pare-vapeur de types E3 ou E4.

Pour les pare-vapeur de type E4, on considère en outre qu'il est illusoire de les mettre efficacement en oeuvre si l'on ne dispose pas d'un support rigide continu sur lequel les déposer.

Attention toutefois si l'on considère que le rôle du pare-vapeur pourrait être rempli par une simple peinture à l'huile :

- la peinture est difficilement capable de porter les joints entre matériaux et les fissures de tassement et autres, qui apparaissent au cours de la vie du bâtiment;
- une peinture n'est pas "immeuble" : elle peut aisément être décapée et remplacée par une finition, par exemple moins performante en matière de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, faisant perdre ainsi la protection que la peinture à l'huile était chargée d'assurer.

LES TECHNOLOGIES COMMUNES AUX TOITURES PLATES ET INCLINÉES

CLASSE	MATERIAU	REMARQUES
E1 $2 \text{ m} \leq \mu d < 5 \text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> peinture à l'huile apposée continûment sur la finition intérieure 	<p>Attention toutefois si l'on considère que le rôle du pare-vapeur pourrait être rempli par une simple peinture à l'huile :</p> <ul style="list-style-type: none"> la peinture est difficilement capable de porter les joints entre matériaux et les fissures de tassement et autres, qui apparaissent au cours de la vie du bâtiment; une peinture n'est pas "immeuble" : elle peut aisément être décapée et remplacée par une finition, par exemple moins performante en matière de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, faisant perdre ainsi la protection que la peinture à l'huile était chargée d'assurer.
	<ul style="list-style-type: none"> feuille en polyéthylène ép. 0,2 mm avec recouvrements de 10 cm minimum 	Mise en œuvre par agrafage, sous l'isolant. En cas de structure métallique, il sera collé. Superposer les différents lés (recouvrement de minimum 15 cm). Poser un autocollant spécial sur les zones agrafées et les raccords entre les lés pour renforcer l'étanchéité à l'air.
	<ul style="list-style-type: none"> (couche d'adhérence) 	En toiture plate, une couche d'adhérence ne peut pas être considérée comme un écran pare-vapeur à part entière, même sur un support continu.
E2 $5 \text{ m} \leq \mu d < 25 \text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> papier kraft revêtu d'une feuille d'aluminium ou bitumé 	Les joints de recouvrement doivent toujours être collés (par une bande adhésive) ou soudés entre eux et aux autres éléments de construction.
	<ul style="list-style-type: none"> carton plâtre revêtu d'une feuille d'aluminium ép. 9 microns 	
	<ul style="list-style-type: none"> plaque de plâtre enrobé de carton comportant une feuille d'aluminium (ép. 15 microns et joints étanches) 	
	<ul style="list-style-type: none"> film polymère à base de polyamide, constituant un pare-vapeur hydro-régulant, présentant un μd variable, mais de max. 14 à 25 m (*) 	
	<ul style="list-style-type: none"> feuille d'aluminium plastifié sur une face 	
	<ul style="list-style-type: none"> membrane bitumineuse avec joints fermés mécaniquement (chevauchement et agrafage, par ex.) 	
E3 $25 \text{ m} \leq \mu d < 200 \text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> bitume armé avec voile de verre et joints collés ou soudés 	Les joints de recouvrement doivent toujours être collés ou soudés entre eux et aux autres éléments de construction.
	<ul style="list-style-type: none"> bitumes armés avec feuilles métalliques et joints collés ou soudés (ALU 3) 	Les joints de recouvrement doivent toujours être collés ou soudés entre eux et aux autres éléments de construction. La classe de pare-vapeur E4 nécessite une mise en œuvre sur un support continu. Les perforations ne sont pas admises.
E4 $200 \text{ m} \leq \mu d$	<ul style="list-style-type: none"> pare-vapeur multicouches en bitume polymère (8 mm) 	

(*) La direction du flux de diffusion de l'humidité varie en fonction du gradient de la pression partielle de la vapeur d'eau. Sous nos climats, en hiver, le flux va de l'intérieur vers l'extérieur. En été, par de fortes températures extérieures, le flux est parfois inversé, allant de l'extérieur vers l'intérieur.

Le pare-vapeur hygro-régulant modifie sa résistance à la diffusion selon l'humidité relative de l'air ambiant. Ainsi, par climat hivernal, le pare-vapeur hygro-régulant est plus étanche à la diffusion et protège la construction de l'humidité. Sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau peut atteindre 14 à 25 m selon les marques. Par climat estival, le pare-vapeur hygro-régulant est plus ouvert à la diffusion et permet un séchage vers l'extérieur de l'humidité éventuellement présente dans la construction. Sa résistance à la diffusion de vapeur diminue, jusqu'à 0,25 à 0,2 m selon les marques.

La résistance à la diffusion est donc forte en hiver (mais de 25 m max. soit de classe E2) et faible en été (> 0,2).

LES CLASSES DE PARE-VAPEUR [CSTC-92-2] [CSTC-96] [CSTC-00]

PARE-VAPEUR HYGRO-RÉGULANT (DIT INTELLIGENT)

La direction du flux de diffusion de l'humidité varie en fonction du gradient de la pression partielle de la vapeur d'eau.

Sous nos climats, en hiver, le flux va de l'intérieur vers l'extérieur. En été, par de fortes températures extérieures, le flux est parfois inversé, allant de l'extérieur vers l'intérieur.

Le pare-vapeur hygro-régulant modifie sa résistance à la diffusion selon l'humidité relative de l'air ambiant.

Ainsi, par climat hivernal, le pare-vapeur hygro-régulant est plus étanche à la diffusion et protège la construction de l'humidité. Sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau peut atteindre 14 à 25 m selon les marques.

Par climat estival, le pare-vapeur hygro-régulant est plus ouvert à la diffusion et permet un séchage vers l'extérieur de l'humidité éventuellement présente dans la construction. Sa résistance à la diffusion de vapeur diminue, jusqu'à 0,25 à 0,2 m selon les marques.

La résistance à la diffusion est donc forte en hiver (mais de 25 m max. soit de classe E2) et faible en été (> 0,2).

LA FINITION INTÉRIEURE

La finition intérieure est nécessaire lorsque l'espace sous toiture est habité.

Quel que soit le type de finition choisi (plaques de plâtre, lambris en planches rainurées-languettées, panneaux de fibres de bois, etc.), il faudra veiller à ménager un espace pour les canalisations électriques, entre le pare-vapeur et la finition intérieure, afin d'éviter tout percement intempestif du pare-vapeur.

La finition intérieure peut participer en partie ou en totalité à la fonction pare-vapeur. Elle peut également assurer l'étanchéité à l'air de la toiture.

LES COUPLES GALVANIQUES

Pour qu'un couple galvanique entre 2 métaux apparaisse, il faut 3 conditions :

- deux métaux de potentiels électrochimiques différents ;
- une liaison conductrice entre les 2 métaux ;
- un film d'humidité électriquement conducteur (électrolyte) connectant les métaux.

Plus les potentiels des métaux sont éloignés, plus le risque de corrosion accélérée du métal le moins noble risque d'apparaître, avec comme conséquence potentielle une rupture des systèmes de fixation, des tubes qui fuient, ou encore une détérioration avancée du métal. Pour éviter ces risques, des solutions existent : combiner des métaux aussi voisins que possible dans la série de potentiels galvaniques, ou encore isoler les métaux par une rondelle de plastique ou autre (non conductrice électriquement), ou encore prévoir un revêtement protecteur...

Le tableau ci-contre reprend les potentiels galvaniques (en volts) de quelques métaux utilisés en toiture.

A la lecture de ce tableau, on peut constater que le cuivre et l'aluminium représentent un couple galvanique à risque : l'aluminium risque de se corroder très rapidement s'il est en contact du cuivre ou en aval de l'évacuation des eaux de toitures. Pour cette raison, l'utilisation de cuivre est proscrite en amont de tuyauterie en zinc ou en aluminium.

Elément	Potentiel (Volts)
Aluminium	-1,7
Zinc	-0,8
Fer	-0,4
Nickel	-0,3
Plomb	-0,1
Hydrogène	0
Cuivre	+0,3

LE TRANSFERT DE VAPEUR D'EAU

(inspiré de [CSTC-82])

Au travers des matériaux, le transfert de vapeur d'eau s'opère selon deux modes : la diffusion et la convection.

La **diffusion** de la vapeur d'eau dans et à travers un matériau à porosité ouverte s'exprime comme suit :

$$\text{Densité de flux} = - \text{grad } p / (\mu N) \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

où : grad p exprime la différence entre les pressions partielles de vapeur d'eau existant au sein des milieux entre lesquels se réalise le flux;

N = constante de diffusion de vapeur d'eau dans l'air, approximativement égale à $5,4 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$.

Le coefficient μ de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau indique le degré de difficulté que la vapeur d'eau rencontre pour diffuser dans le matériau concerné, par rapport à une couche d'air stationnaire de la même épaisseur, à température et à pression totales identiques (la valeur μ des matériaux courants est reprise en annexe 1).

La **convection** peut engendrer un déplacement global d'air sec et de vapeur d'eau, suite à des différences de pression d'air et de température. Si, au niveau du matériau, le flux d'air est généralement négligeable, il n'en est pas de même au niveau de la paroi dans sa globalité : elle peut en effet subir une convection telle, qu'il en résultera un transfert de vapeur beaucoup plus important que par la seule diffusion.

La **modélisation du phénomène de diffusion** de vapeur d'eau au travers des parois peut se réaliser au moyen de la méthode dite de Glaser, méthode simplifiée qui peut s'utiliser manuellement. Elle postule quelques simplifications :

1. L'humidité se déplace uniquement par transfert de la vapeur.
2. Il n'y a pas de transport d'air. Le transfert de vapeur est donc entièrement dû à la diffusion.
3. Les matériaux ne sont pas hygroscopiques, à savoir qu'un changement de teneur en humidité en un point déterminé d'un matériau est uniquement la conséquence de la condensation ou de l'évaporation.
4. Le coefficient μ de résistance à la diffusion de vapeur d'eau est considéré comme une constante réelle, quelles que soient les températures et les pressions partielles de vapeur d'eau rencontrées dans la paroi modélisée. Il en est de même pour le coefficient de conductibilité thermique.
5. L'échange entre les milieux est stationnaire.

En règle générale, pour réduire le risque de l'apparition de problèmes de condensation, trois solutions sont appliquées :

- la ventilation du local sous toiture, pour réduire la pression de vapeur d'eau et ainsi atteindre une classe de climat intérieur moins sévère;
- le placement d'un écran pare-vapeur sous l'isolation thermique : un bon écran pare-vapeur peut effectivement limiter le flux de vapeur d'eau et la quantité résultante de condensation, à un niveau très bas et pratiquement inoffensif; en l'absence d'un support continu rigide sur lequel poser le pare-vapeur, sa mise en oeuvre en est plus difficile et son efficacité menacée.
- la ventilation, avec de l'air extérieur, de l'espace de toiture au-dessus de l'isolation thermique : en théorie, cette possibilité pourrait se justifier, si ce n'est qu'elle entraîne des effets pervers, comme par exemple l'accroissement de la convection au travers de la toiture (voir encadré p. 45); les effets secondaires annihilent l'effet positif attendu, sinon pire.

De l'examen de simulations autant que d'expérimentations, **deux paramètres semblent donc essentiels** à un bon comportement hygrothermique de la toiture :

- l'étanchéité du plafond à la vapeur et à l'air;
- la résistance thermique et le comportement des matériaux du support de l'étanchéité (en fonction de la classe de climat intérieur) : ainsi, même si le plafond est parfaitement étanche à l'air, le risque de condensation persiste contre le support de l'étanchéité, par refroidissement du toit, à cause du rayonnement nocturne vers la voûte céleste. Cet effet peut être limité par une résistance thermique plus élevée du support de l'étanchéité (en utilisant des voliges, par exemple) et ainsi ne causer aucune dégradation au matériau de couverture.

ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DE LA TOITURE

(inspiré de [CSTC-96])

Une étanchéité à l'air insuffisante :

- provoque des courants d'air et des pertes par ventilation non contrôlée, grevant considérablement la consommation énergétique de chauffage;
- entraîne un risque élevé de condensation interne au sein de la toiture;
- affaiblit l'isolation acoustique offerte par la toiture.

Après l'étanchéité à l'eau, l'étanchéité à l'air est l'exigence performancielle la plus importante d'une toiture isolée et étanche à l'eau.

L'étanchéité à l'air est réalisée par la mise en oeuvre, du côté chaud de l'isolant, d'un matériau étanche à l'air, à savoir :

- le matériau isolant lui-même (par ex. : mousses synthétiques ou laine minérale revêtue) ;
- lorsque le matériau isolant est perméable à l'air (par ex. : laine minérale non revêtue) : un film étanche à l'air ;
- la finition intérieure (par ex. : enduit de plafonnage).

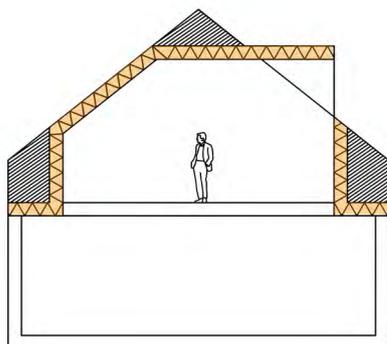
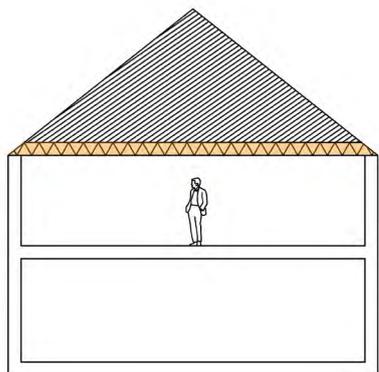
En pratique, une bonne étanchéité à l'air dépend de la qualité de la mise en oeuvre de l'écran étanche à l'air - au droit des joints, des raccords et des rives -, ainsi que de l'absence de toute perforation et dégradation : des bandes adhésives doivent au besoin souder les lés entre eux et colmater les défauts ponctuels, pour assurer une continuité totale de l'étanchéité à l'air. Les canalisations éventuelles (par ex. de l'installation électrique) que l'on désire disposer du côté intérieur de l'isolation thermique et de l'écran à l'air, doivent être installées dans un espace technique à ménager entre l'étanchéité à l'air et la finition intérieure.

LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE

EVOLUTION HISTORIQUE DU RÔLE DE LA TOITURE INCLINÉE	33
LES CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES TOITURES INCLINÉES.....	35
LA STRUCTURE.....	35
LA COUVERTURE.....	35
L'ISOLATION THERMIQUE ET LE PARE-VAPEUR ÉVENTUEL.....	36
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	38

ÉVOLUTION HISTORIQUE DU RÔLE DE LA TOITURE INCLINÉE

Le présent opuscule considère comme inclinée une toiture à versant(s) sur laquelle aucune stagnation d'eau n'est tolérable, ni tolérée. Les pentes considérées dépassent 3° (ou 5 %).



Jusqu'il y a quelques décennies, l'espace construit directement sous la toiture était réservé au grenier, où l'on entreposait des objets encombrants peu sensibles aux climats extrêmes de gel ou de surchauffe.

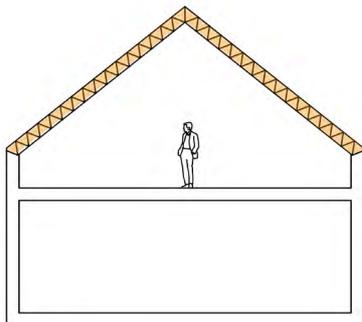
La ventilation du grenier était fortement favorisée par les joints entre matériaux de couverture, sans compter les chatières disposées dans les versants, ni les oeils de boeuf découpés dans les pignons. Cette forte ventilation permettait un assèchement rapide d'une infiltration accidentelle, sans risque ni dégât pour les locaux sous-jacents. La ventilation du grenier participait ainsi à la mission de la **zone de couverture**.

Le plancher des greniers était parfois isolé thermiquement, par des matériaux légers et inertes, tels que des cosses d'épis de blé concassées, de la laine de mouton brute, etc. Le grenier et son plancher constituaient ainsi une **zone d'isolation thermique**.

Aucun autre matériau n'était disposé sous les matériaux de couverture, de sorte que la température ambiante du grenier restait largement influencée par le rayonnement des versants de la toiture, soumis, l'hiver, au refroidissement nocturne vers la voûte céleste et, l'été, au réchauffement de la couverture directement exposée à l'ensoleillement.

Malgré ces températures extrêmes, certes inconfortables à l'occupation, le grenier, largement ventilé, constituait un

LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE



espace tampon entre le climat extérieur et le plancher du grenier, protégeant ainsi les locaux directement sous-jacents, des brusques variations climatiques.

Pour des raisons économiques, le grenier a cédé la place à des combles aménagés : le volume du grenier s'est ainsi morcelé en un espace habitable et en parties de combles (en faîte et en pieds de toiture).

Les combles se sont ainsi réduits en mini-combles reprenant chacun à leur compte les missions dévolues au grenier, de participation à la zone de couverture et à la zone d'isolation thermique.

Là où l'espace habitable se retrouve directement sous le versant, cette nouvelle disposition reporte, sur la seule paroi du versant de toiture, les rôles autrefois dévolus au grenier et à son plancher.

Le seul matériau de couverture devait être secondé par :

- une sous-toiture, qui protégeait des infiltrations accidentelles ;
- une couche d'isolation thermique.

La sous-toiture restait directement sous le matériau de couverture.

La zone d'isolation thermique était disposée dans l'épaisseur des chevrons ou encore entre les pannes ou sous celles-ci, lorsqu'un contre-chevonnage soutenait à la fois le matériau d'isolation thermique et la finition intérieure.

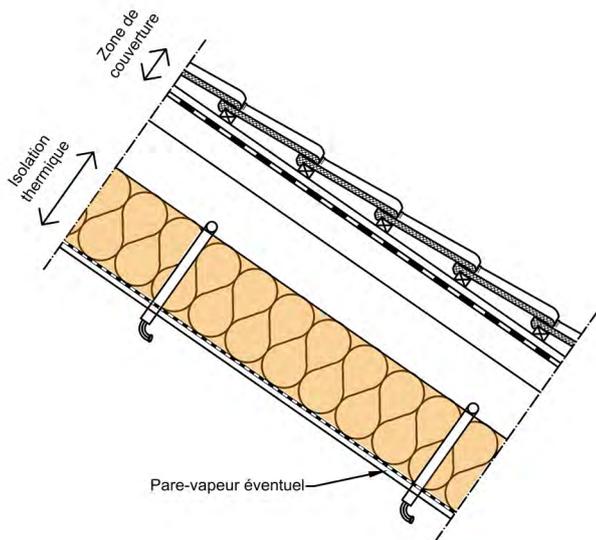
Les exigences accrues en matière d'isolation thermique ont augmenté l'épaisseur de la zone d'isolation thermique. Parallèlement à cette évolution, la ventilation en sous-face de la sous-toiture est apparue comme néfaste et à éviter.

La zone d'isolation thermique s'est ainsi déplacée pour se loger directement sous la sous-toiture :

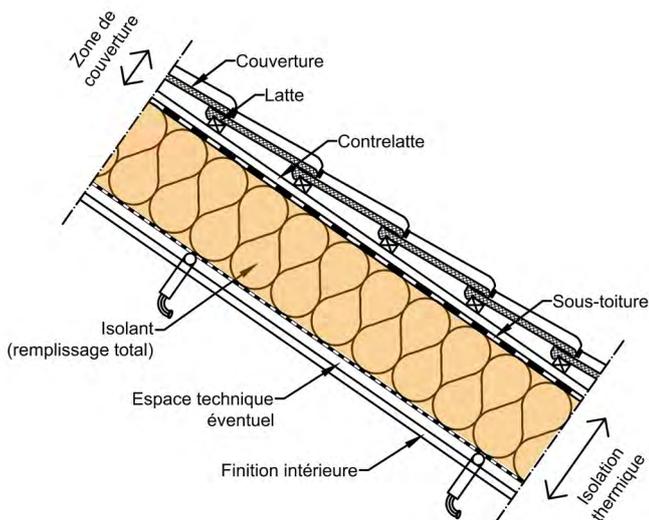
- se répartissant en deux couches superposées et croisées, l'une dans l'épaisseur des chevrons et la seconde dans l'épaisseur des pannes ;
- ou s'étendant sur une seule couche coïncée entre les gîtes de versant.

L'utilisation plus systématique de l'espace sous toiture pour des locaux où une forte quantité de vapeur d'eau peut être produite a fait apparaître l'absolue nécessité, pour certaines compositions de toiture, d'apposer, du côté chaud de l'isolant, un pare-vapeur ayant pour effet de réduire, sinon annuler, le flux de vapeur traversant le versant de toiture.

De même, l'impérieuse nécessité de ne pas perforer le pare-vapeur a imposé d'aménager un espace technique (pour les câbles électriques ou les appareils d'éclairage) entre le pare-vapeur et la finition intérieure. Notons que les spots encastrés nécessitent une zone technique plus grande (> 2,5 cm).



COUPE DE PRINCIPE DANS UNE TOITURE THERMIQUEMENT ISOLÉE, DE FACTURE TRADITIONNELLE DE 1^{ÈRE} GÉNÉRATION.



COUPE DE PRINCIPE DANS UNE TOITURE THERMIQUEMENT ISOLÉE, DANS SA FACTURE ACTUELLE.

REMARQUE : Si les spots sont encastrés dans un vide technique situé sous l'isolant, celui-ci doit être protégé contre la chaleur provenant des spots ou au moins pouvoir y résister.

LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE

Le souci constant de réduire le coût de la main-d'oeuvre a conduit à la mise au point de produits de plus grandes dimensions ou de nouvelles techniques, comme les panneaux sandwichs autoportants, qui cumulent les rôles de sous-toiture, d'isolation thermique et de finition intérieure, voire quelquefois de couverture.

LES CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES TOITURES INCLINÉES

LA STRUCTURE

La structure reprend le poids des éléments constituant la toiture, les charges climatiques et d'entretien et les reporte sur les murs, auxquels elle doit être correctement ancrée pour reprendre les efforts de pression et de succion du vent.

La structure porteuse peut être organisée :

- au moyen de matériaux constituant une dalle porteuse en béton (dalle coulée sur place ou réalisée à partir d'éléments préfabriqués) ;
- au moyen d'une charpente (métallique ou en bois), généralement constituée de pannes avec chevrons ou de fermes-chevrons. Lorsque la toiture comporte des éléments autoportants, la charpente se limite aux pannes.

Outre la structure porteuse proprement dite, on utilise, pour réaliser une toiture inclinée :

- la couverture ;
- la sous-toiture ;
- l'isolation thermique ;
- l'écran pare-vapeur ;
- l'écran pour l'étanchéité à l'air ;
- la finition intérieure.

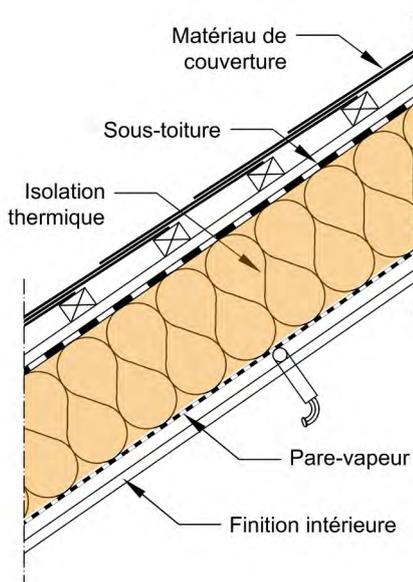
LA COUVERTURE

La pente minimale requise techniquement pour les supports précités dépend de différents facteurs :

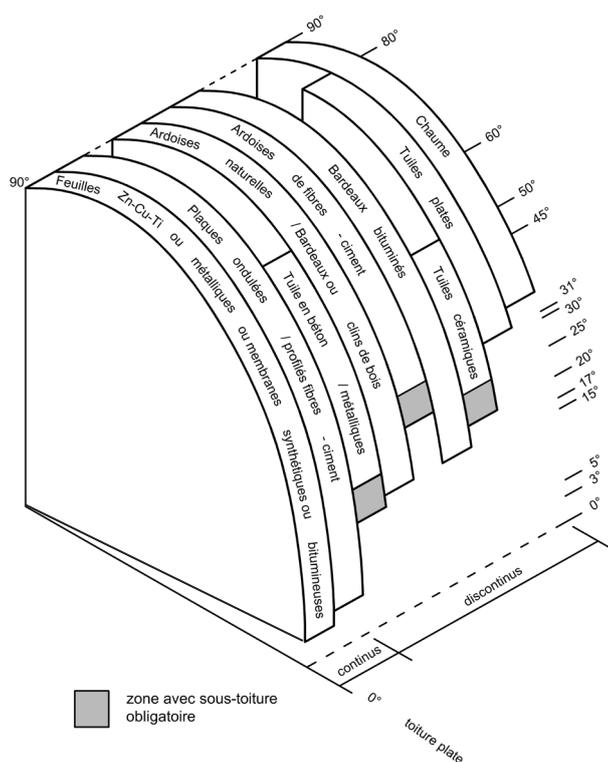
- l'exposition de la toiture ;
- le type de matériau de couverture associé ou non à une sous-toiture ;
- la longueur du versant de la toiture ;
- etc.

Pour des raisons urbanistiques, elles-mêmes issues de la technologie traditionnelle liée au climat local et aux matériaux employés, la **pente de la toiture** doit très souvent être située dans un intervalle déterminé d'inclinaisons par rapport à l'horizontale. La figure ci-après récapitule les pentes requises selon les différents matériaux de couverture utilisés.

On distingue ainsi les **matériaux de couverture** discontinus, des matériaux continus ou disposés en bandes :



LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE



**PENTE CONSEILLÉE SELON LES MATÉRIEAUX DE COUVERTURE;
SE RÉFÉRER ÉGALEMENT AUX INDICATIONS DES FOURNISSEURS.**

- Les matériaux discontinus, types écailles, les plus couramment utilisés sont :
 - les ardoises naturelles ou artificielles ;
 - les tuiles céramiques (terre cuite) avec ou sans emboîtement ;
 - les tuiles plates (en béton ou en terre cuite) ;
 - les tuiles en béton ou métalliques à emboîtement ;
 - les bardeaux de bois et clins de bois ;
 - les écailles bitumées (shingles), nécessitant un support continu d'assise, souvent constitué d'un panneau en multiplis ou en plaquettes de bois (Oriented Strand Board) ;
 - les ardoises de zinc.
- Les matériaux "continus", seuls, permettent de réaliser des pentes de toiture inférieures à 15 degrés. On y distingue :
 - les plaques ondulées ou profilées en fibres-ciment, en métal ou en matières synthétiques ;
 - les feuilles métalliques ou bitumineuses ou en matière synthétique.

Les fabricants des matériaux autorisent, pour chaque type de matériau de couverture, une gamme précise d'inclinaison de la toiture, selon le type d'exposition, la longueur du rampant, la présence d'une sous-toiture, etc. Dans le cas des couvertures à écailles, la pente conseillée est celle des écailles elles-mêmes et non celle du support.

Les **sous-toitures** disponibles se répartissent en plusieurs familles :

- les sous-toitures capillaires :
 - papier fort, panneaux de fibres-ciment, panneaux de fibres de bois ;
 - les non tissés en fibres de verre ou en matières synthétiques ;
- les sous-toitures non capillaires en bandes : feuilles de matière synthétique (éventuellement micro-perforées) ;
- les sous-toitures non capillaires continues : papier bitumé ou revêtu d'une feuille aluminium (ou en matière synthétique), les membranes bitumineuses, les tôles.

L'ISOLATION THERMIQUE ET LE PARE-VAPEUR ÉVENTUEL

L'isolation thermique de la toiture ou du plancher du grenier peut être assurée au moyen de :

- matériau d'origine végétale : le liège ;
- laine d'origine minérale, végétale ou animale (laine de verre, de roche, de bois, de lin, de cellulose, de mouton, etc.) ;
- verre cellulaire ;
- mousses synthétiques : polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane, polyisocyanurate, mousses d'urée-formaldéhyde ;
- perlite ou vermiculite expansée (en plaques) ou en vrac.

LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE

La valeur μ_d de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des pare-vapeur courants est donnée à l'annexe 1, p. 132.

On trouve également, sur le marché, des éléments composites comportant un isolant thermique revêtu :

- sur les deux faces, de panneaux pouvant constituer sous-toiture (du côté extérieur de l'isolant) et finition intérieure (du côté intérieur de l'isolant);
- d'un panneau (de finition), uniquement en sous-face, l'isolant lui-même servant de sous-toiture.

Ces panneaux sont autoportants; ils peuvent, dans certains cas, servir d'éléments de structure, isolants et portants.

Les matériaux isolants rigides, tels que le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé revêtu en sous-face, le polyuréthane, les panneaux à base de fibres de bois... peuvent être utilisés en panneaux de sous-toiture isolants, en les plaçant directement sur les chevrons (ou fermes-chevrons); les contre-lattes en bois sont clouées ou vissées à travers l'isolant sur les chevrons (ou fermes-chevrons) : c'est la toiture "sarking". Des panneaux rigides de polystyrène expansé, de laine minérale ou de mousse de verre, reposant sur un voligeage ou un support continu, peuvent également être utilisés comme panneaux de sous-toiture isolants.

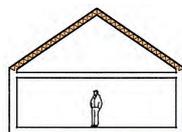
Attention : la combinaison du type d'isolant et du type de structure porteuse a une influence non négligeable sur le comportement de l'ensemble de la toiture, au transfert de vapeur d'eau et sur son coefficient U.

Comme on le verra plus loin, un complément parfois indispensable de l'isolation thermique est un écran résistant à la diffusion de vapeur d'eau, appelé pare-vapeur.

Pour les bâtiments de climat intérieur de classe I, aucun pare-vapeur n'est requis au sein de la toiture. Les bâtiments de classe IV doivent faire l'objet d'une étude particulière.

La classe de climat III sera examinée plus loin.

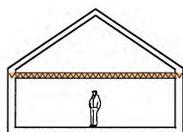
Pour le climat intérieur de classe II, les tableaux suivants indiquent dans un premier temps s'il y a lieu ou non de placer un pare-vapeur sous la face chaude de l'isolant, selon le matériau de couverture employé, le type de sous-toiture et selon que l'isolation thermique est située dans le versant de la toiture ou sur le plancher du grenier :



Cas 1 : isolation thermique dans le versant de la toiture

Hypothèse de travail utilisées pour établir ces deux tableaux simplifiés :							
1. L'étanchéité à l'air est supposée parfaitement garantie par un autre dispositif que le pare-vapeur (par la finition intérieure, par exemple).							
2. Le matériau isolant est très perméable à la vapeur d'eau (laine minérale, par exemple).							
Sous-toiture	Tuiles		Ardoises		Bardeaux bitumés	Plaques fibres-ciment	Plaques métalliques
	terre cuite	béton	naturelles	artificielles			
Aucune	-	E1	E1	-		-	-
Capillaire	-	-	-	-		-	-
Non capillaire en lés	E1	E1	E1	E1		E1	E1
Non capillaire continue	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2
Eléments isolants (sarking ou panneaux autoportants)	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1
Avec : 2 m (μ_d) de E1 < 5 m (μ_d) de E2 < 25 m							

LA TECHNOLOGIE PARTICULIÈRE DE LA TOITURE INCLINÉE



Cas 2 : isolation thermique dans le plancher du grenier

Sous-toiture	Tuiles				Ardoises				Bardeaux bitumés	Plaques fibres-ciment		Plaques métalliques	
	terre cuite		béton		naturelles		artificielles			Pas de revt sol	Pas de revt sol	Pas de revt sol	Pas de revt sol
	Pas de revt sol	Revt de sol	Pas de revt sol	Revt de sol	Pas de revt sol								
Aucune	-	E1	E1	E1	E1	E1	-	E1		-	E1	E1	E1
Capillaire	-	E1	-	E1	-	E1	-	E1		-	E1	-	E1
Non capillaire en lés	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1		E1	E1	E1	E1
Non capillaire continue	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2

où « Pas de revt de sol/Revt sol » signifie l'inexistence/l'existence d'un revêtement de sol sur le plancher du grenier

Remarque : Lorsque le plancher est du type lourd, étanche à l'air, il n'y a pas besoin de pare-vapeur, au sens de la migration de la vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur ; la pose d'un pare-vapeur de type E1 est toutefois recommandée, à disposer sous la face chaude de l'isolant, et cela afin de limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

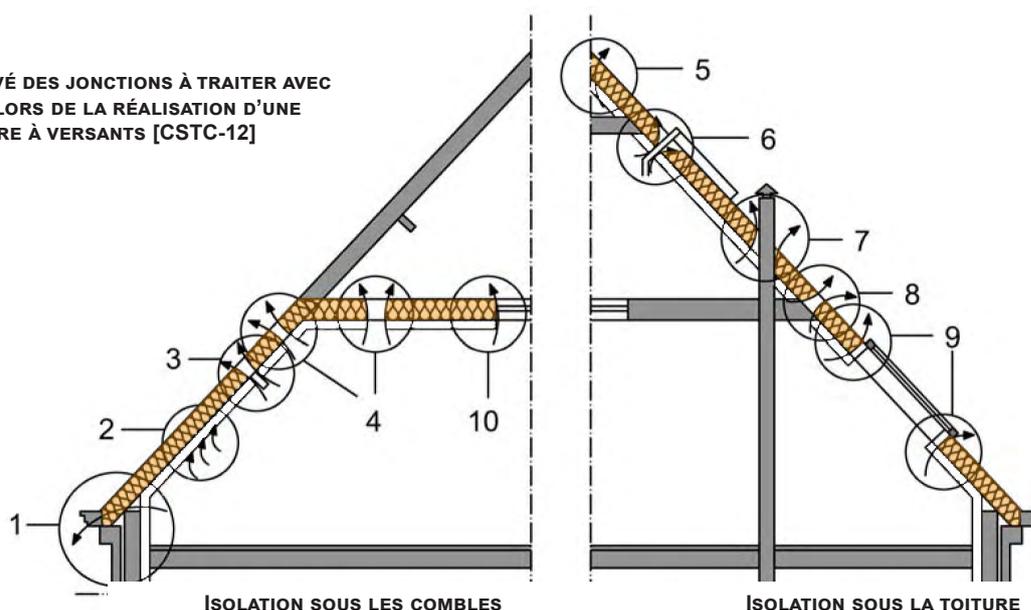
TYPE DE PARE-VAPEUR À PRÉVOIR, SELON LE MATÉRIAU DE COUVERTURE ET LE TYPE DE SOUS-TOITURE (CLASSE DE CLIMAT II) [CSTC-95-1]

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

Assurer l'étanchéité à l'air des toitures à versants est particulièrement important car leur fonction et leur position au sommet du bâtiment les rendent très vulnérables aux problèmes d'humidité. Une approche de l'étanchéité à l'air et des solutions techniques à mettre en oeuvre est détaillée dans la NIT 255 [CSTC-15-1].

La figure ci-dessous reprend les jonctions à traiter avec soin lors de la réalisation d'une toiture à versants.

RELEVÉ DES JONCTIONS À TRAITER AVEC SOIN LORS DE LA RÉALISATION D'UNE TOITURE À VERSANTS [CSTC-12]



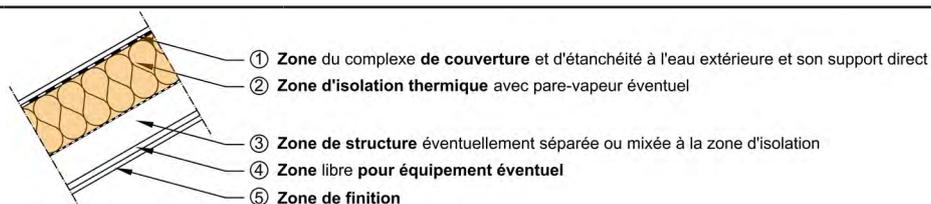
1. Jonction de l'écran à l'air au pied de la toiture ;
2. Jonction du versant et du pignon ;
3. Jonction de l'écran à l'air avec les pannes ;
4. Perforation de l'écran pour l'incorporation de spots ;
5. Raccord de l'écran à l'air avec la panne faîtière ;
6. Perforation de l'écran à l'air par des conduits de capteurs solaires ;
7. Perforation de l'écran à l'air par des conduits d'évacuation de fumée ou de ventilation ;
8. Perforation de l'écran à l'air par un entrain ou par d'autres pièces de bois ;
9. Raccord de l'écran à l'air à la périphérie d'une fenêtre de toit ;
10. Raccord de l'écran à l'air à la périphérie d'une trappe (de grenier).

LES PERFORMANCES DE LA TOITURE INCLINÉE

CONTRÔLE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT 39

CONTRÔLE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

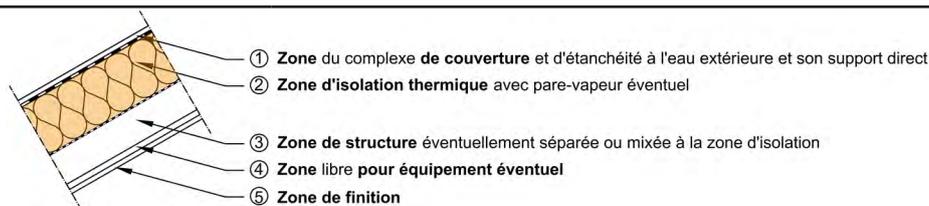
Le tableau ci-après détaille le rôle joué par la toiture inclinée au sein de l'enveloppe, en ce qui concerne le contrôle du climat et de l'environnement.



FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT

EAU	Pluie	L'eau de pluie étant presque toujours influencée dans sa chute par le vent, peut encore l'être durant son ruissellement sur la couverture de la toiture (remontée capillaire, par ex.). La zone de couverture doit recueillir et évacuer toute l'eau vers le bas des versants. Le choix du matériau de couverture et de l'apposition ou non d'une sous-toiture sont corollaires à celui de la pente de la toiture.
	Neige	La neige, en plus de son poids, peut s'infiltrer dans la zone de couverture (notamment la neige poudreuse) mais, à sa fonte, l'eau doit être évacuée. La neige peut aussi, lors de variations de températures, de précipitations ou de dégel partiel, garder l'eau et provoquer des remontées capillaires dans la zone de couverture.
	Gel	Le gel de toute eau stagnante dans la zone de couverture peut déduire la matière, le matériau ou les jonctions de ceux-ci. Il faut donc éviter toute stagnation d'eau et l'utilisation de matériau gélif.
	Vapeur migrant de l'intérieur vers l'extérieur	La connaissance du type de climat intérieur (au point de vue hygrothermique) est essentielle pour la conception et le choix du type de toiture. Plus la pression de vapeur est grande à l'intérieur, plus l'étanchéité à la vapeur et à l'air du complexe toiture devra être grande, mission impartie aux zones de finition et d'isolation thermique.
	Pénétration de l'air extérieur chargé de vapeur, dans la zone de couverture	L'air extérieur peut, dans certains cas, circuler dans la zone de couverture. La couverture ayant rayonné vers le firmament peut être plus froide que l'air extérieur, ce qui entraîne la formation de condensation sur sa face inférieure, voire dans sa masse. C'est le phénomène de sur-refroidissement. Cette condensation peut geler, peut ruisseler : une évacuation de l'eau est alors nécessaire. Les matériaux de couverture à face extérieure non perméable à la vapeur d'eau, dont la masse peut s'imprégner d'eau de condensation, sont à éviter.

LES PERFORMANCES DE LA TOITURE INCLINÉE



FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT (suite)

AIR	Pénétration de l'air extérieur vers l'intérieur	<p>La pénétration de l'air extérieur dans le complexe toiture doit être limitée à la zone de couverture. Si un volume important sépare le support de la zone de couverture du dessus de la zone d'isolation thermique, comme par exemple le grenier, il doit être ventilé. Toute ventilation suppose un air restant extérieur aux zones isolées, grâce à l'étanchéité à l'air. La zone d'isolation thermique est le rempart à la pénétration de l'air extérieur ; dans le cas d'isolants thermiques étanches à l'air, les joints entre panneaux ou entre panneaux et charpentes doivent être colmatés ; dans le cas d'isolants thermiques non étanches à l'air (laine minérale, par exemple), l'étanchéité à l'air extérieur doit être assurée par la sous-toiture.</p> <p>La ventilation, sous une couverture en plaques de fibres-ciment ou métalliques, ne sera réalisée qu'avec prudence car le risque de sur-refroidissement nocturne peut occasionner une condensation sous la couverture, raison pour laquelle il sera indispensable de placer une sous-toiture.</p>
CHALEUR	Fonction d'isolation thermique	<p>La chaleur intérieure doit être retenue le plus possible à l'intérieur, de façon à ce que la structure portante soit ainsi protégée des variations climatiques, ce qui évite les désordres dus à la dilatation, au retrait, etc. La structure protégée thermiquement de l'extérieur n'est pas sujette à entraîner des condensations de la vapeur contenue dans l'air intérieur ou pénétrant dans la masse de la structure elle-même. Seule une structure en bois peut pénétrer la zone d'isolation thermique car le bois est peu conducteur de la chaleur, mais cela multiplie les joints de la zone d'isolation thermique.</p> <p>La zone d'isolation thermique isole thermiquement et doit être CONTINUE dans la toiture et en liaison avec les autres zones d'isolation comprises dans les autres parois extérieures. La performance attendue est de $U \leq 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ [GW -14]. Pour les climats intérieurs fort humides, elle doit être peu ou pas perméable à la vapeur. En climat intérieur sec, elle peut être perméable à la vapeur et non capillaire.</p>
	Fonction d'inertie thermique	<p>Les matériaux de la zone de finition et/ou de la zone de structure peuvent, s'ils sont pondéreux, contribuer à accumuler la chaleur intérieure pour intervenir dans le volant thermique que constituent les masses accumulatrices de chaleur que sont les parois et planchers (en maçonnerie, pierre, terre cuite ou béton).</p>

FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT

LUMIERE	Ambiance lumineuse intérieure	<p>Selon sa teinte et sa texture, le matériau de finition intérieure peut différemment réfléchir la lumière à l'intérieur du local et participer ainsi à l'intensité lumineuse intérieure.</p>
ACOUSTIQUE	Bruit aérien	<p>L'étanchéité à l'air, la masse de la zone de structure, une laine minérale en zone d'isolation thermique, une différence de masse entre la zone de structure continue et la zone de finition, ainsi qu'une désolidarisation entre ces deux zones, peuvent contribuer à isoler des bruits aériens extérieurs ou à éviter que des bruits aériens émis dans les locaux ne gênent l'environnement immédiat.</p> <p>La zone de finition combinée avec la zone d'équipement et une zone d'isolation thermique en laine minérale peut aider au contrôle de l'acoustique intérieure en limitant le temps de réverbération dans le local sous toiture. Il faut, à ce sujet, se méfier des effets d'écho sur les versants de la toiture se faisant dans un même local.</p>
	Bruits d'impact extérieur	<p>Une zone d'isolation thermique résiliente, limitant les contacts directs entre la zone de couverture et la zone de structure continue, contribue à limiter l'effet des chocs sur la toiture, provenant de la pluie ou de la grêle. Les matériaux utilisés dans la zone de couverture ont également une influence sur le bruit d'impact.</p>
SECURITE A L'EFFRACTION		<p>Une «démontabilité» difficile ou bruyante de la zone de couverture et de la zone d'isolation thermique est efficace en guise de dissuasion.</p> <p>Une zone de structure résistant au percement et continue est la solution idéale pour répondre à cette performance. Les couvertures en toiture sont un des points faibles du système.</p>

LES PERFORMANCES DE LA TOITURE INCLINÉE

SECURITE AU FEU	Résistance au feu	La toiture comme barrière au feu entre bâtiments ou parties de bâtiments est une fonction non négligeable de celle-ci. Les toitures avec une zone de structure lourde en béton ou une zone de structure légère combinée avec une zone de finition protectrice et étanche aux flammes, sont de bonnes solutions.
	Réaction au feu	La réaction au feu des matériaux (principalement en couverture et en plafond) est très importante pour la sécurité, aux points de vue des émanations toxiques, des fumées, de la propagation de flammes, etc.

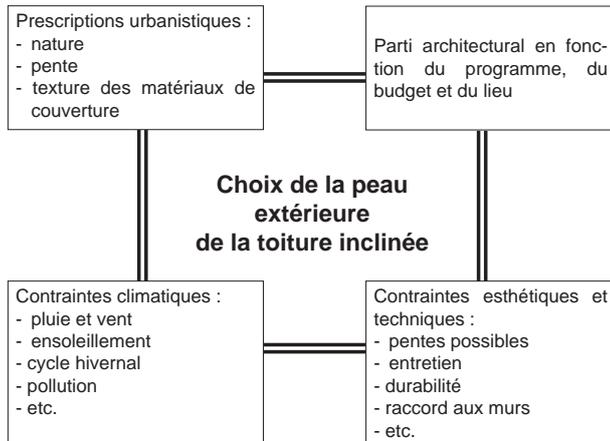
FONCTION STRUCTURALE		
FONCTION STRUCTURALE	Charges permanentes	Poids propre des éléments, augmenté des charges qui, après leur mise en oeuvre, peuvent y agir de façon permanente.
	Charges d'exploitation	Sauf utilisation particulière de la toiture, la structure est calculée en fonction du poids propre de la toiture, de la charge de neige et de l'action du vent, conformément aux normes NBN EN 1991-1 [IBN -13].
	Charges climatiques	La surcharge de neige à prendre en compte dépend de l'inclinaison de la toiture et de l'altitude du site où est construit le bâtiment. Pour une altitude jusqu'à 100 m et une pente de toiture $\alpha < 30^\circ$, elle est de 400 N/m ² ; pour une pente de toiture $\alpha > 60^\circ$, elle est nulle, peu importe l'altitude ; pour tous les autres cas, la surcharge de neige est comprise entre 0 et 400 N/m ² - voir les détails dans la NBN EN 1991-1 [IBN -13]. En ce qui concerne les charges dues aux sollicitations thermiques, il y a lieu de prendre en compte une température de surface pouvant varier entre -10°C et +60°C en basse et moyenne Belgique et entre -15°C et +60°C en haute Belgique.
	Charges accidentelles	Charges d'entretien : tous les éléments porteurs doivent être vérifiés pour une charge locale concentrée de 2 kN sur une surface de 10 cm x 10 cm, et indépendamment de la charge uniformément répartie ; celle-ci ne doit pas être combinée avec l'action du vent ni avec les charges de neige. L'équipement de la toiture (crochets d'échelle, barrière de neige, chéneau porteur, etc.) doit permettre un accrochage sûr du matériel d'accès pour l'entretien. Lorsque certaines parties de la toiture peuvent former réservoir d'eau, il y a lieu de tenir compte de cette charge jusqu'au niveau du trop-plein. Cette action ne doit pas être combinée avec celle des charges d'exploitation mentionnées ci-dessus, sauf si ces charges sont supérieures à la valeur prévue des charges d'exploitation.

FONCTION VISUELLE		
FONCTION VISUELLE	Inclinaison importante	La toiture inclinée est un des éléments essentiels de la composition architecturale et constitue souvent la volumétrie la plus marquante dans le paysage. Le choix des matériaux de couverture (quelquefois induit par des règlements urbanistiques), quant à leur aspect, leur texture, leur couleur, leur durabilité, est important. Ce choix induit souvent la conception du support direct (zone de couverture) qui a un impact sur la zone de structure et la zone d'isolation thermique.
	Inclinaison moyenne	Pour des inclinaisons moyennes, les types de matériaux de couvertures sont plus limités et leur valeur en terme d'expression architectonique va dépendre de leur mode de pose, de leur texture, de leur tonalité et de leur tenue dans le temps. Ce sont principalement des plaques ondulées en métal ou en fibres-ciment autoportantes ou associées avec une zone d'isolation thermique collaborant à la portance, ou encore des feuilles métalliques à joints relevés (debout ou à tasseaux), portées sur une sous-structure en zone de couverture ou en zone d'isolation thermique. Ces toitures apportent encore beaucoup à la composition architectonique.
	Inclinaison faible	Les mêmes matériaux que ceux utilisés pour les inclinaisons moyennes peuvent être employés, à condition que la pente soit supérieure à 5 degrés. Cependant, mises à part les vues «aériennes», ils n'apportent guère à la composition esthétique de l'ensemble du bâtiment. Pour des toitures de faible pente, seuls les matériaux étanches, soudés en usine ou sur place, sont possibles.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

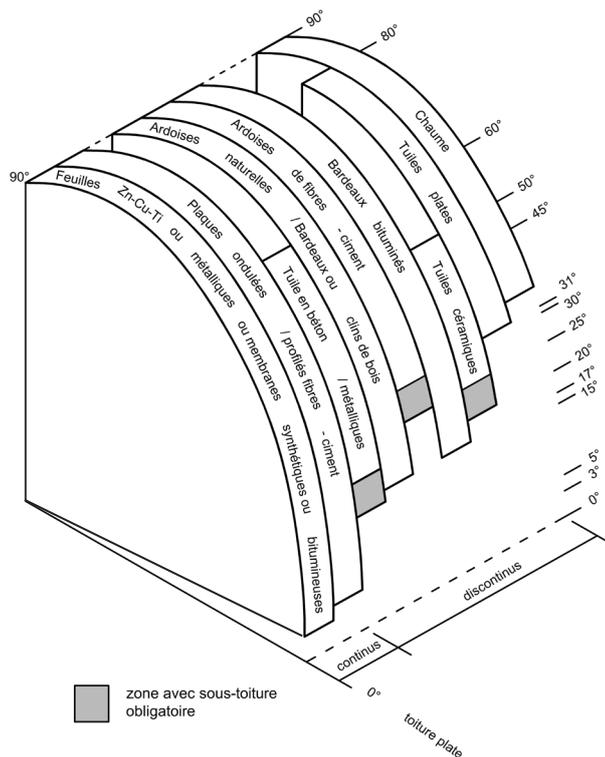
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	43
CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE.....	43
CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE.....	43
<i>Couverture en écailles (ardoises, bois, tuiles, Zn, Cu, bardeaux bitumés cloués...)</i>	46
<i>Plaques autoportantes (fibres-ciment, acier, aluminium, zinc, PVC, P..) ventilées en sous-face</i>	48
<i>Feuilles métalliques (zinc, cuivre, acier inoxydable, Pb) ventilées en sous-face</i>	50
<i>Panneaux composites - Tôles ou plaques ondulées, membranes, etc. non ventilées en sous-face</i>	51
CHOIX DE LA ZONE ISOLANTE.....	53
CHOIX DES ZONES D'ÉQUIPEMENT ET DE FINITION INTÉRIEURE.....	53
CHOIX DÉTAILLÉ DE LA STRUCTURE.....	53
CHRONOLOGIE DE LA POSE.....	53
<i>Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolation et du pare-vapeur complémentaire éventuel</i>	54
<i>Système A</i>	56
<i>Système B</i>	60
<i>Système C</i>	61
<i>Système D</i>	62
OBJECTIFS POURSUIVIS ET MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU DÉTAIL	65
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE	66
LE CHOIX DE PEAUX EXTÉRIEURES DE TOITURES.....	67
CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : BÂTIMENT PRINCIPAL.....	68
LE CHOIX DE PEAUX EXTÉRIEURES DE TOITURES.....	74
<i>Réflexions préliminaires dans le cas particulier de la piscine</i>	74
<i>Choix du système de toiture</i>	75
<i>Choix de l'épaisseur d'isolation</i>	76
<i>Choix de la finition intérieure</i>	76
<i>Réflexion sur le pare-vapeur complémentaire</i>	77
<i>Conclusions</i>	77
CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : COUVERTURE DU RESTAURANT.....	78
<i>Choix du système de toiture</i>	78
<i>Choix de l'épaisseur d'isolation</i>	78
<i>Finition intérieure</i>	79
<i>Conclusion</i>	79
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET	80
IDENTIFICATION ET CONCEPTION DES NOEUDS	80
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DU PROJET.....	85

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



Attention :

Plus la pente augmente, plus l'aspect et la qualité visuelle des matériaux extérieurs ont de l'importance.



PENTE CONSEILLÉE SELON LES MATÉRIAUX DE COUVERTURE; SE RÉFÉRER ÉGALEMENT AUX INDICATIONS DES FOURNISSEURS.

LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET

CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE

Conditions externes au projet :

- Climat extérieur ;
- Matériaux disponibles (coût) et techniques de pose :
 - pentes possibles ;
 - texture, couleur ;
 - durabilité, entretien ;
- Contraintes urbanistiques d'intégration au site ;
- Contexte réglementaire.

Conditions internes au projet :

- Programme ;
- Climat intérieur ;
- Parti architectural.

=> 1. Matériau visible en couverture, associé à une pente

CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE

2a. Si la pente de la charpente est forte => écailles

=> système A

ou si l'on veut, technologiquement parlant, supporter les écailles en surtoiture :

=> [système B + écailles] ou [système D + écailles]

2b. Si la pente est faible à moyenne :

=> systèmes B ou C ou D selon questions d'aspect, de coût, de rapidité d'exécution.

=> 2. Choix du système de toiture (A,B, C ou D, avec écailles éventuellement supplémentaires posées en surtoiture dans les cas B ou D), selon :

- le matériau de couverture :

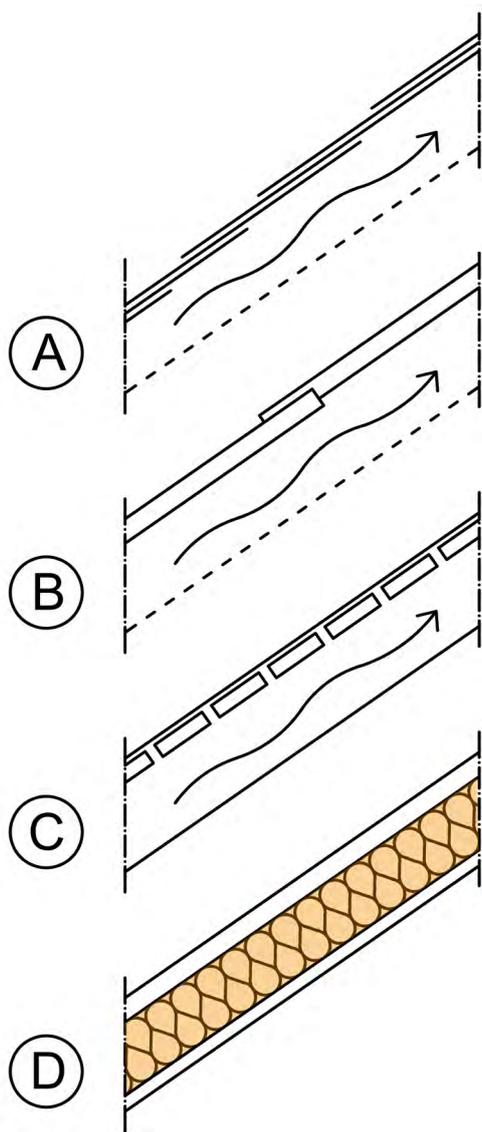
- A. écailles
- B. plaques ondulées ou nervurées
- C. feuilles

- la ventilation sous la zone de couverture :

- A, B, C : ventilées
- D : non ventilée

Pour approcher les fonctions de la toiture, on différencie 4 systèmes possibles de toiture (systèmes A à D) comme explicités à la page suivante :

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



Système A :

Couche de couverture discontinue (écailles).

La vapeur sachant migrer au travers de la toiture, deux conditions doivent être respectées :

- les couches sont d'autant plus perméables à la vapeur d'eau, que l'on approche de l'extérieur, condition particulièrement recommandée pour la sous-toiture;
- le flux de vapeur d'eau doit être aussi limité que possible, tandis que les condensats occasionnels se produisant au dos du matériau de couverture sont évacués par la sous-toiture.

Système B :

Plaques (B1) ou tôles (B2) ondulées ou nervurées, ventilées en sous-face.

Les mêmes considérations en matière de transfert de vapeur d'eau que celles énoncées dans le système A s'appliquent ici aussi.

Un décor d'écailles (ardoises, tuiles...) peut être apposé, en surtoiture, sur la couverture primaire.

Système C :

Idem système B, mais couverture en feuilles au lieu de plaques ou de tôles.

Les mêmes considérations en matière de transfert de vapeur d'eau que celles énoncées dans le système A s'appliquent ici aussi.

Système D :

Deux types de solutions techniques de toiture "totale" :

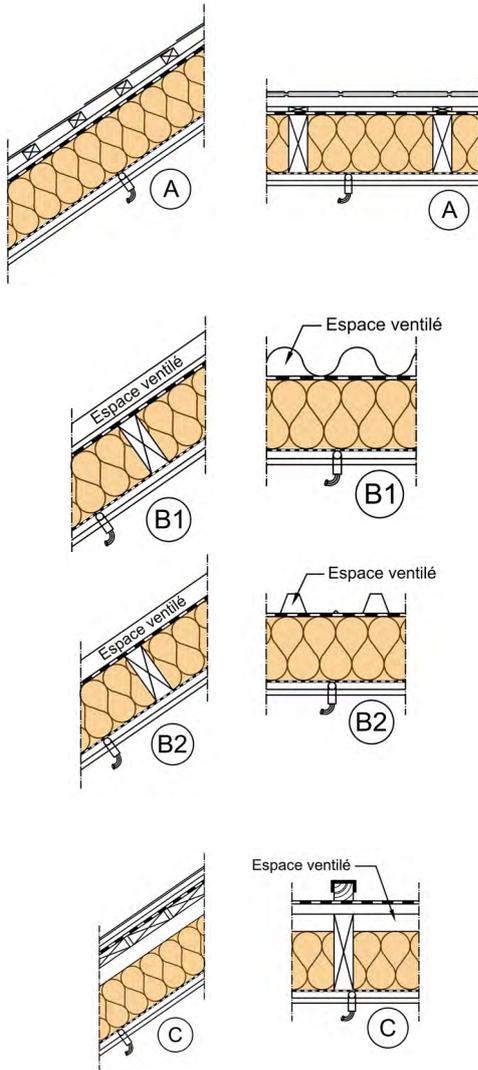
- panneaux composites autoportants, incluant couverture, isolation thermique et finition intérieure;
 - couverture en tôles (D1), feuilles (D2) ou membranes (D3) non adhérentes à l'isolation thermique + finition intérieure;
- sans aucune ventilation interne de la paroi.

Un décor d'écailles peut éventuellement être apposé sur la couverture primaire, en surtoiture.

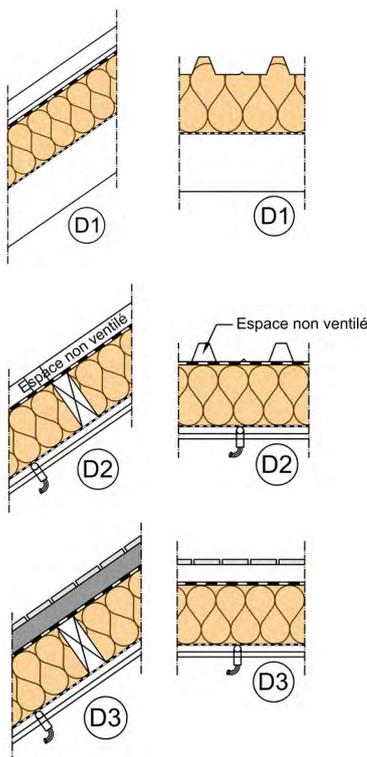
Les tableaux suivants détaillent les particularités des systèmes A à D, en ce qui concerne les fonctions assumées par la paroi «toiture».

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Ventilées



Non ventilées



REMARQUE GÉNÉRALE CONCERNANT LA VENTILATION DES TOITURES (SYSTÈMES A, B ET C)

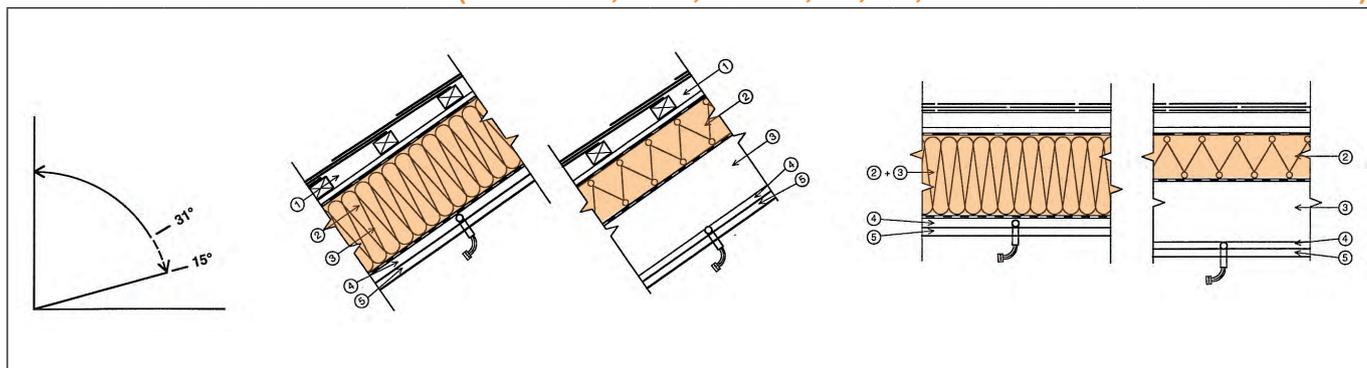
La ventilation de l'espace sous la zone de couverture (donc sous la sous-toiture éventuelle) a longtemps été recommandée, pour éliminer toute humidité excessive ou résiduelle, source de condensats possibles dans cette zone froide. De campagnes de mesures sur des bâtiments existants dans différents pays de climat tempéré humide, il résulte que cette ventilation présente des effets pervers :

- Elle présente le risque d'un sur-refroidissement pouvant se former sous la sous-toiture, où rien ne permet d'évacuer les condensats.
- La ventilation sous la zone de couverture étant réalisée dans une lame, elle induit des effets de dépression perpendiculaires au mouvement de l'air, s'exerçant sur les «faces» de la lame d'air. Ces dépressions entraînent une aspiration, vers cette lame, de l'air extérieur au travers de la zone de couverture et de l'air intérieur (au travers des 4 zones de toiture sous-jacentes), mouvements dépressionnaires qui s'ajoutent à la dépression naturellement existante au travers de la toiture.
- Cette zone ventilée en contact avec l'air extérieur constitue une voie de pénétration du vent qui peut atteindre l'ambiance intérieure lorsque les zones sous-jacentes de la toiture sont peu étanches à l'air.

La ventilation sous la sous-toiture est à déconseiller, absolument.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

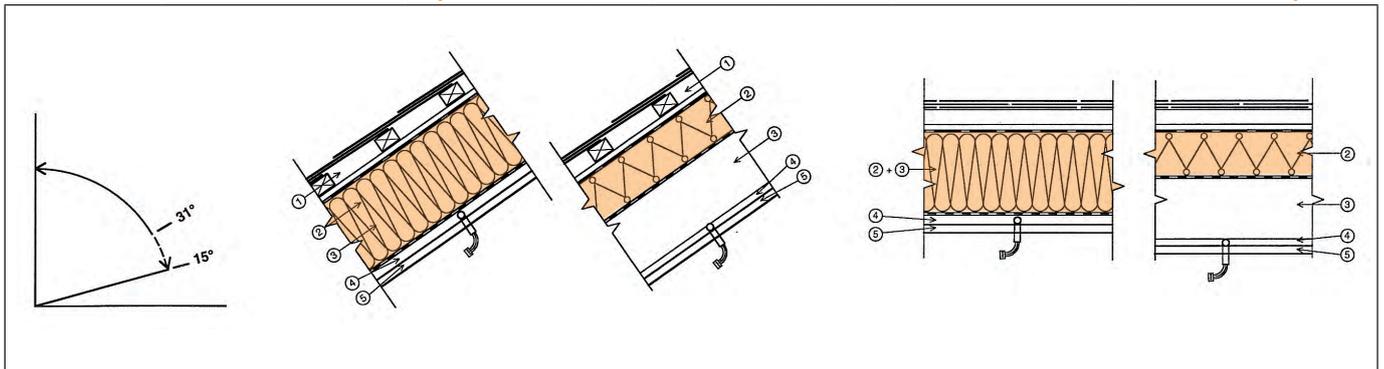
A. COUVERTURES EN ÉCAILLES (ARDOISES, BOIS, TUILES, ZN, CU, BARDEAUX BITUMÉS CLOUÉS...)



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT					
Eau	Rejette l'eau par recouvrement de bardeaux, en fonction de la pente. La sous-toiture complète le système.				
Vapeur	La sous-toiture doit être perméable à la vapeur d'eau. La couverture doit être insensible au gel.	En cas de climat intérieur avec une pression de vapeur élevée, nécessité d'un pare-vapeur en sous-face ou d'un isolant très peu ou pas perméable à la vapeur.	Si la structure traverse l'isolation, le matériau ne doit pas être conducteur thermique (le bois est le matériau de structure de toiture par excellence)	Les installations ne doivent pas percer le pare-vapeur sous la couche d'isolant, sauf cheminée et ventilation. Attention aux joints.	Peut servir de pare-vapeur ou de régulateur de vapeur. Séparer le matériau de finition des matériaux de structure conducteurs.
Confort thermique	Peut, par la ventilation en sous-face, éliminer une partie de la chaleur due au rayonnement solaire.	Réduit le passage de la chaleur. Lorsque la face inférieure est réfléchissante, peut freiner le rayonnement de l'intérieur vers l'extérieur.	Si béton ou élément massif, contribue à l'inertie thermique.	Peut éventuellement contribuer à l'isolation thermique, si la convection de l'air y est empêchée.	Il est préférable que cette couche ne soit pas trop isolante thermiquement.
	Une sous-toiture réfléchissante (vers l'extérieur) ou de couleur claire peut renvoyer une partie du rayonnement solaire.	Si zones 2 et 3 réunies : lorsque le matériau structurel est en bois : il contribue à l'isolation thermique (mais moins efficacement qu'un matériau isolant).			
		Doit être totalement étanche à l'air.	Si élément continu (en béton, panneaux, tôles) : contribue à l'étanchéité à l'air.	Doit être séparé de tout contact avec l'air extérieur.	Aide à l'étanchéité à l'air intérieur, mais n'est pas un rempart absolu. Attention aux pénétrations des équipements.
FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT					
Lumière		Une attention particulière devra être apportée pour obtenir une bonne étanchéité à l'air.			Réfléchit la lumière du local, suivant teinte ou texture.
Bruit aérien extérieur	Peu efficace pour atténuer les vibrations de l'air.	Isolation souple de type laine minérale : efficace comme absorbant acoustique. Si panneaux avec 2 faces de masses différentes et sans contact entre elles : très efficaces.	Si élément lourd et continu sur toute la surface (dalle de béton, hourdis, etc.) : très efficace pour amortir les vibrations.	Si bien fermé vers l'intérieur : contribue à limiter les vibrations.	Si de masses différentes et étanche : assez efficace. Par sa texture, peut aider à limiter la réverbération des ondes sonores. Fixation élastique souhaitable.
Bruits d'impact extérieur		Un isolant thermique souple, revêtu en sous-face par un pare-vapeur souple, peut participer à l'atténuation des bruits d'impact.		Peut participer à l'absorption des ondes sonores, en corrélation avec la zone de finition (laissée ouverte).	Fixation élastique souhaitable.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

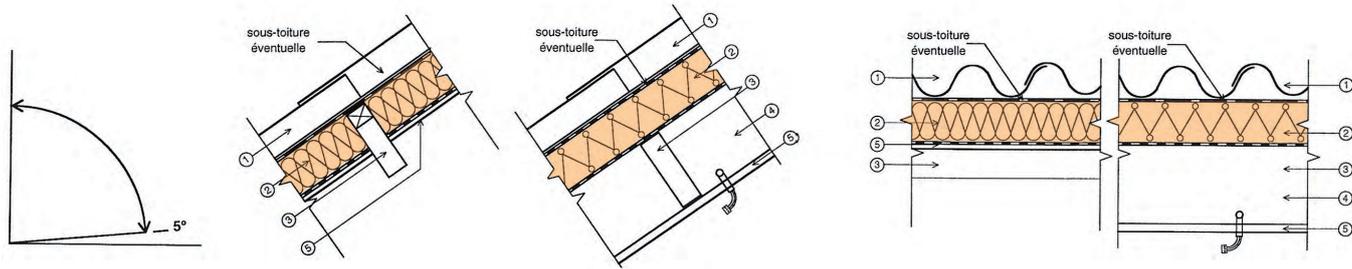
A. COUVERTURES EN ÉCAILLES (ARDOISES, BOIS, TUILES, ZN, CU, BARDEAUX BITUMÉS CLOUÉS...): SUITE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT					
Bruit aérien intérieur				Idem	Aide à limiter et absorbe les réverbérations, suivant sa texture. Fixation élastique souhaitée.
Sécurité à l'usage	Constitue un accès pour l'entretien, à faciliter (crochets d'échelle...). Doit inclure une protection contre l'intrusion d'insectes (moustiquaires). Peut servir de sortie de secours.	Ne peut dégager d'émissions nocives.	Ne peut être traité (cas du bois) avec des produits dégageant des émissions nocives.		Ne peut dégager d'émissions nocives.
Sécurité au feu	Ne doit pas transmettre la flamme, ni s'enflammer.	Peut collaborer à la résistance au feu si laine de roche. Doit présenter une bonne réaction au feu.	En béton : résistance au feu très élevée. En bois : combinée avec les zones de finition et d'isolation thermique, la laine de roche permet d'obtenir une certaine résistance au feu.		Bonne réaction au feu demandée ou exigée. Se combine avec les zones de structure et d'isolation thermique.
Bilan énergétique global	Favoriser le choix de matériaux dont la fabrication et la mise en oeuvre consomment, au total, le moins d'énergie.				
Recyclage des matériaux	Favoriser le choix de matériaux, ainsi que leur emballage, particulièrement recyclables (sans nocivité pour l'environnement ou biodégradables).				
FONCTION STRUCTURALE					
Fonction structurale	Participe peu à cette fonction, sauf pour répartir les charges de neige, de vent et d'entretien sur la structure sous-jacente.	Dans le cas de panneaux composites avec âme en mousse synthétique isolante autocollante créant une liaison ferme et durable entre 2 panneaux de fibres de bois ou de multiplis en bois, cette zone participe à la transmission des charges sur la structure principale et sert de structure secondaire et de contreventement du versant de la toiture. Elle peut faire office de zone de structure, voire de zone de finition.	Structure secondaire ou principale, suivant le cas. Si elle est en bois, elle peut être dans le même espace que la zone d'isolation thermique. Sinon, elle doit être en-dessous, en tout ou en partie. Dans ce dernier cas, elle ne peut être en contact avec la zone de couverture. Elle peut être constituée de panneaux isolants préfabriqués ou de dalles ou de tôles porteuses.		Fait exceptionnellement partie de la zone de structure, si c'est une finition collaborante d'un panneau isolant auto-portant ou si c'est la face inférieure finie d'une dalle ou d'une tôle préfabriquée servant de zone de structure.
FONCTION VISUELLE					
Fonction visuelle	Elément essentiel de l'aspect de la toiture, par sa texture, son mode de pose, sa durabilité, sa facilité de remplacement et de nettoyage.		Si apparente, peut contribuer à l'esthétique du local sous toiture.	Peut rester visible, si finition de type lame ouverte.	Peut constituer la peau intérieure visible du complexe toiture et participer à la composition architecturale intérieure. Sa durabilité et sa facilité d'entretien sont à envisager.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

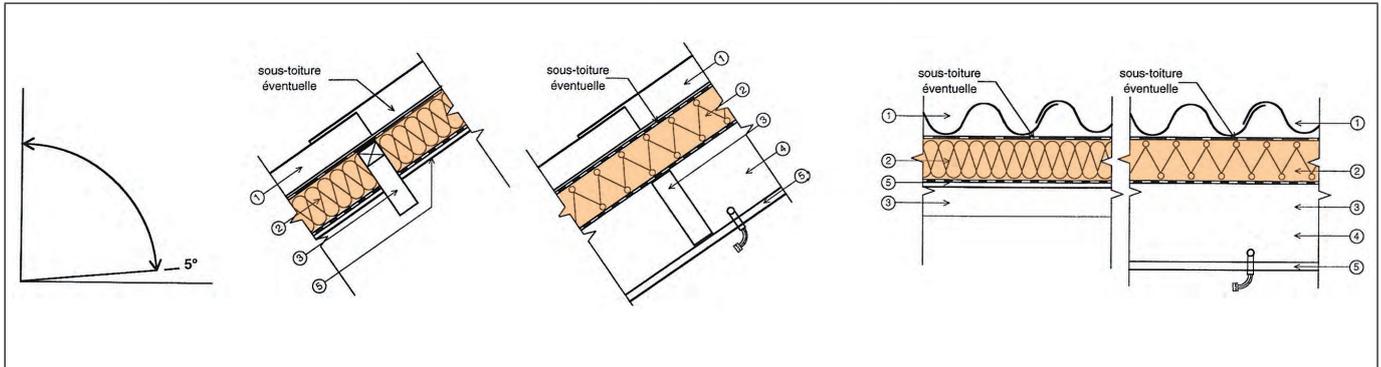
B. PLAQUES AUTOPORTANTES (FIBRES-CIMENT, ACIER, ALUMINIUM, ZINC, PVC, PE...) VENTILÉES EN SOUS-FACE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT					
Eau	Rejette l'eau de pluie par les recouvrements horizontaux et latéraux des plaques. Pour certains types de tôles : attention au sens de pose, suivant les vents dominants (cf. instructions de pose du fabricant). Possibilité de tôle sans joint horizontal en cas de versant de moins de 11 m (ordre de grandeur pour les tôles métalliques). Une sous-toiture peut compléter le système, surtout en cas de faible pente (< 20 degrés) s'il y a des joints horizontaux.	Nota bene : Tous les systèmes avec tôles peuvent servir à supporter une couverture visible de système A en bardeaux. Dans ce cas, les tôles servent de couverture secondaire, de support de la couverture primaire et de sous-toiture; l'espace sous tôles doit être bien fermé et un pare-vapeur efficace mis en place en cas de climat intérieur assez humide.			
Vapeur	Dans les climats tempérés, les tôles en fibres-ciment doivent être rendues étanches à la vapeur et à l'eau par une double peinture (une sur chaque face). Ceci évite leur détérioration rapide sous l'effet du gel en climat humide.	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A
	De la vapeur provenant de l'air extérieur peut se condenser même en été sous la tôle ayant rayonné vers le firmament (phénomène de sur-refroidissement). Une sous-toiture est alors le moyen d'évacuer cette condensation, à moins que la zone isolante soit conçue pour cet effet. Les couvertures en métal ou matières synthétiques demandent l'emploi d'une sous-toiture, qui nécessite éventuellement un support adéquat.	Nota bene : Dans le cas de tôles supportant une couverture décorative, ce phénomène est moins courant, vu que celle-ci limite le rayonnement.	En cas de structure en tôles, celles-ci sont étanches à la vapeur; les joints en augmentant la perméabilité, il y a parfois lieu de prévoir la pose d'un pare-vapeur complémentaire. Mais si elles sont perforées pour l'amélioration de l'acoustique intérieure, elles doivent être complétées par un pare-vapeur.		

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

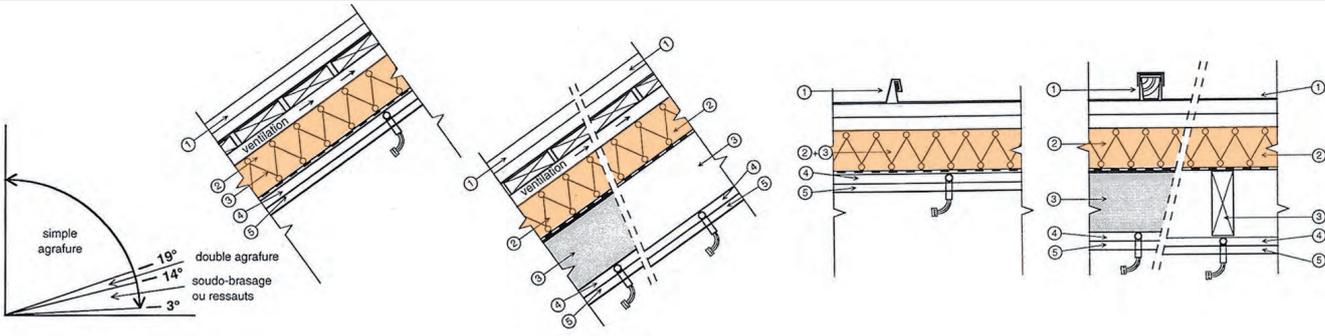
B. PLAQUES AUTOPORTANTES (FIBRES-CIMENT, ACIER, ALUMINIUM, ZINC, PVC, PE...) VENTILÉES EN SOUS-FACE : SUITE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT					
Lumière	Des éléments de couverture translucides de même profil que les tôles opaques permettent un éclairage naturel. Des lanterneaux plus performants sont toujours possibles.	A l'endroit des bandes translucides, l'isolation courante est remplacée par une paroi translucide moins isolante. L'étanchéité à l'air du joint du pourtour des trémies de la zone translucide est à soigner particulièrement pour éviter des condensations internes et des passages d'air.	La structure doit aussi être interrompue en partie à ces endroits.		idem système A.
Bruit aérien extérieur	Peu efficace pour atténuer les vibrations de l'air.	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A
Bruit d'impact extérieur	Peu (à non) efficace.				
Bruit aérien intérieur				idem système A	Une finition en tôle perforée peut être assez efficace, si elle est complétée par un isolant souple. Attention : un pare-vapeur est nécessaire.
Sécurité à l'usage	idem système A. Attention particulière au glissement de la neige.	idem système A	idem système A		idem système A
Sécurité au feu	idem système A	idem système A	idem système A		idem système A
FONCTION STRUCTURALE					
Fonction structurale	Les tôles ont une inertie mécanique non négligeable et elles constituent une structure plissée. Elles sont donc capables de franchir des portées de l'ordre du mètre minimum. Elles servent à la fois de couverture et d'élément de structure secondaire.	idem système A. Dans le cas où l'espace sous la tôle de couverture est réduit au minimum et non ventilé, ou encore lorsque la tôle de couverture fait partie du panneau composite, on a un système de toiture repris au système D.	idem système A	idem système A	idem système A
FONCTION VISUELLE					
Fonction visuelle	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

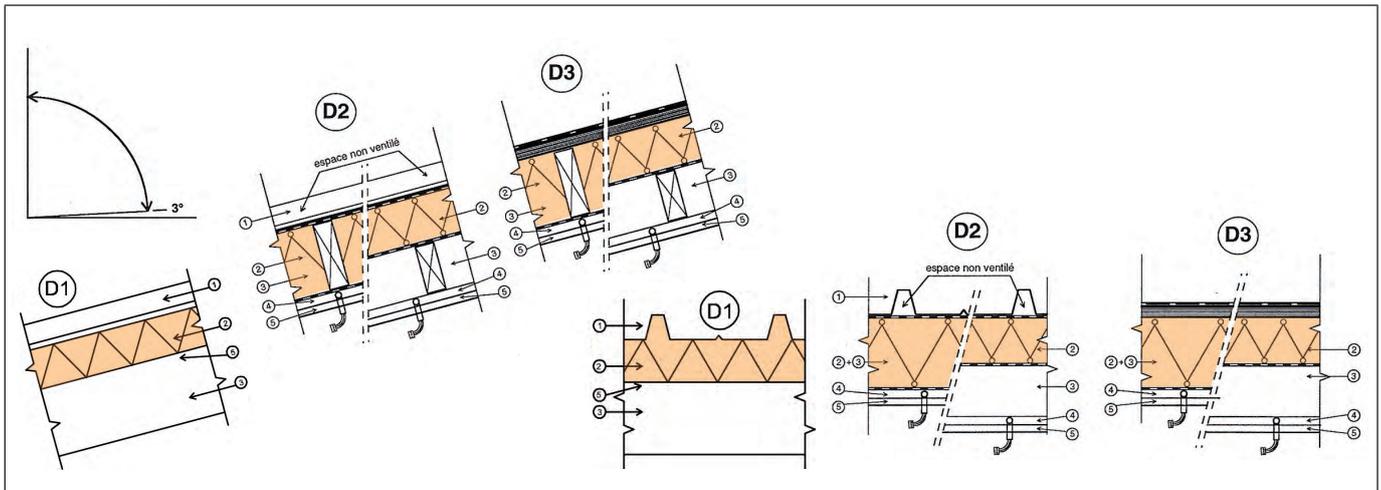
C. FEUILLES MÉTALLIQUES (ZINC, CUIVRE, ACIER INOXYDABLE, Pb) VENTILÉES EN SOUS-FACE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT					
Eau	Rejette l'eau de pluie par l'étanchéité totale du métal et des joints par leur forme. Les assemblages entre bandes de couverture varient suivant la pente, le type de joint latéral et suivant le métal utilisé. Cette zone comprend : <ul style="list-style-type: none"> la tôle; une couche de désolidarisation (sauf dans le cas du Zn-Cu-Ti); un support ventilé pour créer la patine potentielle si nécessaire (dans le cas du Zn-Cu-Ti). Attention aux compatibilités chimiques des matériaux de couverture avec les matériaux de support et d'évacuation des eaux de toiture (voir "les couples galvaniques", p. 30 de ce guide). Attention à la toiture à tasseaux trop peu pentue, lors de la fonte des neiges.				
Vapeur	L'utilisation d'un pare-vapeur efficace élimine en principe tout risque de condensation due à la migration de la vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur. Dans le cas du Zn-Cu-Ti, la ventilation sous le support de toiture est toutefois imposée par le fabricant, pour faciliter la patine des feuilles de Zn-Cu-Ti et le séchage des condensations éventuelles reprises par les voliges. La section totale des prises d'air (pied de versant + faite) est $\geq 10 \text{ cm}^2 / \text{m}^2$ de toiture avec hauteur min. = 40 mm pour la couche sous le voligeage et 10 mm à l'entrée en bas de versant. Section au faite = 1,5 x section en bas de versant. Comme vu en B, le sur-refroidissement peut causer de la condensation; une sous-toiture complémentaire peut améliorer le système.	La position de l'isolation nous donne une configuration de toiture froide. Un écran pare-vapeur est nécessaire en climat III dans tous les cas de structure.	idem système A	idem système A	idem système A
Confort thermique	idem système A.	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A
FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT					
Lumière	La patine extérieure atténue les reflets de la lumière solaire, sauf dans le cas de l'acier inoxydable, qui se patine peu.				idem système A
Bruit aérien extérieur	De par sa continuité et par la couche de désolidarisation, la couverture contribue à l'affaiblissement des ondes sonores.	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A
Bruits d'impact extérieur	La couche de désolidarisation atténue les bruits d'impact, mais aussi les bruits de battement des tôles sous le vent.				
Bruit aérien intérieur				idem système A	idem système A
Sécurité à l'usage	idem système B.	idem système A	idem système A		idem système A
Sécurité au feu	idem système A.	idem système A	idem système A		idem système A
Bilan énergétique	idem système A.				
Recyclage des matériaux	idem système A.				
FONCTION STRUCTURALE					
	La couverture ne participe pratiquement pas à la reprise des charges. Son support direct doit être continu (sauf interstice de ventilation de l'onde de quelques millimètres, si nécessaire).	idem système A	idem système A	idem système A	idem système A
FONCTION VISUELLE					
	Les tôles posées avec tasseaux ou joints debout avec des entraxes de joints réguliers (de 50 à 90 cm selon le métal et son épaisseur) établissent un rythme qui structure fortement la surface des toitures. Ceci peut avoir une influence sur la composition architectonique de l'ensemble de l'édifice.			idem système A	idem système A

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

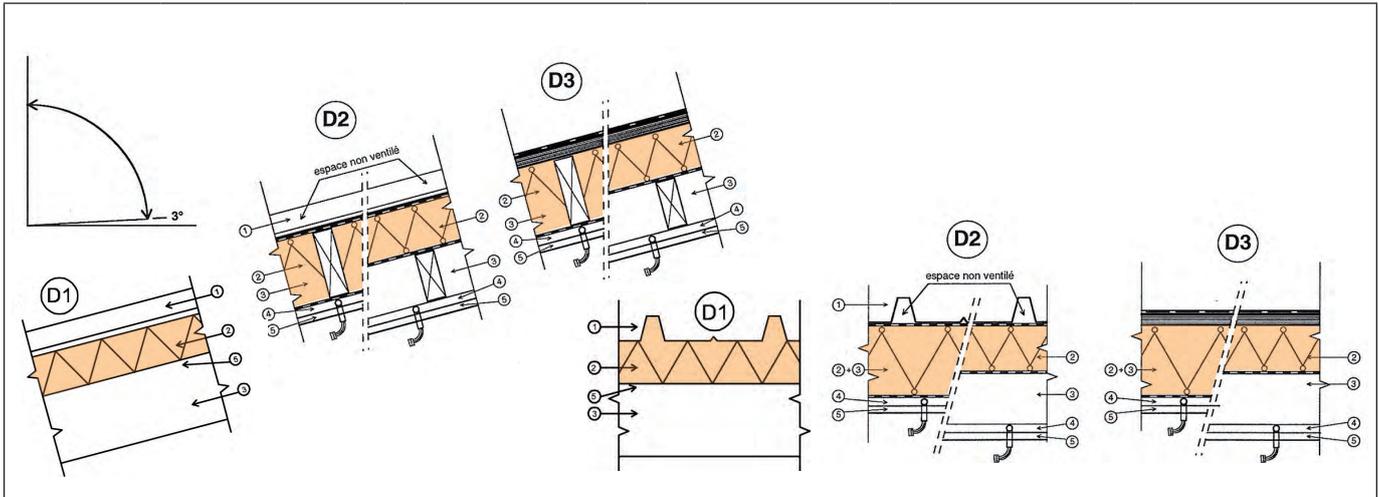
D. PANNEAUX COMPOSITES - TÔLES OU PLAQUES ONDULÉES, MEMBRANES, ETC. NON VENTILÉES EN SOUS-FACE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
FONCTION DE CONTRÔLE DU CLIMAT					
Eau	Totalement étanche à l'eau. Joint par recouvrement ou soudure. Possibilité de tôles très longues (de l'ordre de 11 m). Respecter le sens de pose suivant les vents dominants. Membranes en bâches ou soudées.	Nota bene : idem système B. Dans le cas de panneaux composites, ceux-ci remplissent toutes les fonctions, y compris celles de l'étanchéité à l'air et à l'eau.			
Vapeur	La totale imperméabilité à la vapeur d'eau impose une parfaite étanchéité à la vapeur d'eau de la zone d'isolation thermique.	Performance maximale d'étanchéité à la vapeur d'eau souhaitable.	Une tôle de structure inférieure est totalement étanche à l'air intérieur et à la vapeur. Soigner l'étanchéité des joints, à la vapeur d'eau.	Il faut rester attentif de ne pas laisser de perforation dans le système pare-vapeur.	Une finition intérieure rapportée peut être perméable à la vapeur et à l'air intérieur, sans problème.
Confort thermique		En cas de panneaux composites, une coupure totale entre la couverture et le support de l'isolant est la solution idéale, rendue possible par l'isolant thermique qui solidarise les deux couches. Une attention particulière est à apporter au mode de fixation, qui ne peut constituer un noeud constructif non conforme.	En cas de panneaux composites : plus l'épaisseur d'isolation thermique augmente, plus la résistance mécanique augmente également.	S'il existe, l'espace technique n'intervient pas dans le comportement thermique.	La finition intérieure, si elle existe, ne peut être thermiquement très isolante. Il faut laisser passer la chaleur, jusqu'au support de l'isolant.
FONCTION DE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT					
Lumière	Idem systèmes B et C	Idem systèmes B et C			idem système A
Bruit aérien extérieur	Très étanche à l'air, donc efficace pour atténuer les vibrations de l'air extérieur.	L'absence de toute liaison mécanique entre les deux peaux contribue à l'isolation acoustique.	Très étanche à l'air, donc efficace pour atténuer les vibrations de l'air extérieur.	Peut être utilisé pour atténuer les vibrations de l'air.	Une finition semi-lourde de type plâtre peut améliorer l'isolation acoustique. Idem si finition perforée rapportée.
Bruits d'impact extérieur		L'absence de toute liaison mécanique entre les deux peaux contribue à l'isolation acoustique.			
Bruit aérien intérieur		Grâce à l'isolant, l'effet tambour est partiellement évité.	La finition dure et lisse de la tôle inférieure la rend assez réverbérante, ce qui peut être corrigé par des peintures texturées.	Peut participer très fortement à réaliser des pièges anti-réverbération des sons.	Une finition perforée en sous-face rapportée est intéressante.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

D. PANNEAUX COMPOSITES - TÔLES OU PLAQUES ONDULÉES, MEMBRANES, ETC. NON VENTILÉES EN SOUS-FACE : SUITE



	Zone ①: couverture	Zone ②: isolation thermique	Zone ③: structure	Zone ④: espace technique	Zone ⑤: zone des finitions
Sécurité à l'usage	idem système B			Ces 2 zones peuvent être utilisées pour augmenter la résistance au feu de l'ensemble. Par exemple : plaques de plâtre ou panneaux de fibres minérales disposés en sous-face.	
Sécurité au feu	Bonne réaction au feu.		Doit présenter des caractéristiques de bonne résistance au feu.	Peuvent être utilisés pour augmenter la résistance au feu de l'ensemble. Par exemple : plaques de plâtre ou de panneaux de fibres minérales vissées en sous-face.	
Bilan énergétique global	idem système A				
Recyclage des matériaux	idem système A				

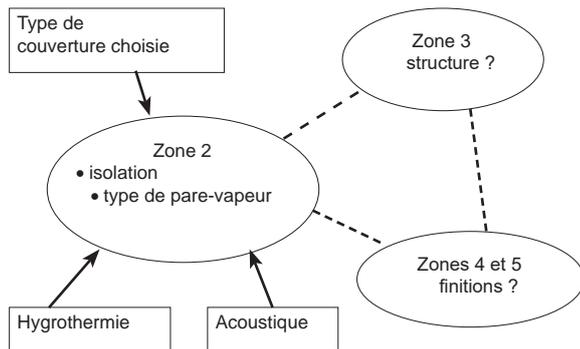
FONCTION STRUCTURALE

Fonction structurale	Dans le cas de panneaux composites : grâce à l'adhérence entre l'isolant et les tôles et grâce à la résistance au cisaillement et à l'effort rasant de l'isolation, les 3 couches (couverture, isolation thermique et structure) constituent une plaque capable de franchissements de l'ordre de 3 à 4 mètres entre appuis pour des charges usuelles de toitures. Ce point est un avantage certain car il annule le besoin de supports intermédiaires et simplifie la structure principale. Il supprime tout pont thermique habituellement rencontré par la traversée de la structure à travers la couche d'isolation thermique.				
-----------------------------	--	--	--	--	--

FONCTION VISUELLE

Fonction visuelle	La tôle supérieure ou la membrane est l'élément apparent. Sa couleur et sa tenue dans le temps sont importants.				La tôle inférieure peut rester apparente et être peinte ou revêtue d'un enduit atténuant l'éblouissement.
--------------------------	---	--	--	--	---

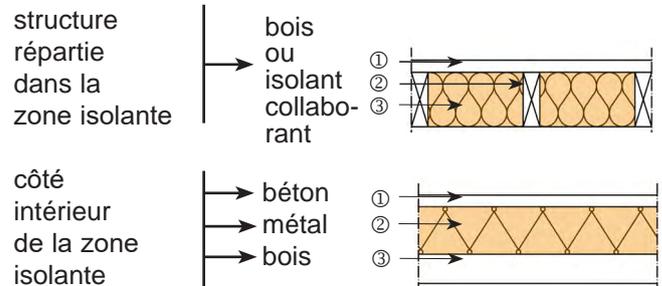
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



SECURITE INCENDIE			
Note importante : Les constructions, hormis les maisons unifamiliales et certains autres bâtiments, doivent répondre aux normes définies par l'A.R. du 12 juillet 2012 publié au Moniteur Belge du 21/09/2012 [GF -12].			
R_F DEMANDÉE POUR LA TOITURE À VERSANTS (>10°)			
BB Bâtiments bas H < 10 m	R 30 Sauf si la toiture est séparée du reste du bâtiment par un élément de construction EI 30.		
BM Bâtiments moyens 10 ≤ H ≤ 25 m	R 60 Sauf si le plancher sous toiture présente REI 60 et si l'accès éventuel à l'espace sous toiture, qui doit être vide, se fait par des portes ou trappes présentant EI 30.		
BE Bâtiments élevés H > 25 m	R 120 Sauf si le plancher sous toiture présente REI 120 et si l'accès à l'espace sous toiture, qui doit être vide, se fait par des portes ou trappes présentant EI 60.		
où H = hauteur entre le niveau d'accès au charroi des pompiers et le plus haut niveau accessible au public.			
RÉACTION AU FEU DES MATÉRIEAUX			
	Matériaux superficiels de couverture	Revêtements de sol	Plafonds
BB	B	E ou F	C
BM	B	E ou F	C
BE	B	D	C

CHOIX DE LA ZONE ISOLANTE

- 3a. Eviter tout pont thermique
=> choix d'un principe de structure (matériau structural et positionnement)



- 3b. La finition peut-elle participer à la résistance à la diffusion de vapeur d'eau ?
- 3c. Choix définitif du type de matériau isolant et du pare-vapeur éventuel + épaisseur de l'isolant selon la résistance thermique souhaitée.

=> 3. Choix de l'isolant (type + épaisseur) et du pare-vapeur éventuellement associé; voir les tableaux des pp. 56 à 64 qui donnent, selon les systèmes de toiture, le matériau isolant et le type de structure (légère ou lourde) : l'épaisseur d'isolant nécessaire pour obtenir un $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et le type de pare-vapeur recommandé.

CHOIX DES ZONES D'ÉQUIPEMENT ET DE FINITION INTÉRIEURE

selon :

- l'aspect souhaité de la finition intérieure ;
- la nécessité de participer ou non à l'étanchéité à la vapeur d'eau ;
- la norme d'isolation aux bruits aériens à l'intérieur des bâtiments, NBN S01-400-1 : 2008 «Critères acoustiques pour les immeubles d'habitation» [IBN -08-3] ;
- l'entretien ;
- la résistance au feu ;
- la réaction au feu.

Attention : si la finition intérieure offre une résistance thermique (par ex. isolation acoustique), une vérification du pare-vapeur prédimensionné à l'étape 3 est nécessaire.

CHOIX DÉTAILLÉ DE LA STRUCTURE

Consulter les NIT, CSTC Revues, les publications du FERSIC, du Courrier du Bois, les documentations de fabricants de panneaux composites.

CHRONOLOGIE DE LA POSE

Possibilité, par exemple, de poser les écailles en 2ème phase, sur une couverture primaire en tôles ou plaques.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

PRÉDIMENSIONNEMENT DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION ET DU PARE-VAPEUR COMPLÉMENTAIRE ÉVENTUEL

Les tableaux des pp. 56 à 64 ont pour but d'aider l'auteur de projet à prédimensionner l'épaisseur d'isolant et le type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé, dans les cas les plus courants de toitures.

Matériaux de couverture

Les matériaux de couverture repris sont parmi les plus courants, groupés selon les systèmes de toiture :

Système A :

- bardeaux de bois sur lattage ;
- ardoises naturelles sur lattage ;
- ardoises de fibres-ciment sur lattage ;
- ardoises métalliques (Zn-Cu-Ti) sur voliges ;
- tuiles de terre cuite sur lattage ;
- tuiles de béton sur lattage ;
- tuiles métalliques (acier) sur lattage ;
- bardeaux bitumés cloués sur multiplex résistant à l'eau.

Système B :

- plaques de fibres-ciment autoportantes, ventilées en sous-face ;
- plaques métalliques (acier) autoportantes, ventilées en sous-face.

Système C :

- feuilles métalliques (Zn-Cu-Ti) non autoportantes, ventilées en sous-face.

Système D :

- plaques de fibres-ciment autoportantes, non ventilées en sous-face ;
- plaques métalliques (acier) autoportantes, non ventilées en sous-face ;
- membranes en PVC ;
- membranes synthétiques autres que PVC et bitu-mineuses (par ex. de type APP) ;
- bardeaux bitumés soudés.

Support de toiture

Certains matériaux (bardeaux bitumés, par ex.) nécessitent un support de toiture, pris en compte dans les compositions de toiture (multiplex résistant à l'eau).

Sous-toitures

Les sous-toitures sont de deux types :

- rigides : fibres-ciment, fibres de bois ou panneaux résistant à l'eau (en tant que panneau supérieur du caisson isolant) ;
- souples : polyéthylène microperforé ou bitume à lés ouverts.

Dans les cas de compositions de type "sarking", conformément aux directives des fabricants, les isolants sont, tous, protégés par une sous-toiture de type géotextile ou polyéthylène ou polypropylène, non tissés ($\mu d = 0,02$ m).

Isolants

Les valeurs de conductivité thermique λ_{U_i} utilisées pour les isolants sont les valeurs par défaut données dans l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 15/12/16 [GW -16-2]. Ces valeurs correspondent à une performance qui serait aisément obtenue, quelle que soit la marque commerciale du matériau. Il est autorisé d'utiliser la conductivité thermique spécifique d'un isolant déterminé, λ_D (valeur « déclarée »), sur base :

- des informations reprises dans la base de données www.epbd.be ;
- d'un agrément technique avec certification valide (ATG, ATE).

Par exemple pour le polystyrène expansé :

- valeur par défaut $\lambda_{U_i} = 0,050$ W/(m.K) ;
- valeur reprise de la base de données [epbd.be](http://www.epbd.be) pour une marque donnée : $\lambda_D = 0,038$ W/(m.K).

Les épaisseurs d'isolant calculées l'ont été par pas entier de 1 cm. Le coefficient de transmission thermique U et l'épaisseur d'isolation qui en résultent sont indépendants de la classe de climat intérieur.

Les isolants repris sont les suivants :

	Conductivité thermique λ_{U_i} [W/(m.K)]	Facteur de diffusion μ [-]
PUR mousse de polyuréthane	0,035	30
EPS polystyrène expansé	0,050	60
XPS polystyrène extrudé	0,045	150
MW laine minérale	0,050	1
CG verre cellulaire	0,055	1.10 ¹²
CEL cellulose (panneaux)	0,060	2
FB fibre de bois	0,060	2

Types de toitures

Les toitures se répartissent en 2 familles structurelles : les structures légères et les structures lourdes. Les structures légères envisagent plusieurs cas de figure :

- isolant entre gîtes de toiture + sous-toiture; finition intérieure : 2 plaques de plâtre ;
- "sarking" : isolant posé en continuité totale au-dessus des chevrons ou fermettes; finition intérieure : 2 plaques de plâtre ;
- caisson avec face supérieure en multiplex résistant à l'eau, isolant sur épaisseur partielle (ou totale) et plaques de fibro-silicate en face inférieure.

Les structures lourdes reprennent des hourdis de béton (lourd ou léger).

Attention : avec les isolants rigides (PUR, EPS, XPS et MW), il est important de remplir entièrement l'espace entre les gîtes de versant ou entre les structures traversantes, sinon des courants de convection autour des panneaux risquent de se produire, ce qui diminue la performance thermique de la zone d'isolation.

L'espace éventuel entre l'isolant et la face supérieure des panneaux (lorsque l'isolant ne remplit pas tout l'espace disponible) est toujours considéré comme non ventilé.

Climats utilisés pour les simulations

Le climat extérieur est le climat belge moyen (Uccle). Le climat intérieur choisi est le climat III (tel que défini p. 10), et cela pour trois raisons :

- les maisons sont de plus en plus confinées et leur étanchéité à l'air extérieur s'est considérablement renforcée, allant même parfois jusqu'à hypothéquer une ventilation convenable des locaux ;
- les locaux directement situés sous la toiture (chambres, salle de bain, etc.) sont des locaux où se produit une importante quantité de vapeur d'eau ;
- on considère que, si le climat II se rencontre dans la moitié du parc des maisons d'habitations, le climat III présente une sévérité climatique qui n'est dépassée que dans 5% des cas de maisons d'habitations.

Attention : Il est apparu que les simulations, avec le climat III, pour les matériaux de couverture suivants :

- système B : plaques métalliques autoportantes ventilées en sous-face ;
- système C : feuilles de Zn-Cu-Ti à joints debout ;
- système D : plaques métalliques autoportantes non ventilées en sous-face, membranes en PVC et bitumeuses, bardeaux bitumés soudés ;

imposent, parfois, le recours à des pare-vapeur de type E4, que l'on sait difficile à mettre en œuvre correctement, sauf collé sur un support continu.

Pour maintenir la faisabilité de ces choix, il a été préféré de réaliser les simulations de ces toitures en classe de climat II. Cela suppose donc que l'auteur de projet qui choisit d'utiliser l'un de ces matériaux de couverture prend toutes les mesures nécessaires et suffisantes pour que les locaux sous-jacents à la toiture soient très correctement ventilés (ou conditionnés), afin de maintenir ces locaux dans des conditions de température et de pression correspondant aux conditions de climat II.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Hypothèses des simulations

La méthode de Glaser n'est d'application que s'il n'y a pas de fuites par convection dans la toiture; cela suppose obligatoirement que, lorsqu'un pare-vapeur n'est pas requis pour la question de diffusion de vapeur d'eau, l'étanchéité à l'air doit être garantie par un autre dispositif (la finition intérieure, par exemple).

Les fluctuations du climat intérieur et du climat extérieur influencent sensiblement le processus de condensation, faisant alterner des périodes de condensation interne et des périodes de séchage. C'est pourquoi les simulations ont été menées sur une durée de 4 ans, afin de mettre en évidence le risque d'une condensation annuelle résiduelle, à éviter.

La condensation maximale accumulée en une année doit être limitée, de telle manière que le pouvoir isolant de la toiture ne soit pas sérieusement compromis et que les matériaux devenus humides ne subissent pas de dégâts dus au gel, à la corrosion (matériaux métalliques), au pourrissement (matériaux d'origine végétale), à la dissolution de certaines substances (colles, par exemple), à la formation de moisissures, etc.

La condensation maximale accumulée en une année a été strictement limitée à :

- un maximum absolu de 0,5 kg/m² ;
- 0,03 x [masse volumique] x [épaisseur] (kg/m²) pour les matériaux d'origine végétale (voliges) ou encollés avec une colle résistant à l'eau (multiplex) ;
- 0,05 kg/m² pour les matériaux d'origine végétale autres que ceux cités ci-dessus, pour les matériaux isolants et les structures légères ;
- 0,075 kg/m² pour les matériaux de couverture métalliques (écailles, feuilles, plaques) qui sont en effet sensibles aux eaux de condensation, plus agressives que les eaux de pluie. De plus, en présence de condensation, l'aération différentielle de zones conti-

guës, lorsqu'elle existe, crée un couple galvanique et provoque une dangereuse érosion du matériau de couverture ;
- 0,15 kg/m² pour le béton des structures lourdes.

Résultats

Les résultats obtenus sont synthétisés dans les tableaux des pp. 56 à 64. Pour chaque matériau de toiture appartenant aux systèmes A, B, C et D, un tableau spécifique permet de prédimensionner, en fonction du mode structurel, du type de support de toiture, du type de sous-toiture et du mode de mise en oeuvre de l'isolant :

- l'épaisseur de matériau isolant nécessaire pour obtenir un coefficient de transmission thermique $U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, visant une meilleure performance thermique du bâtiment que la performance réglementaire. Depuis le 1/01/14 et jusqu'au 31/12/20 au moins (voir l'Annexe 3 de l'AGW PEB du 28/01/16), les exigences thermiques imposent un $U_{\text{max}} \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ pour les plafonds et toitures [GW -16-1].
- le type de pare-vapeur indispensable pour éviter toute condensation nuisible (chaque type de pare-vapeur étant caractérisé par la valeur limite inférieure de la résistance à la diffusion μ_d de sa catégorie).

Ainsi, dans le tableau ci-dessous relatif au cas de plaques de fibres-ciment autoportantes ventilées en sous-face (système B), la composition de toiture prévoyant l'utilisation de caissons isolants avec une face supérieure en multiplex résistant à l'eau et une face inférieure en fibro-silicate - l'isolant occupant partiellement la hauteur du caisson -, la double case mise en évidence conseille, pour obtenir un $U \leq 0,2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, une épaisseur de 24 cm de laine minérale. Dans les conditions de climat III, un pare-vapeur de type E2 (c'est-à-dire dont $\mu_d \geq 5 \text{ m}$) doit être posé en complément, pour éviter tout risque de condensation nuisible.

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé																						
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture				PUR	EPS	XPS	MW	CG	CEL	FB																
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide	Souples	épaisseur (cm)								pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur							
Système B : PLAQUES FIBRES-CIMENT AUTOPORTANTES VENTILÉES EN SOUS-FACE	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*										19 ¹	-	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E2	28 ¹	-	30	E2	30	E2		
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*															19 ¹	E2	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*											19 ¹	E3	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*																16	-	23	-	21	-	23	E2	25	-	27	E2	27	E2
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*					*											19 ²	-	25 ²	-	23 ²	-	25	E2	27 ²	-	29	E2	29	E2
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*																18 ²	-	24 ²	-	22 ²	-	24	E2	26 ²	-	28	E2	28	E2

Remarques

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

SYSTÈME A

Matériaux de couverture		Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
		Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
					aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	
Système A : BARDEAUX DE BOIS	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*					*				19 ¹	-	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E2	28 ¹	-	30	E2	30	E2	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*					(*)					16	-	23	-	21	-	23	E2	25	-	27	E1	27	E1
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*							*			19 ²	-	25 ²	-	23 ²	-	25	E2	27 ²	-	29	E2	29	E2
	Lourde		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*							*			18 ²	-	24 ²	-	22 ²	-	24	E2	26 ²	-	28	E2	28	E2
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*						(*)				16	.3	23	.3	21	.3	23	.3	25	-	28	-	28	-
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*						(*)				16	.3	23	.3	21	.3	23	E1	25	-	27	E1	27	E1

Remarques

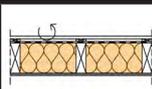
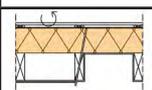
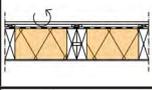
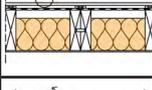
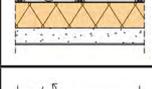
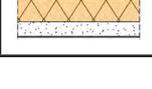
- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Système A : BARDEAUX BITUMES CLOUES	Légère		- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*									19 ¹	E3	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E3	27 ¹	-	29	E3	29	E3	
			- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*					*					18 ¹	E3	24 ¹	-	22 ¹	-	24	E3	26	-	28	E3	28	E3
	Lourde		- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*					*					16	E3	23	-	21	.3	23	E3	25	-	28	E3	28	E3
			- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*					*					16	E3	23	-	21	.3	23	E3	25	-	27	E3	27	E3

Remarques

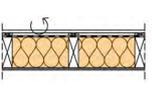
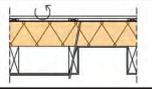
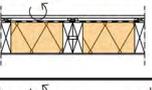
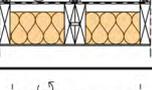
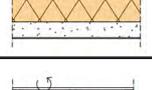
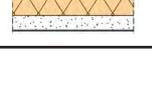
- Quoique non ventilée en sous-face, cette couverture en écailles est reprise dans le système A
- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, PS, PSE ou MV), attention au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de MV déconseillée.
 - La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voilages	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts															
Système A : ARDOISES NATURELLES (schiste)	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	E2	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						16	E2	23	-	21	-	23	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*				19 ²	E2	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*				18 ²	E2	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)						16	E1	23	.3	21	.3	23	E3	25	-	28	E3	28	E3
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)						16	E2	23	.3	21	.3	23	E3	25	-	27	E3	27	E3

Remarques

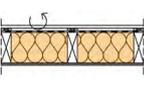
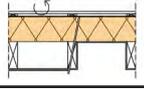
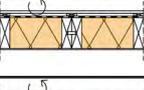
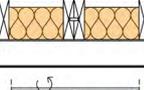
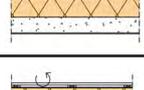
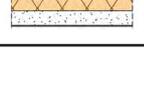
- ¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voilages	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur				
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts															
Système A : ARDOISES FIBRES-CIMENT	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	E1	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						16	E1	23	-	21	-	23	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*				19 ²	E1	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*				18 ²	E1	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)						16	.3	23	.3	21	.3	23	E2	25	-	28	-	28	-
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)						16	E1	23	.3	21	.3	23	E3	25	-	27	E2	27	E2

Remarques

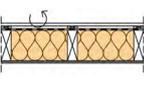
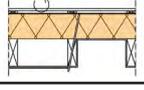
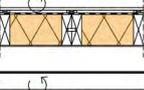
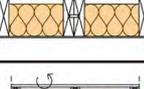
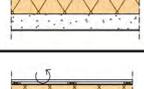
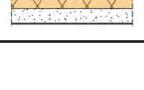
- ¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur												
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à lés ouverts															
Système A : ARDOISES METALLIQUES	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre			*		*																		
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre			*	(*)																			
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate			*		*																		
		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate			*		*																			
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage			*	(*)																			
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage			*	(*)																			

Remarques

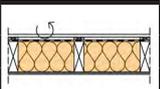
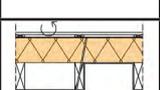
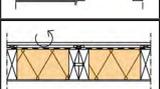
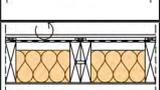
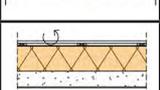
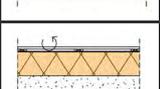
- ¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur												
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à lés ouverts															
Système A : TUILLES DE TERRE CUITE	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre			*		*																		
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre			*	(*)																			
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate			*		*																		
		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate			*		*																			
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage			*	(*)																			
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage			*	(*)																			

Remarques

- ¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- ³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

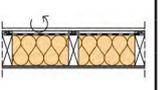
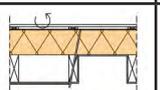
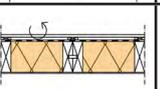
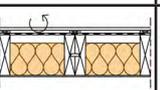
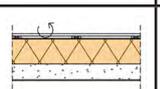
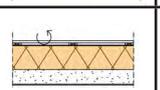
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voilages	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à lés ouverts															
Système A : TUILES DE BETON	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	-	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E2	28 ¹	-	30	E2	30	E2	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						19 ¹	E2	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*				19 ²	-	25 ²	-	23 ²	-	25	E2	27 ²	-	29	E2	29	E2
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)						16	.3	23	.3	21	.3	23	E1	25	-	28	E1	28	E1
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)						16	.3	23	.3	21	.3	23	E2	25	-	27	E2	27	E2
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*					18 ²	-	24 ²	-	22 ²	-	24	E2	26 ²	-	28	E2	28	E2

A - climat III

Remarques

- 1 Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- 2 Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- 3 La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Système A : TUILES METALLIQUES	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	E2	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						16	E2	23	-	21	-	23	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*				19 ²	E2	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)						16	E1	23	.3	21	.3	23	E3	25	-	28	E3	28	E3
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)						16	E2	23	.3	21	.3	23	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*					18 ²	E2	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3

A - climat III

Remarques

- 1 Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- 2 Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- 3 La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

SYSTÈME B

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voilages	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts															
Système B : PLAQUES FIBRES-CIMENT AUTOPORTANTES VENTILÉES EN SOUS-FACE	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	-	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E2	28 ¹	-	30	E2	30	E2	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						16	-	23	-	21	-	23	E2	25	-	27	E2	27	E2
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*				*					19 ²	-	25 ²	-	23 ²	-	25	E2	27 ²	-	29	E2	29	E2
	Lourde		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*				18 ²	-	24 ²	-	22 ²	-	24	E2	26 ²	-	28	E2	28	E2	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)					16	-	23	-	21	- ³	23	E1	25	-	28	E1	28	E1	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)					16	-	23	-	21	- ³	23	E2	25	-	27	E2	27	E2	

Remarques

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Système B : PLAQUES METALLIQUES AUTOPORTANTES VENTILÉES EN SOUS-FACE	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	E3	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)					16	E3	23	-	21	-	23	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*				*				19 ²	E3	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*				*			18 ²	E3	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)				16	E3	23	-	21	- ³	23	E3	25	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)				16	E3	23	-	21	- ³	23	E3	25	-	27	E3	27	E3	

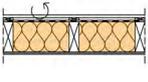
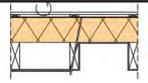
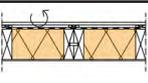
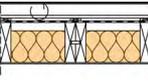
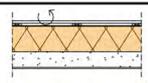
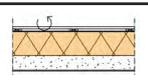
Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

SYSTÈME C

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts															
Système C : FEUILLES METALLIQUES VENTILÉES EN SOUS-FACE	Légère		- sous-toiture - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*				*				19 ¹	E3	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			(*)						19 ¹	E3	26 ¹	-	23 ¹	-	26	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3
			- sous-toiture : caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*					*				19 ²	E3	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- sous-toiture avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*					*			18 ²	E3	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			(*)					16	E3	23	-	21	. ³	23	E3	25	-	28	E3	28	E3	
			- sous-toiture : géotextile - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			(*)					16	E3	23	-	21	. ³	23	E3	25	-	27	E3	27	E3	

Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois. Mise en oeuvre de CG déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

SYSTÈME D

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé															
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à lés ouverts															
Système D : MEMBRANES EN PVC	Légère		- caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*			*					19 ¹	E3	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3	
			- caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*			*						18 ¹	E3	25 ¹	-	22 ¹	-	25	E3	27 ¹	-	29	E3	29	E3
	Lourde		- isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			*						16	E3	23	-	21	-	23	E3	26	-	28	E3	28	E3
			- isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			*						16	E3	23	-	21	-	23	E3	25	-	27	E3	27	E3

Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, PS, PSE ou MV), attention au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de MV déconseillée.
- La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Système D : MEMBRANES SYNTHÉTIQUES AUTRES QUE PPVC ET BITUMINEUSES	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB		
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à lés ouverts															
	Système D : MEMBRANES SYNTHÉTIQUES AUTRES QUE PPVC ET BITUMINEUSES	Légère		- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*			*					19 ¹	E3	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E3	28 ¹	-	30	E3	30	E3
			- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*			*						18 ¹	E3	25 ¹	-	22 ¹	-	25	E3	27 ¹	-	29	E3	29	E3
Lourde			- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			*						16	E3	23	-	21	-	23	E3	26	-	28	E3	28	E3
			- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			*						16	E3	20	E1	21	-	23	-	25	-	27	E3	27	E3

Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

- Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, PS, PSE ou MV), attention au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de MV déconseillée.
- Rappels (étanchéité bitumineuse) :**
- Les mousses EPS et XPS ne peuvent pas être posées directement sous un revêtement d'étanchéité bitumineuse (cf. norme NBN B46-401).
 - Les ouvrages métalliques d'évacuation des eaux de toiture peuvent se corroder lors de l'emploi de membranes bitumineuses sans protection UV [CSTC-95-2].

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé																
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB			
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur			
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts																
Système D : BARDEAUX BITUMES SOUDES	Légère		- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*			*						19 ¹	E3	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E3	27 ¹	-	29	E3	29	E3	
			- support de toiture caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*			*							18 ¹	E3	24 ¹	-	22 ¹	-	24	E3	26 ¹	-	28	E3	28	E3
	Lourde		- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			*							16	E3	23	-	21	- ³	23	E3	25	-	28	E3	28	E3
			- support de toiture - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			*							16	E3	23	-	21	- ³	23	E3	25	-	27	E3	27	E3

Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, PS, PSE ou MV), attention au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de MV déconseillée.

³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé																
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB			
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	Rigide		Souple			épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur					
								fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts																
Système D : PLAQUES DE FIBRES-CIMENT AUTOPORTANTES NON VENTILEES EN SOUS-FACE	Légère		- plaque - isolant - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			*							19 ¹	-	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E2	27 ¹	-	29	E2	29	E2
			- plaque - isolant rigide - (zone d'équipement) - 2 plaques de plâtre	*			*							16	-	22	-	20	-	22	E2	24	-	27	E2	27	E2
			- plaque - caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*			*							18 ²	-	25 ²	-	22 ²	-	25	E2	27 ²	-	29	E2	29	E2
			- plaque - caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*			*							18 ²	-	24 ²	-	22 ²	-	24	E2	26 ²	-	28	E2	28	E2
	Lourde		- plaque - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			*							16	- ³	22	- ³	20	- ³	22	E1	25	-	27	E1	27	E1
			- plaque - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			*							16	- ³	22	- ³	20	- ³	22	E2	24	-	26	E2	26	E2

Remarques

¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.

² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en oeuvre de CG déconseillée.

³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériaux de couverture	Hypothèses										Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolant pour $U \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et du type de pare-vapeur, selon le matériau isolant utilisé																
	Structure	Type de toiture possible	Composition de la toiture	Support de toiture			Sous-toiture					PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB			
				aucun	multiplex	voliges	aucune (ou géotextile)	fibres-ciment	multiplex	micro-perforé	bitume à liés ouverts	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur	épaisseur (cm)	pare-vapeur		
Système D : PLAQUES METALLIQUES AUTOPORTANTES NON VENTILÉES EN SOUS-FACE	Structure		- tôle (+ écailles) - isolant - 2 plaques de plâtre	*			*						19 ¹	E3	25 ¹	-	23 ¹	-	25	E3	27 ¹	-	29	E3	29	E3	
			- tôle (+ écailles) - isolant rigide - espace technique - 2 plaques de plâtre	*			*							16	E3	22	-	20	-	22	E3	25	-	27	E3	27	E3
			- tôle (+ écailles) - caisson avec isolant sur l'épaisseur totale - plaque fibro-silicate	*			*							18 ²	E3	25 ²	-	23 ²	-	25	E3	27 ²	-	29	E3	29	E3
			- tôle (+ écailles) - caisson avec isolant sur l'épaisseur partielle - plaque fibro-silicate	*			*							18 ²	E3	24 ²	-	22 ²	-	24	E3	26 ²	-	28	E3	28	E3
	Lourde		- tôle (+ écailles) - isolant rigide - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage	*			*							17	E3	23	-	21	⁻³	23	E3	26	-	28	E3	28	E3
			- tôle (+ écailles) - isolant rigide - hourdis béton léger - enduit de plafonnage	*			*							16	E3	23	-	21	⁻³	23	E3	25	-	28	E3	28	E3

Remarques

ATTENTION : Les résultats ci-dessus correspondent strictement au climat II.

¹ Lors de l'utilisation d'isolants rigides (PUR, EPS, XPS ou CG), attention au calage de l'isolant contre les gîtes de versant (par une injection éventuelle de mousse de PUR), afin d'éviter tout courant de convection autour des panneaux.
Mise en œuvre de CG déconseillée.

² Idem : veiller au calage de l'isolant contre la structure traversante en bois.
Mise en œuvre de CG déconseillée.

³ La pose d'un pare-vapeur de type E1 entre l'isolant et la structure en béton reste recommandée, pour limiter la migration de l'humidité de construction au travers de l'isolant.

La récente Note d'Information Technique 251 du CSTC consacrée à l'isolation thermique des toitures inclinées propose une méthode de choix de la barrière d'étanchéité à l'air et à la vapeur (μ), qui tient compte :

- du type de sous-toiture (selon sa perméabilité à la vapeur d'eau) ;
- de la classe de climat intérieur du local ;
- et du niveau d'étanchéité à l'air des matériaux constituant la toiture.

OBJECTIFS POURSUIVIS ET MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU DÉTAIL

ETUDE DE L'ESQUISSE

CHOIX, pour tous les éléments de la toiture :

- couverture extérieure et finition intérieure (matériau, teinte, texture de la couverture et de la finition intérieure)
- zone d'isolation thermique : prédimensionnement
- encombrement total

SELON :

- contraintes urbanistiques
- durabilité, entretien
- structure
- esthétique
- cohérence mutuelle et compatibilité de jonction
- etc.

TEST DE COHÉRENCE

ET DE COMPATIBILITÉ

=> **SOLUTION 1**

ETUDE DE L'AVANT-PROJET

Identification et conception des noeuds

ADAPTATION DES CHOIX => **SOLUTION 1'**

PROJET D'EXÉCUTION

PRÉCISION DES DÉTAILS

Intégration des matériaux complémentaires pour l'isolation thermique, l'étanchéité, etc.

ADAPTATION DES SOLUTIONS

+ INFOS SUR LA RÉALISATION,

CAHIER DES CHARGES, ETC. => **SOLUTION 1''**

La méthodologie proposée ici vise à obtenir une qualité technique et plus spécifiquement thermique, de la conception et de la réalisation de la toiture inclinée.

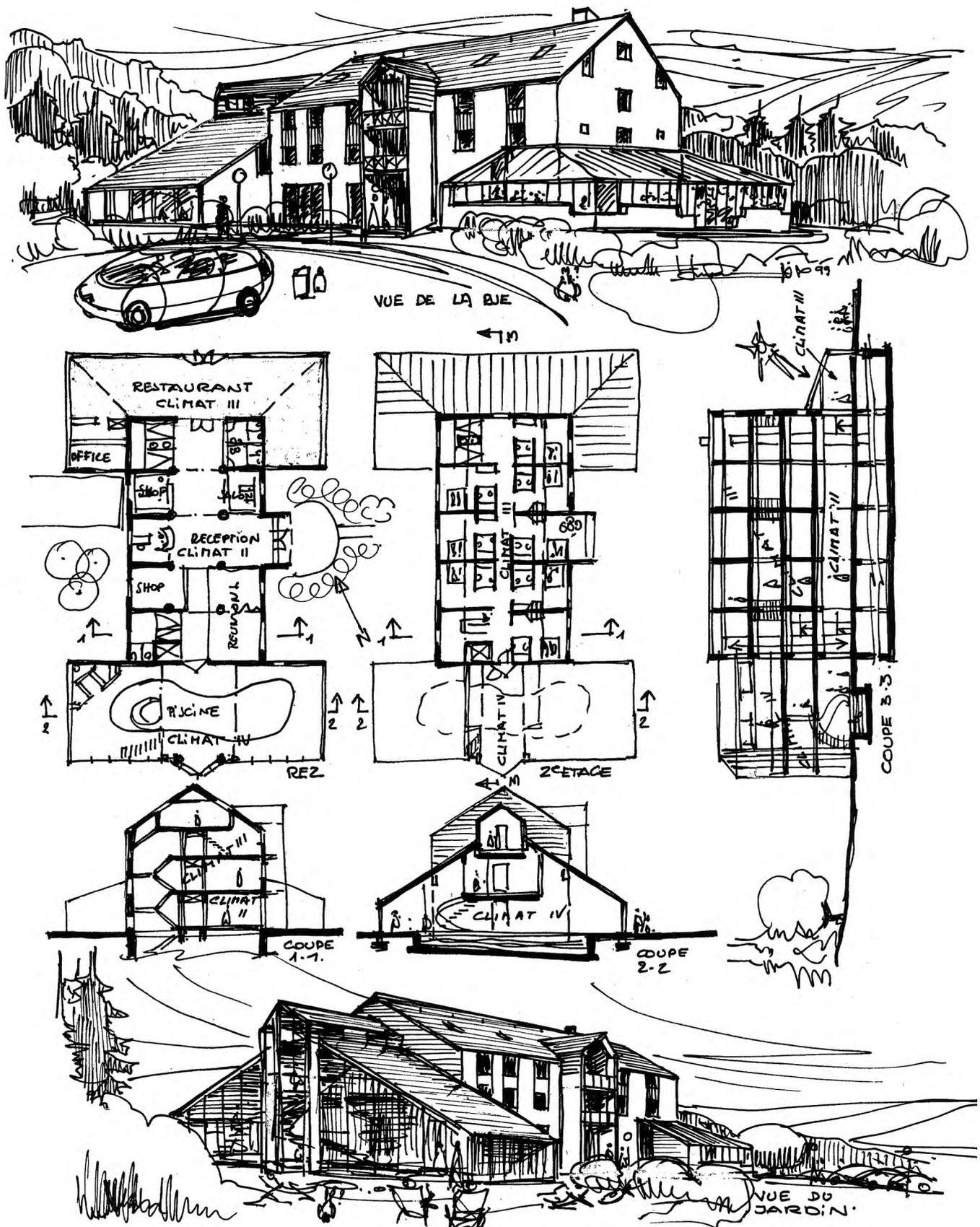
La démarche proposée sera illustrée par quelques exemples basés sur un bâtiment.

Ses grandes lignes s'établissent comme suit :

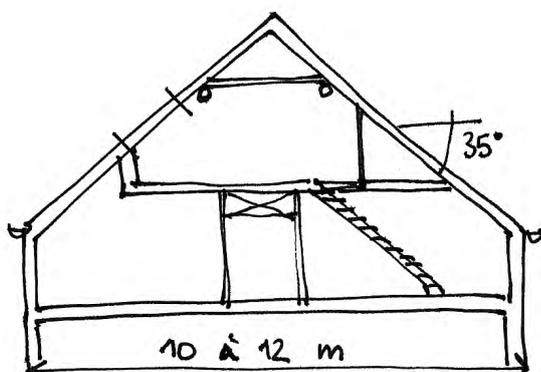
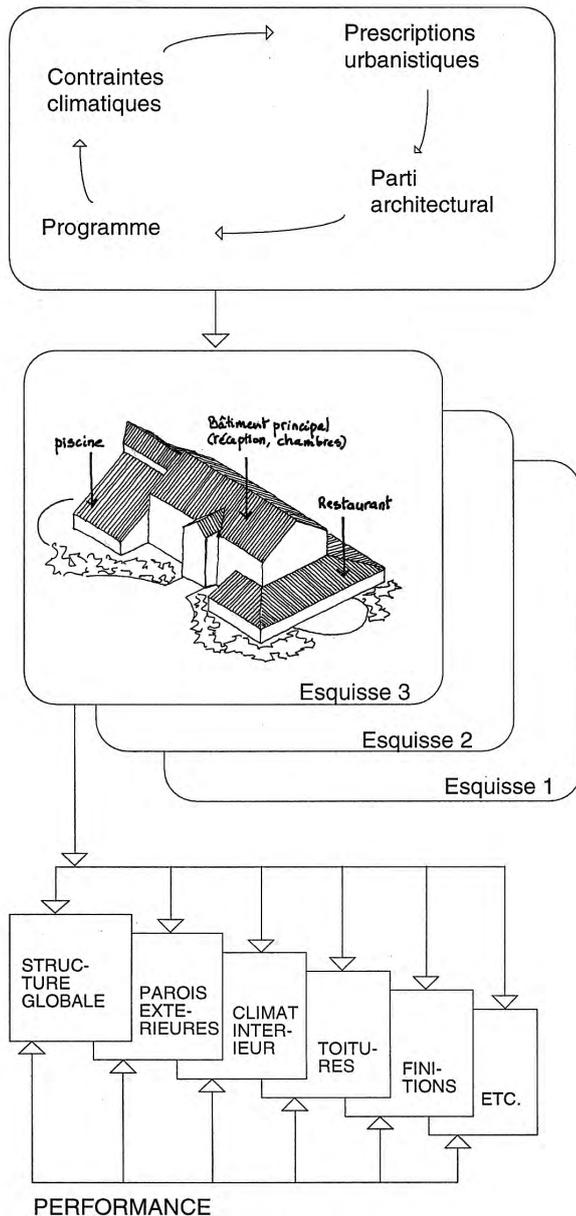
- 1) Définition des données issues de l'esquisse et des contraintes à respecter.
- 2) Critères de choix de la composition des différentes parois extérieures :
 - les critères de la peau extérieure en terme de matériau de couverture (ou de surtoiture) et les critères relatifs à la finition intérieure ;
 - les critères de choix du système de toiture (A, B, C ou D) et de sa composition, en cohérence avec la structure porteuse ;
 - les critères hygrothermiques pour le prédimensionnement de l'épaisseur d'isolation thermique et du pare-vapeur complémentaire éventuel, selon le type d'isolant ;
 - les critères de cohérences :
 - aux jonctions des parois ;
 - aux trémies éventuelles à pratiquer ;
 - aux particularités volumétriques de l'esquisse.
- 3) Ces critères sont à préciser et à appliquer de façon progressive, comme schématisé ci-contre :
 - dès l'esquisse ;
 - au stade de l'avant-projet ;
 - au projet d'exécution.
- 4) Traduction de ces critères en terme de prescriptions ou de points à contrôler :
 - en phase de conception : cahier des charges ;
 - en phase d'exécution : chantier et réception.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE



LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



Soit, à titre d'exemple, le programme architectural d'un petit hôtel, comprenant :

- au rez-de-chaussée : réception, magasins, restaurant, piscine;
- à l'étage : mezzanine surplombant la piscine et chambres (dont certaines en duplex, engagées dans la toiture).

LE CHOIX DE PEAUX EXTÉRIEURES DE TOITURES

L'ensemble du bâtiment de cet hôtel s'inscrit dans un contexte urbanistique et paysager tel que les toitures en pente sont privilégiées, tant par une logique de réponse aux conditions climatiques régionales, que par une volonté d'intégration dans le contexte existant.

Ainsi, le volume principal a-t-il été conçu avec une pente de toiture nécessitée par la couverture traditionnelle en écailles d'ardoises naturelles. Une pente de 35° a été choisie pour permettre une occupation intéressante des combles. Ceci correspond par ailleurs aux prescriptions urbanistiques locales qui imposent une toiture de 30 à 40° pour les volumes principaux.

Il est donc décidé de recourir à une peau extérieure de toitures en ardoises naturelles pour le volume de l'hôtel, du porche et pour la petite toiture centrale de la piscine.

Par contre, la salle de restaurant s'ouvrant vers le paysage sera traitée en appentis.

Son inclinaison sera limitée de façon à s'inscrire en dessous des allèges des fenêtres du premier étage, et pouvoir réaliser un raccord parfaitement étanche entre le mur et la rive haute de la toiture de l'appentis.

Après vérification que les prescriptions urbanistiques permettent ce type de pente pour les volumes secondaires (ou après une demande de dérogation), il est décidé de choisir une peau extérieure en zinc-cuivre-titane à joints debout, de façon à créer un rythme de lignes de pente compatible avec les supports des parties vitrées.

La totalité de l'ensemble de ces peaux extérieures de toitures est cohérente, d'autant que les accessoires de la couverture en ardoises peuvent se réaliser en zinc également.

Le cuivre aurait pu être choisi, tant pour l'appentis, que pour les accessoires. Mais le cuivre nécessitant un coût légèrement supérieur et une coloration de peau différente, le zinc prépatiné lui a été préféré.

D'un point de vue hygrique, on a, en principe, 3 types de climats dans ce projet :

- le climat II : réception, échoppes ;
- le climat III : chambres et restaurant ;
- le climat IV : la piscine.

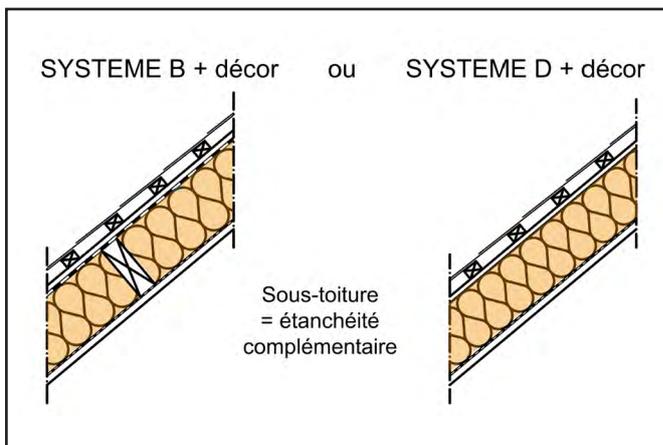
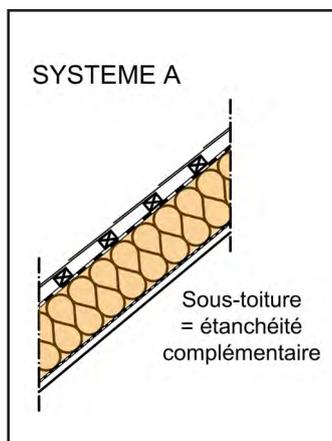
CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : BÂTIMENT PRINCIPAL

Le choix de la peau extérieure et ses conséquences sur le choix d'un système de toiture

Le matériau apparent est choisi : ardoises naturelles.

Son support direct consiste en liteaux et contreliteaux, posés au-dessus d'un matériau de sous-toiture.

Ce principe de mise en oeuvre des ardoises et d'évacuation des eaux peut s'obtenir avec deux principes de sous-toiture :



Etude de la zone isolante Evaluation des systèmes possibles

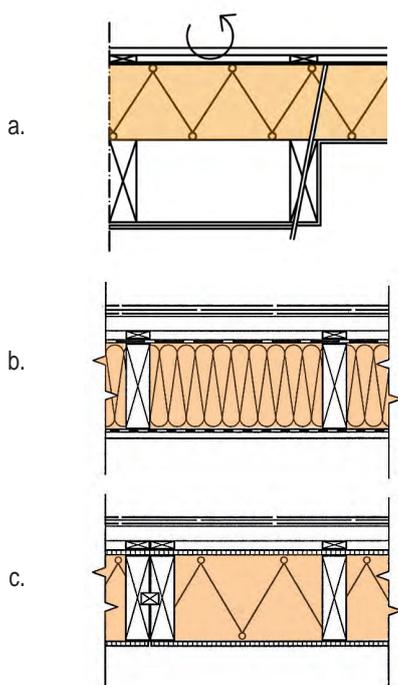
Le principe de base est d'éviter tout pont thermique.

Dans le cas du système A, sous la sous-toiture, ou incluant celle-ci, on peut choisir :

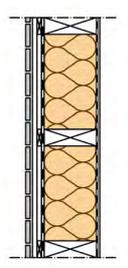
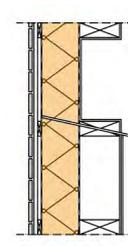
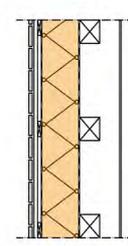
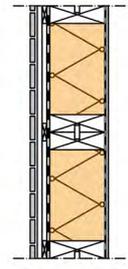
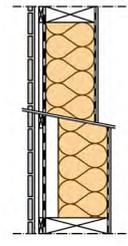
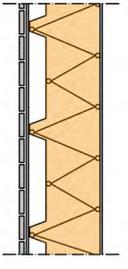
- a. soit une couche isolante rigide autoportante en "voligeage" dite communément "sarking", entre les contreliteaux et la structure;
- b. soit une couche isolante posée entre des pannes chevrons en bois ou des chevrons en bois, avec une étanchéité parfaite à l'air;
- c. soit une couche isolante combinée avec d'autres matériaux de structure peu conducteurs, tels que le bois et ses dérivés.

Dans ces trois éventualités, si la sous-toiture est en tôle, et si, en plus, on empêche la ventilation, ou si la couche isolante constitue l'âme d'un panneau sandwich à ailes métalliques, on est en présence du système [D + écailles en décor] (voir p. 45).

Dans ces trois mêmes éventualités, on pourrait envisager le système [B + écailles en décor], pour autant qu'une sous-toiture supplémentaire soit apposée sous la tôle.



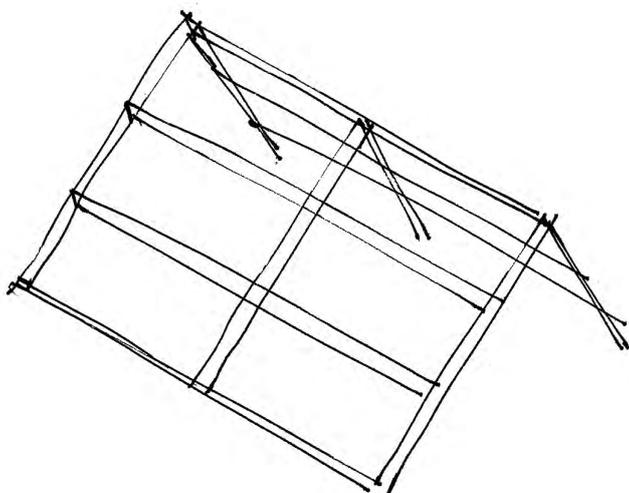
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

SYSTÈMES A, B					SYSTÈME D	
TYPE DE TOIT POSSIBLE						
FACTEURS DE SÉLECTION DONT DÉPENDENT LES CHOIX DE STRUCTURE ET DE TYPE DE TOITURE						
Éviter les ponts thermiques	1 Le bois est le seul matériau de structure isolant sur cette épaisseur. Coupe thermique efficace	2 Coupe thermique totalement continue.	3 Coupe thermique totalement continue.	4 Coupe thermique efficace.	5 / 5' Coupe thermique efficace.	6 Coupe thermique totalement continue.
Liaison entre zone de couverture et structure porteuse	Idem 1. L'écartement des contre-lattes doit être compatible avec l'écartement des pannes-chevrons.	Idem 1.	Idem avec les chevrons, mais la portée entre les poutres principales doit être réduite.	Le panneau étant autoportant, la fixation et l'écart des contre-lattes se jouent sur la face supérieure.	Idem 1 pour 5. Idem 4 (ou 1) pour 5'.	Les parties hautes (extrados) des ondes des tôles supérieures doivent correspondre à un écart compatible avec les liteaux de fixation dans la tôle supérieure.
Type d'isolant choisi	Laine minérale (26 cm) : on place entre les pannes-chevrons.	Isolant rigide d'une épaisseur de l'ordre de 16 cm (PUR) à 25 cm (CG).	Isolant rigide d'une épaisseur de l'ordre de 16 cm (PUR) à 25 cm (CG).	Isolant rigide de très grande compacité et peu encombrant.	Idem 4.	Idem 4 et 5. Plus grande compacité.
Position par rapport à la structure	Structure brute non vue, bien protégée par les finitions. Système très compact.	Chapente visible rabotée, donc plus chère. Au total, toiture plus épaisse en terme d'espace accessible.	Au total, la charpente (principale + secondaire) est plus chère. Caractère " traditionnel ". Les chevrons apparents sont également plus chers.	Finition intégrée, en sous-face du caisson (choix de différentes finitions possibles).	Idem 4.	Voir les finitions possibles.
Intégration de l'isolant dans le système structurel	Système très compact.	Système très compact.	Les chevrons apparents sont également plus chers.	Isolant structure avec aile en matériau à base de bois ou de fibres.	Isolant structure (en partie). Aile en matériau à base de bois ou de fibres.	Isolant structure avec ailes en acier ou en aluminium.
Portées	Portée de l'ordre de 2,5 à 3 m : gîtes de versant tous les 40 cm. Si portée de 3 à 4 m : gîtes de versant 38 x 125/150 tous les 30 cm.	Portées de l'ordre de : idem 1.	Portées de l'ordre de : idem 1. Portées de 1,4 à 1,5 m en ce qui concerne les chevrons.	Portée : dépend de l'épaisseur de l'isolant. De l'ordre de 2 m pour un panneau avec 18 cm d'épaisseur de PUR (pour U ≤ 0,2 W/m²K).	Portée : dépend de l'épaisseur de l'isolant. Épaisseur d'isolant : idem 4. Avec 3 ou 4 raidisseurs : portée de 2,5 à 3 m.	Très grandes portées : dépendent de l'épaisseur de l'isolant (160 mm min. pour U ≤ 0,2 W/m²K). Portée de 4,3 m sur 3 appuis pour charges de 125 daN/m².

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Performance feu demandée Rf 1/2 h	Laine minérale + 2 plaques de plâtre (= 19 mm ép.) à joints alternés ou plaques de fibro-silicate pour Rf 1/2 h, à réaliser selon procès-verbal d'essai.	La structure en bois n'est pas protégée : elle doit être renforcée.	Idem 2. Mais encore plus fragile, vu les faibles sections des chevrons.	Cette technique ne présente pas, actuellement, sur le marché, de panneau Rf. Possibilité de fixation de plaques de plâtre (ép. 19 mm) pour Rf 1/2 h. En tenir compte pour les charges reprises.	Il faut choisir les panneaux Rf 1/2 h. Ils sont peu nom-breux et les fabrications sont plus limitées.	Cette technique ne présente pas, actuellement, sur le marché, de panneau Rf. Possibilité de fixation de plaques de plâtre (ép. 19 mm) pour Rf 1/2 h. En tenir compte pour les charges reprises.
Réaction au feu	A2 : nécessité de prendre l'isolant en laine minérale	Si la finition et la protection (en plaques de plâtre ou de fibro-silicate) sont en dessous de la structure, o.k., mais cette disposition augmente l'épaisseur totale de la toiture.	Idem 2 en un peu moins épais.	Possibilité de panneaux en laine de roche (A0) ou PUR (A1).	Finition en fibro-silicate ou en multiplex. Isolant en laine de roche (A0) ou en PUR (réaction A1).	Possibilité de panneaux en laine de roche (A0) ou PUR (A1).
Finition et zone d'équipement éventuelle	Finition en plâtre à peindre. Réaction A1 sans problème. Un espace d'équipement est possible entre la finition et le pare-vapeur.	Si la finition est sous la structure, l'espace technique est facilement obtenu ; mais la toiture est épaisse. Difficulté de réaliser la finition entre les pannes.	Idem 2, en un peu moins épais.	Un espace technique est possible entre le panneau et la finition de protection Rf.	Si le panneau est fourni fini, aucun espace technique n'est possible.	Pas d'espace technique possible sauf par l'interposition d'un espace entre finition Rf et panneau.
Corps de métier requis	Corps de métier : - charpentier ; - couvreur.	Idem 1.	Idem 1.	Idem 1.	Idem 1.	Corps de métier : couvreur = poseur de toiture en tôle
CONCLUSIONS						
Points forts	Système traditionnel, très satisfaisant pour l'ensemble des critères.	Coupure thermique totalement continue.	Coupure thermique totalement continue.	Coupure thermique totalement continue. Rapidité d'exécution.	Performance Rf o.k. avec certitude. Plus de sécurité avec de la laine minérale dans le panneau. Rapidité d'exécution.	Coupure thermique totalement continue. Longues portées possibles. Rapidité d'exécution et couverture en place directement. Demande une connaissance technique complémentaire.
Points faibles	Pas de point faible particulier	Trop grande épaisseur de toiture et finitions trop compliquées.	Idem 2 avec plus de vermes intermédiaires.	Réaction au feu satisfaisante si PUR ou si LM (= solution 5').	Pas de point faible particulier.	
Types retenus	OK	(solution non choisie)	(solution non choisie)	(solution rejetée)	OK	OK

Considération de structure et de finition et facteurs de sélection d'une solution de toiture



Vu la modulation du plan des étages par des murs de refends séparant les chambres et réunissant les performances d'isolation acoustique et de portance, la structure principale de la toiture de l'hôtel peut être conçue avec des poutres principales longitudinales sur plusieurs appuis.

La structure des pans de toiture va dépendre de différents facteurs.

La méthode de conception consiste à confronter différentes solutions de composition globale du système de toiture à différents critères de sélection.

Dans notre cas le tableau des pages précédentes en est une démonstration, non limitative. Par exemples : les solutions 1 à 4 peuvent s'interpréter également dans le cas du système [B + écailles], en-deçà de la sous-toiture considérée alors comme sous-toiture secondaire.

Les trois types de zone isolante retenus associant une fonction de structure secondaire, chevrons ou panneaux composites conviennent bien, en principe, à une pose similaire sur la structure principale définie au préalable :

- Les portées de l'ordre de 1,5 m à 4,3 m entre appuis sont tout à fait possibles pour des gîtes de versant ou des panneaux composites en métal. Les portées sont moindres dans le cas des chevrons ou de panneaux autoportants à structure bois. Cependant, la reprise des poussées au vide par la structure du plafond du duplex demande plus d'attention pour la solution 6 avec les panneaux composites, mais reste possible ;
- L'épaisseur totale est pratiquement la même et les performances identiques.

Les contraintes dimensionnelles et les limites éventuelles dans les choix des finitions et des raccords avec les autres parois du bâtiment sont ainsi circonscrites.

Nota bene : selon les normes de base en matière de prévention incendie, le bâtiment projeté est classé bâtiment bas (BB, $H < 10$ m) de plus d'un niveau. En conséquence, sauf si la toiture est protégée du reste du bâtiment par un plafond EI 30, la structure de la toiture doit présenter une stabilité au feu de 1/2 heure (EI 30).

Cela fournit l'information nécessaire et suffisante à ce stade de l'avant-projet.

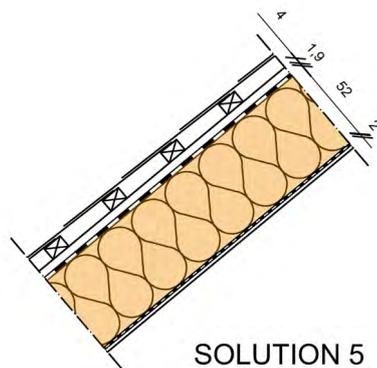
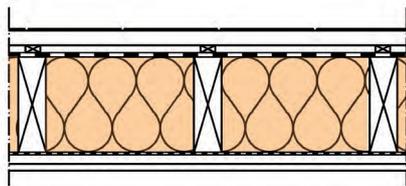
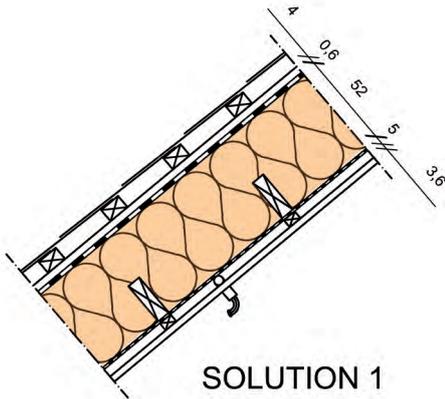
Aucune des solutions retenues n'influence différemment la suite de l'étude du projet architectural.

Une vérification des solutions retenues au tableau comparatif des pp. 70 et 71 est cependant intéressante.

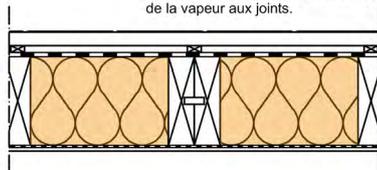
H = hauteur comprise entre

- le niveau de la voirie la plus basse utilisable par les véhicules du service d'incendie
- et le niveau du dernier étage sous toiture.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



! Dès le climat III, collages à la colle PUR pour éviter le passage de la vapeur aux joints.



Solution n°1 :

- zone de couverture :
 - ardoises naturelles 25 x 40 cm + lattes et contre-lattes (classe A1)
 - sous-toiture capillaire en fibres de bois ép. 3 mm
- zone isolante : laine de roche ép. 260 mm ($U \leq 0,20$ W/(m².K) + pare-vapeur E3 + bois (résineux) 38 x 125 mm tous les 40 cm
- zone de structure : gîtes de versant en bois résineux traité, de dimensions 38 x 125 mm, tous les 40 cm + étrésoilage (non traversant)
- zone d'équipement : lattis permettant le réglage de la partie inférieure de la toiture, soit lattis en bois, soit U en acier galvanisé (meilleur pour l'acoustique)
- zone de finition anti-feu : plaque inférieure en plâtre ép. 18 mm (voir procès-verbal ou rapport officiel des Services de Prévention Incendie).

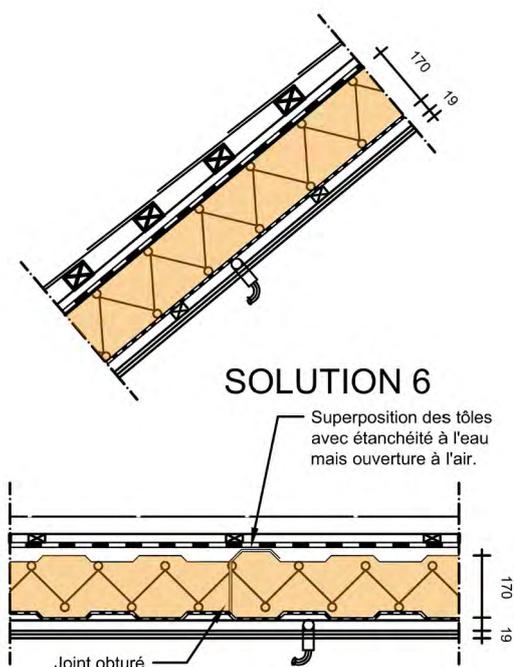
Solution n°5 :

- zone de couverture :
 - ardoises naturelles 25 x 40 cm + lattes et contre-lattes (classe A1)
 - sous-toiture = plaque supérieure du panneau composite : multiplex résistant à l'eau
- zone isolante : les plaques et les structures traversantes constituent un caisson porteur :
 - plaque multiplex ép. 9,5 mm en face supérieure
 - laine de roche (40 kg/m³, $\lambda = 0,050$ W/(m.K) ép. 260 mm
 - pare-vapeur = film d'aluminium plastifié sur 2 faces (type E3), collé sur toute la largeur du panneau
 - 4 nervures longitudinales en résineux de 56 x 140 mm
 - plaque de fibres-ciment ép. 10 mm en face inférieure
- zone de structure : combinée à la zone isolante
- zone d'équipement : néant
- zone de finition anti-feu : plaques inférieures du caisson en fibres-ciment ép. 10 mm à peindre (voir procès-verbal ou rapport officiel des Services de Prévention Incendie). Une finition complémentaire permettant un espace technique peut être ajoutée.

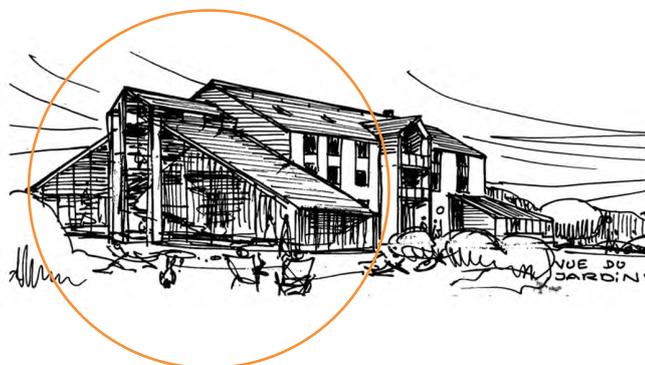
Solution n°6 :

- zone de couverture :
 - ardoises naturelles 25 x 40 cm + lattes et contre-lattes (classe A1) en surtoiture
 - "sous"-toiture = tôle d'acier galvanisé prélaqué (ép. 0,63 mm) = face supérieure du panneau composite
- zone isolante : les plaques nervurées solidarisées par l'isolant constituent un caisson porteur :
 - mousse rigide adhérente de PUR sans CFC injectée en continu entre les 2 parements métalliques; le coefficient $U \leq 0,2$ W/m²K est obtenu avec 120 mm d'épaisseur de PUR, sur la base de la valeur certifiée $\lambda_D = 0,025$ W/mK, au contraire de l'épaisseur de 180 mm qui était recommandée au tableau de la p. 64, utilisant la valeur normalisée $\lambda_{U_i} = 0,035$ W/mK

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



Au stade de l'esquisse, la valeur μ d de la tôle intérieure est estimée à 15 m (E2). Si les joints sont colmatés et les rives particulièrement soignées, on pourrait obtenir une meilleure étanchéité à la diffusion de vapeur d'eau, équivalente à un pare-vapeur de type E3 ou supérieur. Par prudence, on considérera, dans le cas présent, qu'un pare-vapeur complémentaire de type E3 est collé directement sous la tôle inférieure.



- pare-vapeur = tôle inférieure (ép. 0,5 mm), à compléter éventuellement, notamment aux joints et aux rives
- zone de structure : les 2 tôles nervurées en acier galvanisé prépeint, adhérant à une âme en mousse de PUR, constituent un panneau composite porteur. Aucun contact n'existe entre les 2 tôles, ce qui supprime tout pont thermique par la structure
- zone d'équipement : possible entre la tôle inférieure et la couche de finition et de protection au feu
- zone de finition et de protection au feu : plaques de plâtre (ép. : $2 \times 9^5 = 19$ mm) vissées et alternées, sur un profil d'écartement (permettant une zone d'équipement) ou directement sur les tôles (voir procès-verbal ou rapport officiel des Services de Prévention Incendie)

Ces descriptifs montrent que l'on peut obtenir, de 3 façons, une toiture avec une peau extérieure en écailles et une finition intérieure à peindre.

Les 3 solutions offrent un support qui permettra la pose aisée d'un pare-vapeur de type E3.

Ces 3 solutions respectent, par ailleurs, les autres performances demandées à la toiture, à savoir :

- la stabilité et la résistance aux charges climatiques et d'entretien ;
- un coefficient de transmission thermique $U \leq 0,20$ W/(m².K) et un comportement correct à la migration de vapeur d'eau ;
- un affaiblissement acoustique suffisant.

LE CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : PISCINE

Le volume de la piscine comporte 2,5 niveaux (pour fournir un espace suffisant au-dessus du niveau d'eau) et un volume central surélevé, à versants, pour marquer le raccord avec le bâtiment principal. Ses murs extérieurs comportent de larges baies vitrées, alternant avec des trumeaux de maçonnerie.

Sa toiture comporte également des ardoises naturelles en tant que matériau de couverture.

Dans cette partie de l'ouvrage, nous focaliserons volontairement la démarche conceptuelle aux aspects de transfert de vapeur d'eau, spécialement importants dans le cas de la toiture abritant une piscine, où le climat hygrothermique intérieur est sévère.

RÉFLEXIONS PRÉLIMINAIRES DANS LE CAS PARTICULIER DE LA PISCINE

S'il est fait usage de chlore pour traiter l'eau, on ne peut totalement éliminer le risque de présence de chlore dans la vapeur d'eau atteignant les toitures, le chlore pouvant alors attaquer les matériaux métalliques (en ce compris les armatures de béton armé) et provoquer leur ruine. Au stade de l'esquisse, le système de traitement de l'eau n'est

évidemment pas encore déterminé avec certitude; il serait donc plus prudent d'exclure les matériaux de couvertures métalliques, les finitions intérieures métalliques ou les dalles en béton armé.

A moins que : on puisse aisément séparer les matériaux métalliques de l'ambiance intérieure, par un pare-vapeur continûment posé, par exemple par l'utilisation de plaques de plâtre de 18 mm d'épaisseur avec une feuille d'aluminium incorporée (ép. 30 microns) offrant un μd de 35 m (E3) et assurant la résistance au feu. Les vapeurs chlorées ne peuvent alors atteindre les matériaux métalliques.

Si, au sein de la paroi de toiture, des noeuds constructifs non conformes existent, refroidissant des zones précises et limitées, le climat intérieur très humide et très chaud, donc à forte pression partielle de vapeur d'eau, crée les conditions nécessaires à ce que la vapeur d'eau aille se condenser à ces endroits. En classes de climat I, II ou III, les condensations qui en résultent sont peu importantes et de toute façon temporaires. Dans les conditions particulièrement sévères propres au climat IV, la vapeur d'eau étant produite en permanence et en quantité importante, ce phénomène de condensation est également permanent.

Les gîtes de toiture, entre lesquels se dispose l'isolation, constituent des noeuds constructifs au sens littéral du terme. Les structures traversantes des caissons préfabriqués incorporant le matériau isolant sont dans la même situation. La plus extrême prudence pousserait ainsi à exclure les compositions de toiture faisant intervenir des gîtes de versant ou des caissons préfabriqués à structure traversante.

A moins que : cette extrême prudence se justifie dans le cas de structures métalliques qui peuvent, si l'on n'y prend garde, constituer des noeuds constructifs non conformes, même ponctuels, avec leurs conséquences fâcheuses. Par contre, le bois est beaucoup plus faiblement conducteur de la chaleur que le métal, ce qui réduit considérablement la gravité du noeud constructif, qu'il reste prudent de vérifier. D'autre part, la pose continue d'un pare-vapeur empêche toute migration de vapeur vers l'intérieur de la paroi. Même en présence de températures froides, s'il n'y a pas de vapeur d'eau, il n'y a pas de condensation...

REMARQUE

Les effets pervers induits par une ventilation en partie externe de la toiture (systèmes A, B et C) ont été évoqués, à plusieurs reprises, comme pouvant accroître la dépression naturellement existante au travers de la paroi. Il est dès lors préférable de toujours prévoir une sous-toiture rigide, qui empêche toute ventilation de ou vers les zones sous-jacentes.

On le voit : la barrière à la vapeur constitue une condition qui, si elle était souvent nécessaire en classes de climat II et III, devient indispensable en classe de climat IV.

CHOIX DU SYSTÈME DE TOITURE

Pour autant que les précautions explicitées ci-avant soient prises en matière de barrière à l'air et à la vapeur, aucun système ne peut être écarté, a priori.

Le matériau de couverture étant constitué d'ardoises naturelles, nous restreindrons l'exercice au seul système A, sachant que l'approche explicitée ci-après et les conclusions qui en résultent pourraient aisément s'appliquer aux systèmes [B + écailles] ou [D + écailles].

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

CHOIX DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION

La piscine étant un volume chauffé fortement et en permanence, il est d'autant plus recommandé de chercher à obtenir un coefficient de transmission aussi faible que possible : le choix de $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ se justifie d'autant, ici encore, afin de chauffer le volume aisément et à un coût énergétique modéré.

Dans cette hypothèse, le tableau de la p. 57 "Système A : Ardoises naturelles" est parfaitement applicable. En effet, le type de climat n'a aucune influence sur le coefficient de transmission. Selon le type de toiture, cela porte donc les épaisseurs nécessaires d'isolation thermique à : 16 à 19 cm de PUR ou 23 à 26 cm de EPS ou MW ou 21 à 23 cm de XPS ou 25 à 28 cm de CG ou 27 à 30 cm de CEL ou FB.

Il reste le choix du pare-vapeur, selon que la finition intérieure participe ou non à la résistance à la diffusion de vapeur d'eau et/ou à la résistance thermique de la toiture.

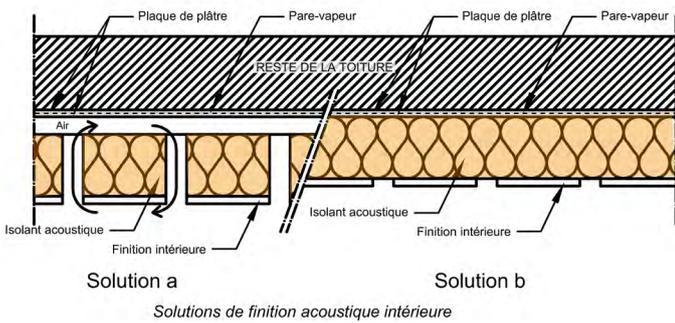
CHOIX DE LA FINITION INTÉRIEURE

Dans le projet de la piscine, la superficie importante de surfaces réverbérantes (plan d'eau, pourtours carrelés, vitrages des baies) fait en sorte qu'il est indispensable au confort acoustique, de faire de la finition intérieure de la toiture, une surface acoustiquement absorbante.

Sous la plaque de plâtre offrant la résistance au feu, on dispose un contre-gîtage d'une épaisseur de 25 mm, constituant un espace technique. L'espace technique est ainsi totalement décalé par rapport au pare-vapeur, ainsi protégé de toute lacération ou perforation accidentelle.

La finition intérieure peut s'envisager selon deux modes, illustrés sur la figure ci-dessus :

- ou bien on dispose la laine minérale directement au dos de la finition intérieure, ce qui signifie que l'air intérieur n'est pas refroidi avant de rencontrer la plaque de plâtre et le pare-vapeur;
- ou bien on cale, entre les contrelattes intérieures, un fond absorbant constitué d'une laine minérale de 1 à 2 cm d'épaisseur, suffisante en principe du point de vue acoustique; elle est cachée par un voile de verre noir opaque, la finition apparente (planches, par exemple) étant laissée ajourée. Attention : dans ce cas, l'isolant apposé contre la plaque de plâtre crée une chute de pression de vapeur d'eau, et cela avant de rencontrer le pare-vapeur; il est alors essentiel de vérifier que l'épaisseur choisie d'isolation acoustique maintient bien les conditions hygrothermiques internes à la toiture, suffisamment éloignées des conditions de condensation, pour éviter toute condensation interne. L'épaisseur du matériau isolant utilisé à des fins acoustiques est donc à limiter strictement.



Solution a

Solution b

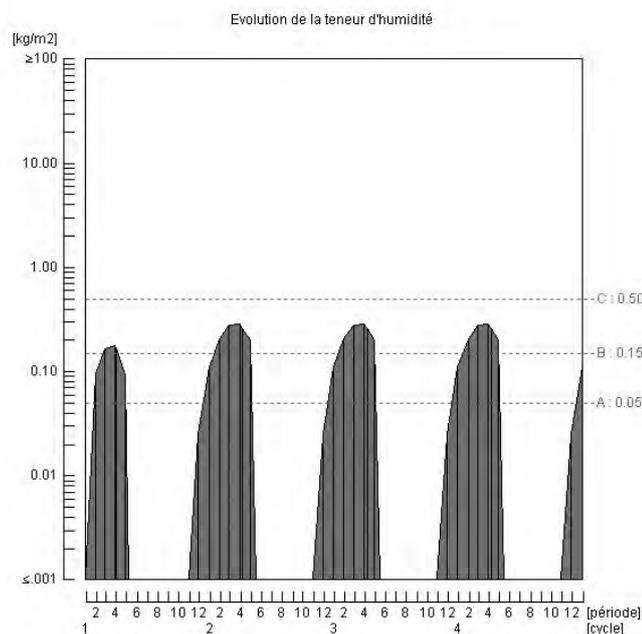
Solutions de finition acoustique intérieure

RÉSULTATS DE SIMULATIONS PAR GLASTA

En abscisse : le temps de la simulation, à savoir 4 années, soit 4 cycles de 12 mois (= période).

En ordonnée (échelle logarithmique) : la quantité de condensats produits, exprimée en kg/m^2 . Les limites A : $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$, B : $0,15 \text{ kg}/\text{m}^2$ et C : $0,50 \text{ kg}/\text{m}^2$ correspondent aux limites définies en p. 55.

Composition de toiture avec caissons remplis entièrement d'isolant (cellulose : CEL) + pare-vapeur E1.

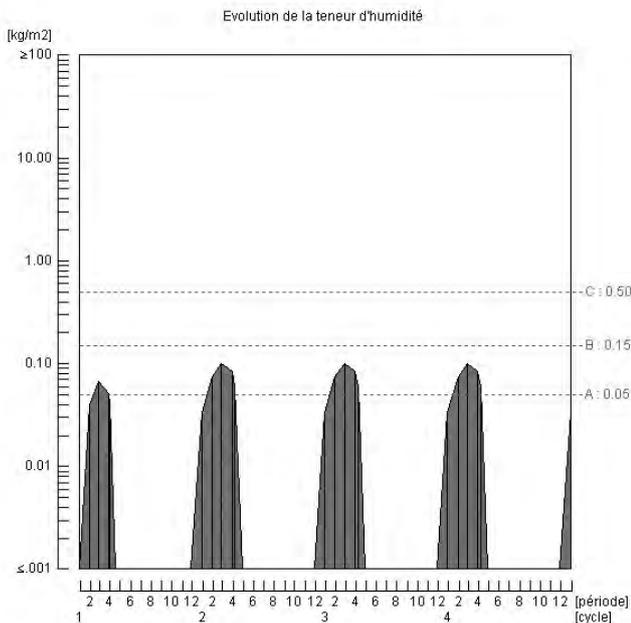


Le pare-vapeur E1 ne permet aucun séchage entre les saisons froides; la quantité de condensats ne cesse d'augmenter d'année en année : solution inadmissible.

SIMULATIONS RÉALISÉES POUR UNE TOITURE EN ARDOISES NATURELLES (SYSTÈME A)

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

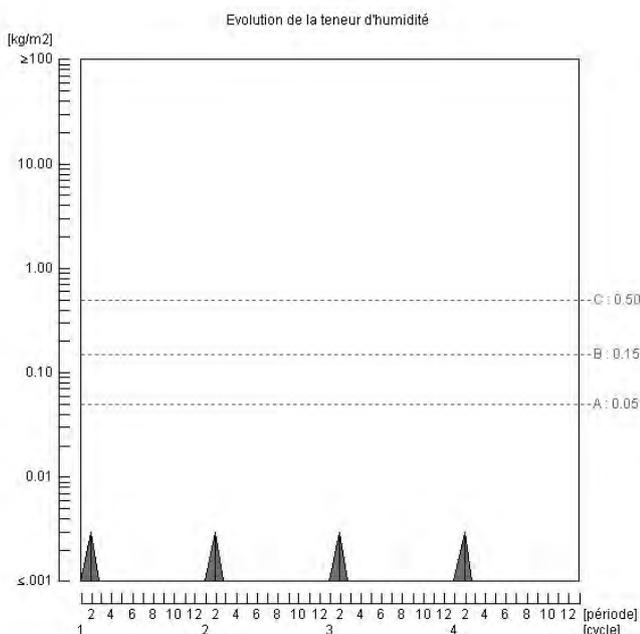
Composition de toiture avec caissons remplis entièrement d'isolant (cellulose : CEL) + pare-vapeur E2.



Avec le pare-vapeur E2, la quantité de condensats redevient nulle entre saisons froides : le séchage s'opère. Les quantités de condensats restent élevées (0,100 kg/m² max)..

SIMULATIONS RÉALISÉES POUR UNE TOITURE EN ARDOISES NATURELLES (SYSTÈME A)

Composition de toiture avec caissons remplis entièrement d'isolant (cellulose : CEL) + pare-vapeur E3.



Avec le pare-vapeur E3, la quantité de condensats accumulée annuellement devient extrêmement faible, à savoir 0,003 kg/m² max.

SIMULATIONS RÉALISÉES POUR UNE TOITURE EN ARDOISES NATURELLES (SYSTÈME A)

Dans les conditions climatiques sévères d'une piscine, la première possibilité est préférable : cette disposition élimine toute participation du dispositif acoustique dans la résistance thermique de la toiture.

RÉFLEXION SUR LE PARE-VAPEUR COMPLÉMENTAIRE

Les hypothèses de composition de toitures sont à présent suffisamment définies pour choisir le type de pare-vapeur le mieux adapté, au moyen du programme GLASTA [PHYS-15-2], qui permet de simuler le transfert de vapeur d'eau au travers d'une paroi.

Le climat intérieur IV ($t_i = 27^\circ\text{C}$ et H.R. = 70 %) se combine au climat extérieur belge pour fixer les conditions climatiques imposées à la paroi. Les simulations ont été menées sur une durée de 4 ans, afin de mettre en évidence la possibilité éventuelle de séchage; les critères d'acceptation des résultats sont ceux définis en pp. 54 et 55.

Le programme calcule la quantité totale de condensats produite en un an et en quels endroits de la paroi, comme l'illustrent par exemple les figures ci-contre, relatives à la composition de toiture utilisant des caissons remplis entièrement d'isolant (ici : de la cellulose), avec un pare-vapeur de types E1 à E3 : c'est ce dernier type seulement qui permet le séchage entre saisons froides et qui satisfait à la quantité maximale de condensats autorisée. Le tableau ci-dessous synthétise la quantité de condensats accumulée sur une année, exprimée en g/m², et cela pour les trois types de pare-vapeur E1 à E3.

CONCLUSIONS

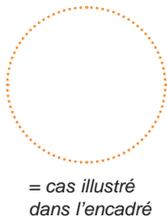
Comme on peut le constater à la lecture de ces résultats :

- Le verre cellulaire induit une quantité nulle de condensats, suivi de près par le polystyrène extrudé : la différence (pour E3), d'un ordre de grandeur proche de la précision de la modélisation, n'est pas significative.
- Dans chaque type de toiture et pour chaque matériau isolant, une solution satisfaisante peut être définie, parfois sans pare-vapeur (EPS, XPS et CG), parfois dès l'usage d'un pare-vapeur de type E2 (PUR) ou de type E3 (MW, CEL et FB).

Par prudence, au stade de l'esquisse, on choisira l'utilisation d'un pare-vapeur de type E3, et cela autant à cause de la sévérité du climat IV (quant au risque certain de condensation au droit des noeuds constructifs ponctuels), que pour protéger les éventuels matériaux, intervenant dans la composition de la toiture, qui seraient sensibles aux vapeurs de chlore. Seul le verre cellulaire dispense de tout pare-vapeur, pour autant qu'il soit mis en oeuvre de façon irréprochable.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

Matériau de couverture	Structure	Type de toiture	Composition de toiture	PUR		EPS		XPS		MW		CG		CEL		FB	
				pare-vapeur	condensats												
Système A : ARDOISES NATURELLES (schiste)	Légère		- sous-toiture fibres-ciment - isolant - 1 plaque de plâtre + pare-vapeur - 1 plaque de plâtre - finition intérieure acoustique	E1	⊗	E1	11	E1	89	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗
		E2	38	E2	7	E2	69	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗
		E3	1	E3	0	E3	9	E3	3	E3	0	E3	3	E3	3	E3	3
		E1	⊗	E1	16	E1	88	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗	E1	⊗
	E2	45	E2	9	E2	68	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗	
	E3	1	E3	0	E3	9	E3	3	E3	0	E3	3	E3	3	E3	3	
	Légère		- sous-toiture : géotextile - isolant sur PV et multiplex - 2 plaques de plâtre - finition intérieure acoustique	E1	⊗	E1	13	E1	89	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗
		E2	38	E2	7	E2	69	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗
		E3	1	E3	0	E3	9	E3	3	E3	0	E3	3	E3	3	E3	3
		E1	⊗	E1	14	E1	90	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗	E1	⊗
	E2	40	E2	8	E2	70	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗	
	E3	1	E3	0	E3	10	E3	3	E3	0	E3	3	E3	3	E3	3	
Lourde		- sous-toiture : géotextile - isolant + pare-vapeur - hourdis béton lourd - enduit de plafonnage - finition intérieure acoustique	E1	50	E1	10	E1	74	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗	
	E2	30	E2	6	E2	57	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗	
	E3	1	E3	0	E3	7	E3	2	E3	0	E3	2	E3	2	E3	2	
	E1	⊗	E1	15	E1	88	E1	⊗	E1	0	E1	⊗	E1	⊗	E1	⊗	
E2	42	E2	9	E2	68	E2	⊗	E2	0	E2	⊗	E2	⊗	E2	⊗		
E3	1	E3	0	E3	8	E3	3	E3	0	E3	3	E3	3	E3	3		



QUANTITÉ TOTALE DE CONDENSATS (G/M²) ACCUMULÉESURUNEANNÉE, SELONLACOMPOSITIONDELATOITURE, LETYPE D'ISOLANT ETLETYPE DE PARE-VAPEUR (E1 À E3), EN CLIMAT III

Les quantités reprises en valeur chiffrée restent compatibles avec le matériau concerné (cf. p. 55). Lorsqu'elles dépassent cette valeur la solution correspondante est à proscrire (⊗).

CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : COUVERTURE DU RESTAURANT

CHOIX DU SYSTÈME DE TOITURE

La peau extérieure de cette toiture est en zinc-cuivre-titane à joints debout. Ce type de couverture correspond à un système de toiture C (feuilles métalliques ventilées en sous-face).

Ce type de peau induit un support aéré continu, de façon à ce que la patine autoprotectrice de la tôle de zinc, gage de durabilité, puisse avoir lieu, en face inférieure. La meilleure aération possible est assurée par une prise d'air continue en pied de versant et au faîtage de la toiture (ici en contremur).

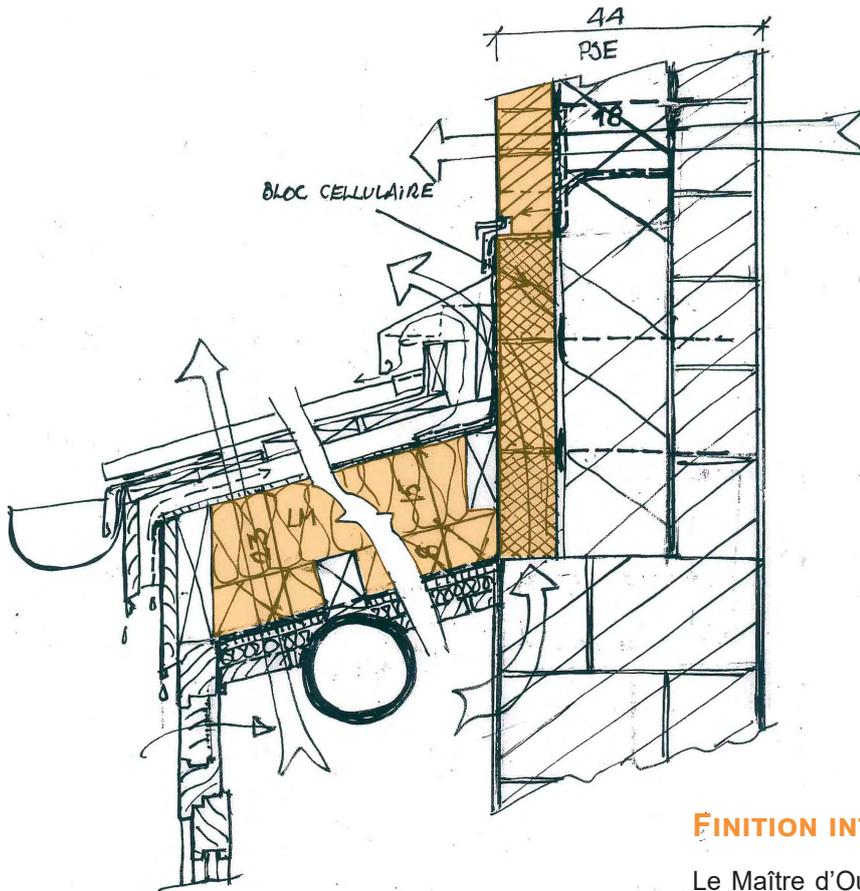
Cet espace aéré doit être disposé sous les voliges de support des feuilles de Zn-Cu-Ti, au-dessus de la sous-toiture; il doit avoir une épaisseur d'au moins 40 mm.

La sous-toiture doit être aussi perméable que possible à la vapeur d'eau, tout en étant étanche à l'eau.

CHOIX DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION

Conformément au tableau de la p. 61 (système C), l'épaisseur d'isolation à prévoir est de 16 à 19 cm (PUR) ou 23 à 26 cm (EPS et MW) ou 21 à 23 cm (XPS) ou 25 à 28 cm (CG) ou 27 à 30 cm (CEL et FB).

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



Le restaurant sera ramené, par une ventilation mécanique contrôlée, à une classe de climat intérieur de classe II : un pare-vapeur de type E3 ($\mu d > 25 \text{ m}$) est requis, bien fixé, pour être étanche à l'air et à la diffusion de vapeur d'eau.

L'étanchéité à l'air de la finition intérieure est aussi importante; cette étanchéité peut être assurée par le pare-vapeur lui-même.

FINITION INTÉRIEURE

Le Maître d'Ouvrage désire une finition de contrôle acoustique en sous-face et du bois en finition visible, le tout devant présenter une résistance au feu R_f de 1/2 h. La solution proposée pour la finition acoustique peut être celle choisie pour la piscine.

La finition acoustique (laine minérale et faux-plafond ajouré) doit s'ajouter en-dessous de la protection R_f sans participer à la résistance thermique de la paroi. Le faux-plafond, en bois, doit être traité ignifuge.

CONCLUSION

La composition de la toiture sera soit identique au type 1, soit au type 5 précédemment définis pour le bâtiment principal (tableau des pp. 70 et 71). La portée entre les vermes de structure métallique est de l'ordre de 2,5 m, donc compatible avec les deux types 1 et 5.

Dans le cas 1, un système de contrelattage de 40 mm, surmonté du voligeage, sera prévu au-dessus de la sous-toiture.

Dans le cas 5 (panneaux préfabriqués), on peut prévoir le même support des feuilles de Zn-Cu-Ti qu'avec le cas 1 ou encore utiliser un film en relief en polyéthylène haute densité; dans cette hypothèse (où un matériau peu perméable à la vapeur d'eau se trouve placé dans la paroi du côté froid de l'isolant), la condition d'une pose aussi parfaite et continue que possible du pare-vapeur devient absolument indispensable : une attention aux joints entre panneaux s'impose comme condition sine qua non d'un comportement normal de la toiture soumise au transfert de vapeur d'eau.

ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET

ETUDE DE L'ESQUISSE

CHOIX, pour tous les éléments de la toiture :

- «peau» extérieure et intérieure (matériau, teinte, texture)
- zone d'isolation thermique : prédimensionnement
- encombrement total

SELON :

- contraintes urbanistiques
- durabilité, entretien
- structure
- esthétique
- cohérence mutuelle et compatibilité de jonction
- etc.

TEST DE COHÉRENCE
ET DE COMPATIBILITÉ

=> SOLUTION 1



ETUDE DE L'AVANT-PROJET

Identification et conception des noeuds
ADAPTATION DES CHOIX

=> SOLUTION 1'

IDENTIFICATION ET CONCEPTION DES NOEUDS

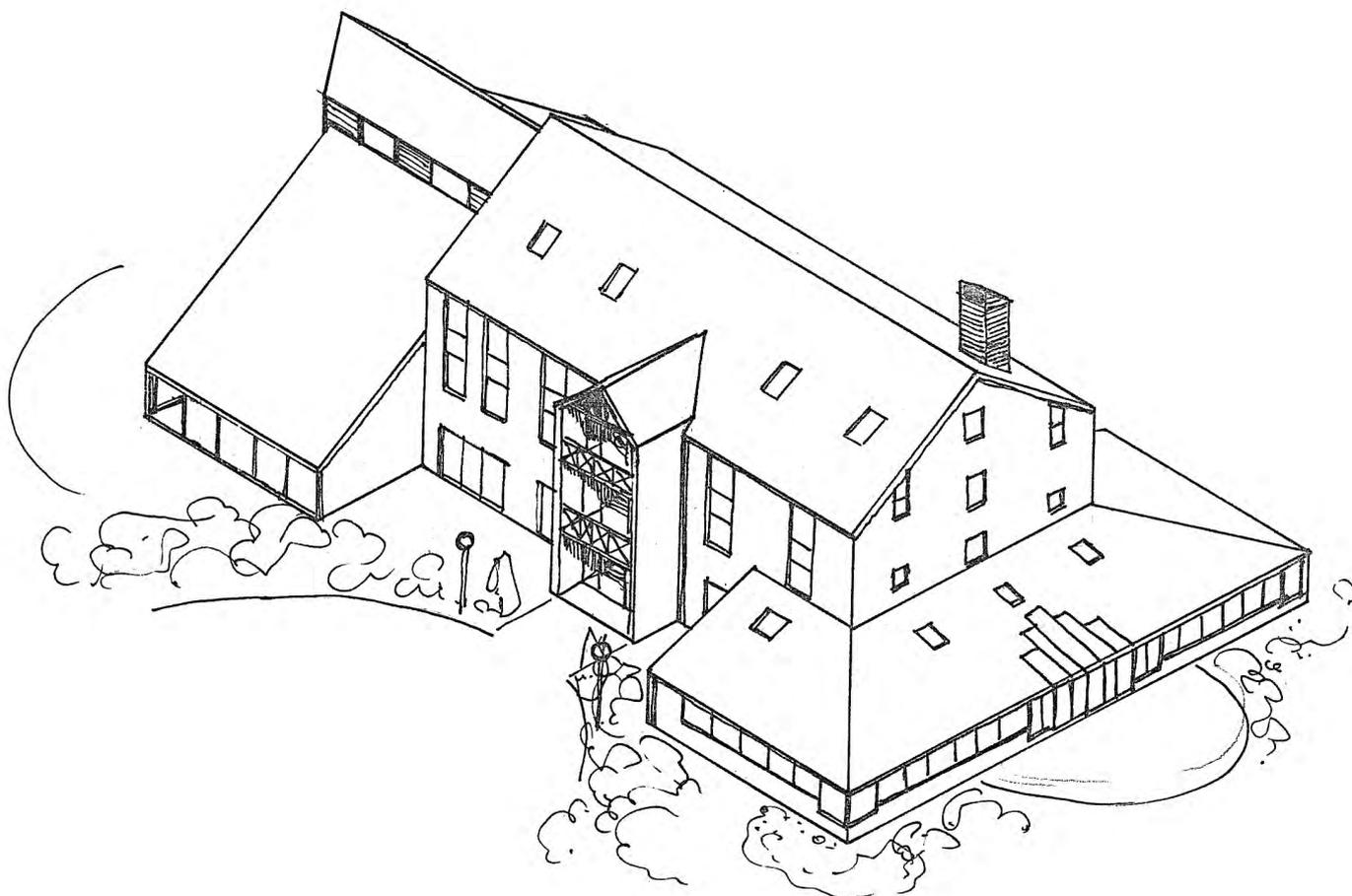
Le premier choix des types de parois de toitures ayant été réalisé au stade de l'esquisse, nous pouvons passer à l'avant-projet, en tenant compte des problèmes liés à l'épaisseur réelle des parois.

Ceci permet déjà d'étudier un plan correct, mais aussi de visualiser les jonctions entre les diverses parois et de détecter les endroits où les problèmes techniques vont devoir être résolus.

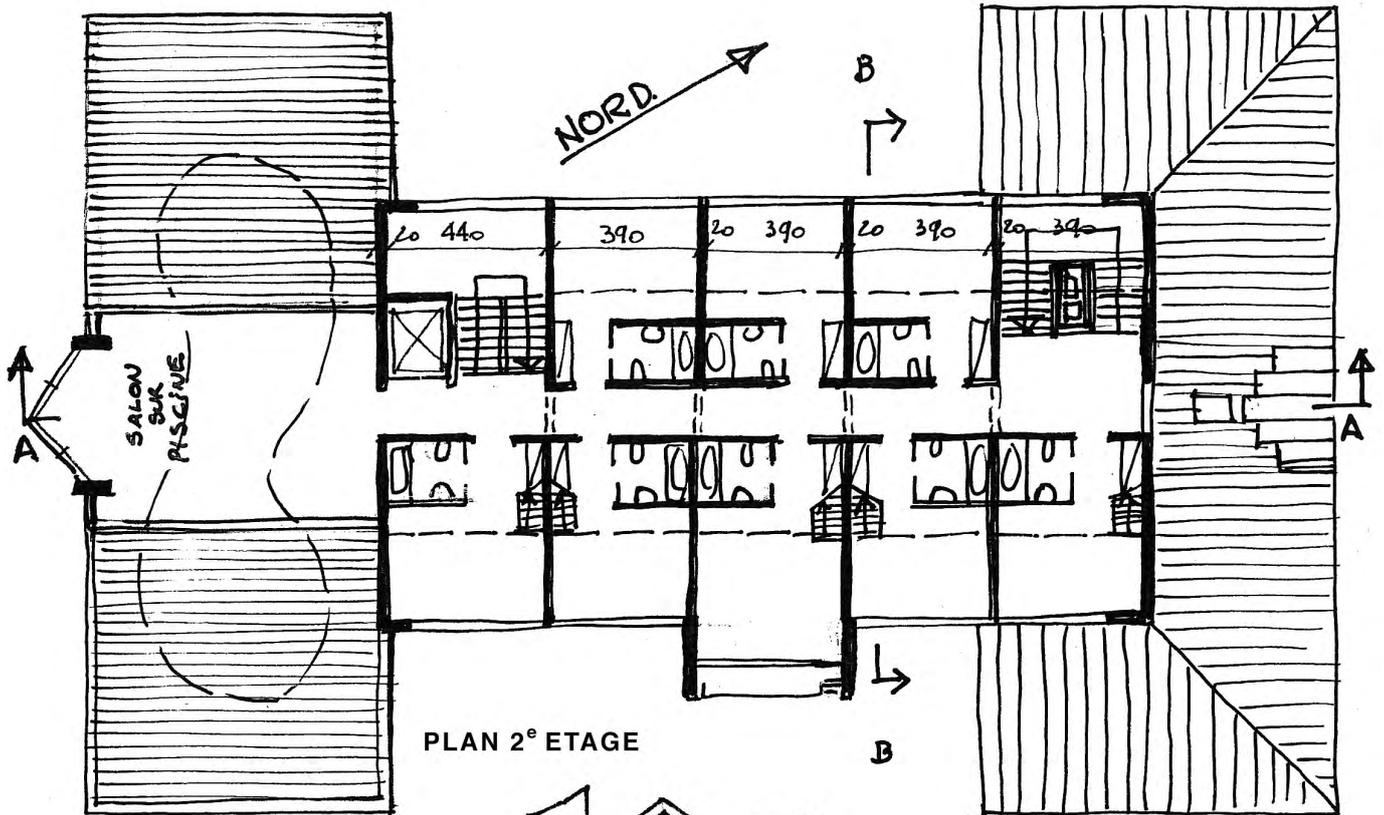
Nous revenons à la détection des points cruciaux de rencontre des parois.

Il est évident qu'à ce stade, au même titre que les parois de toitures, les parois horizontales et verticales de l'enveloppe externe ont été choisies dans leur principe constitutif et, par voie de conséquence, leur épaisseur.

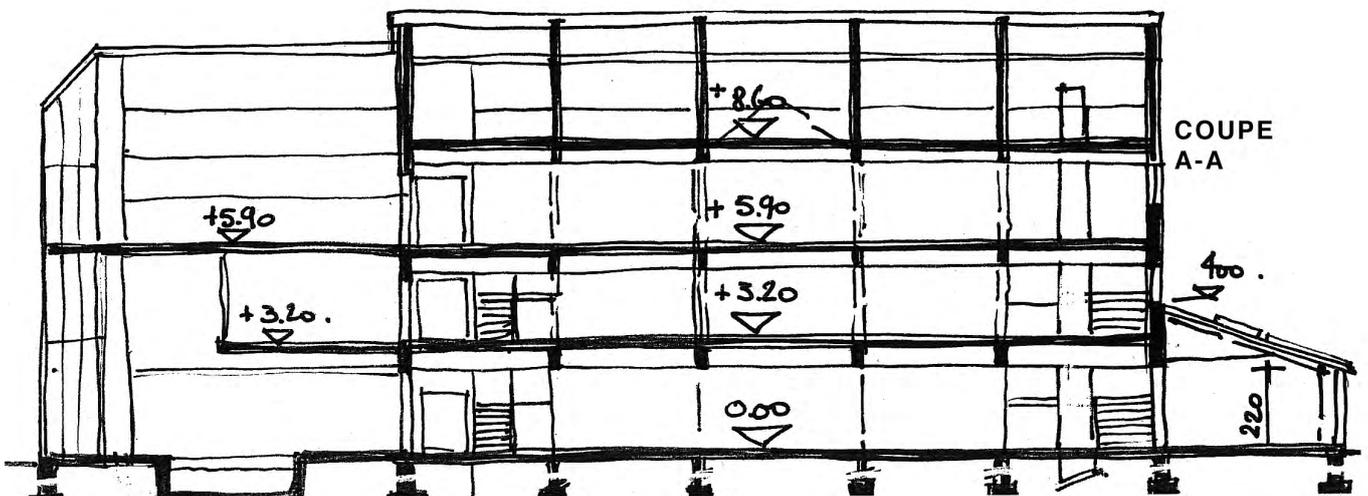
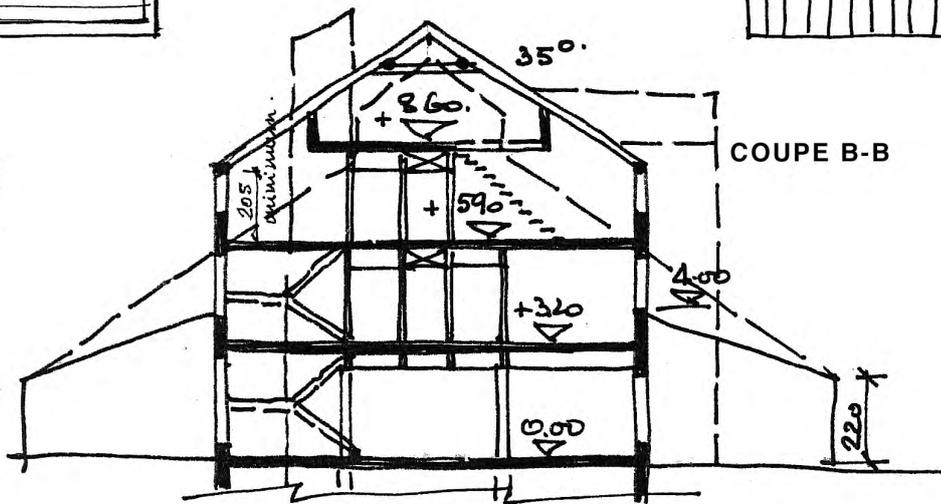
Nous pouvons ainsi étudier les grandes lignes des principaux détails, tout en avançant dans l'avant-projet.



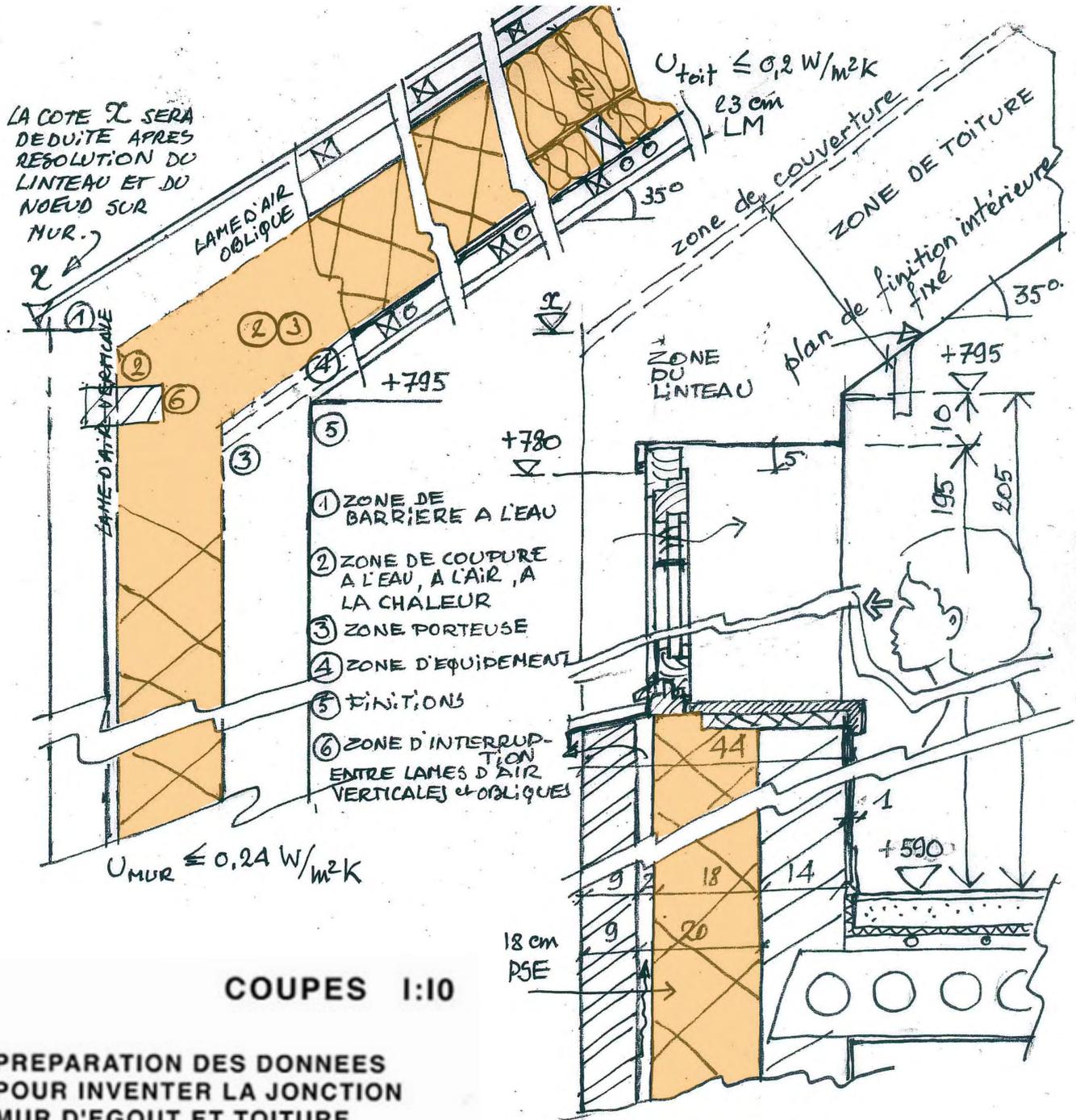
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



ESQUISSE
ECH 1:200



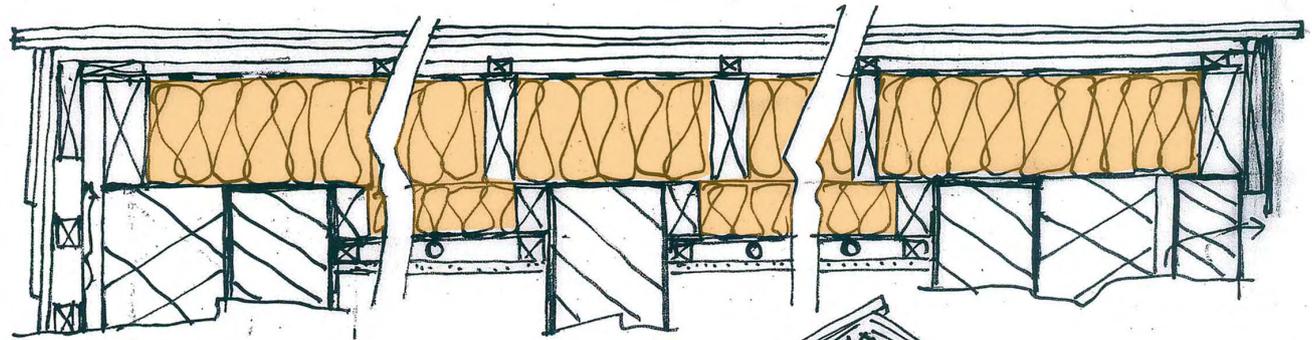
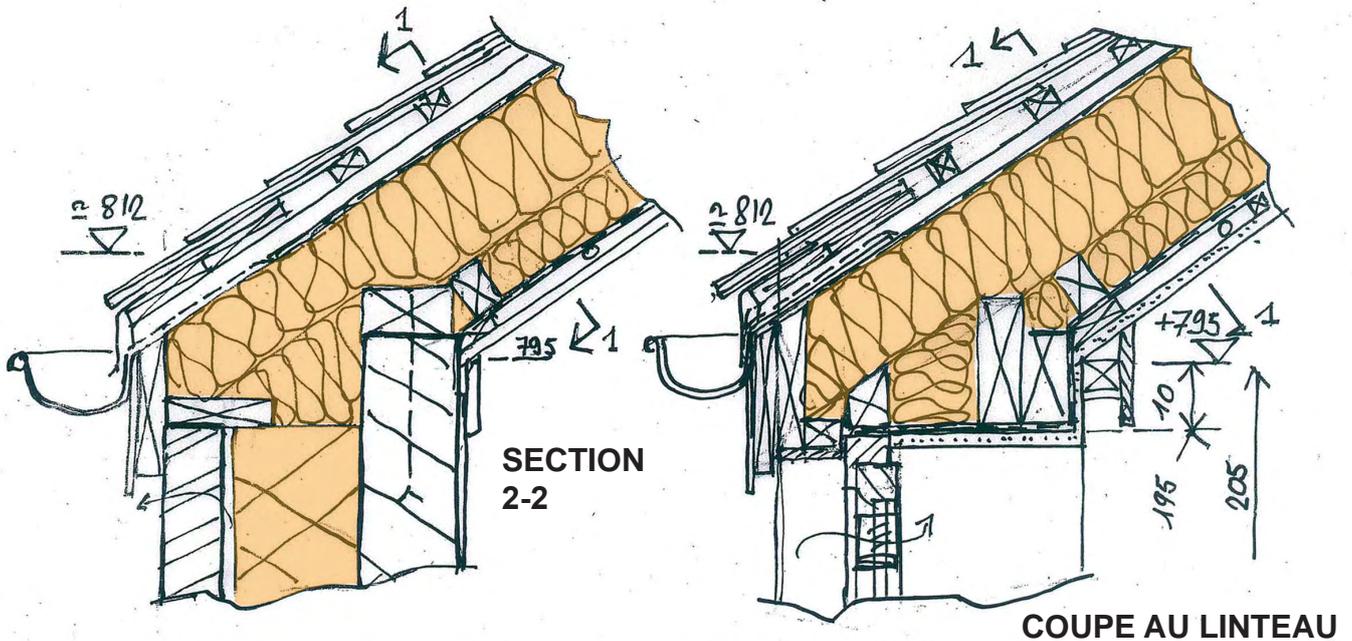
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



- 1) L'esquisse donne 2 dimensions importantes
 [205] - La hauteur intérieure minimale du niveau +5.90 pour une vue normale pour une personne debout.
 [35°] - La pente de la toiture.
- 2) Croquis de mise en place de la fenêtre pour vérifier la faisabilité du raccord toiture-linteau mur en donnant une vue normale pour une personne debout. Ceci comprend déjà les choix des épaisseurs des zones constitutives du mur. (voir L'isolation du mur creux)

- RESOLUTION DU NIVEAU X
- 3) Vérifier si 2.05m permettront de réaliser le linteau (page suivante)
 - 4) Mise en place des 3 types possibles de toiture et identification des noeuds de continuité des 5 zones des enveloppes ① ② ③ ④ ⑤ (voir définition ci-dessus)

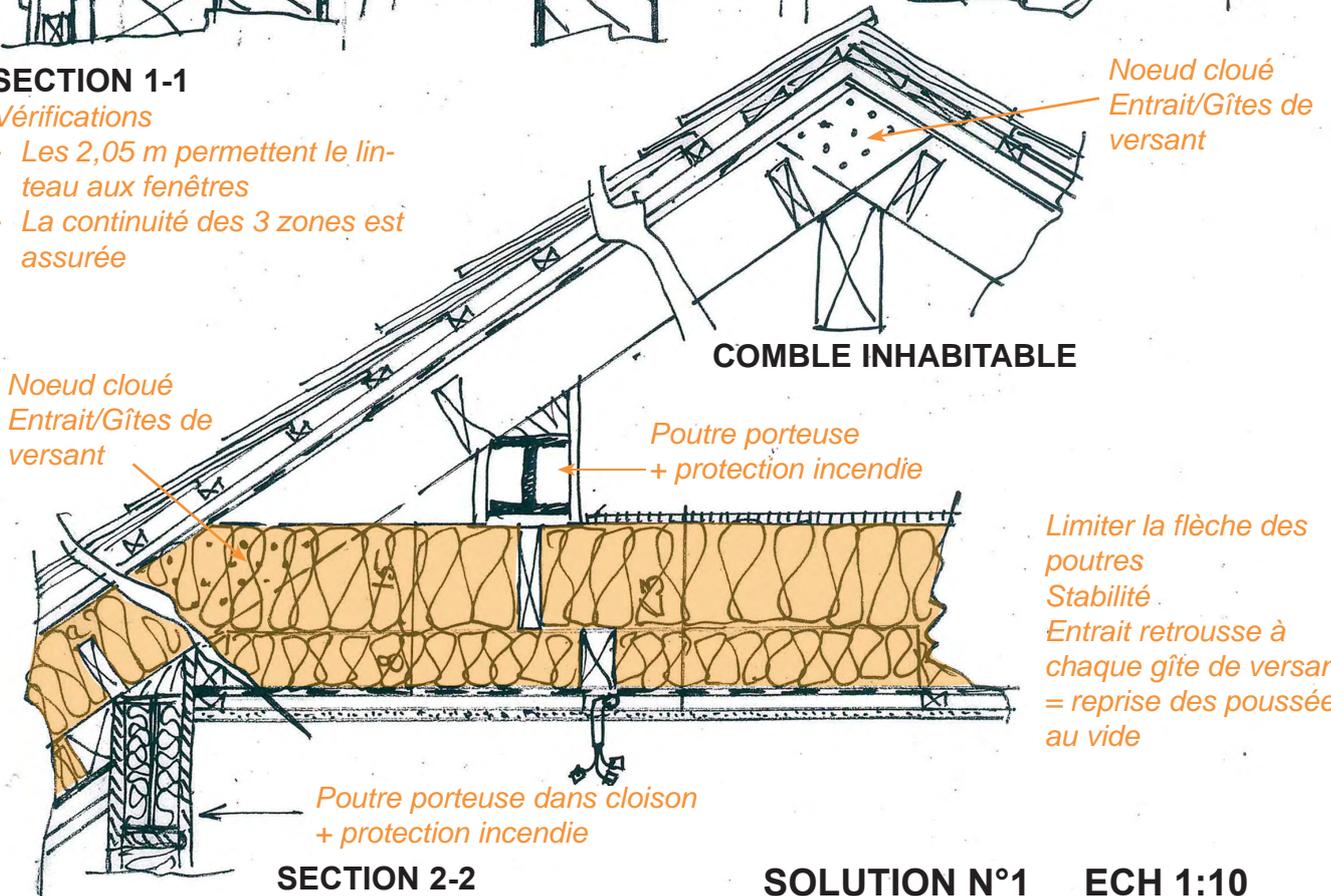
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE



SECTION 1-1

Vérifications

- Les 2,05 m permettent le linteau aux fenêtres
- La continuité des 3 zones est assurée



Noeud cloué
Entrait/Gîtes de versant

COMBLE INHABITABLE

Poutre porteuse
+ protection incendie

Noeud cloué
Entrait/Gîtes de versant

Poutre porteuse dans cloison
+ protection incendie

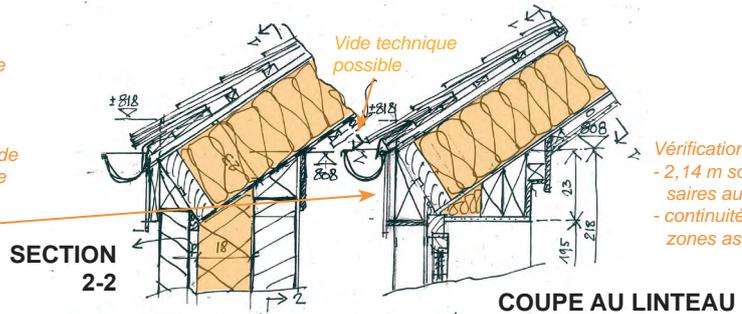
Limiter la flèche des poutres
Stabilité.
Entrait retroussé à chaque gîte de versant = reprise des poussées au vide

SECTION 2-2

SOLUTION N°1 ECH 1:10 DETAILS D'AVANT-PROJET

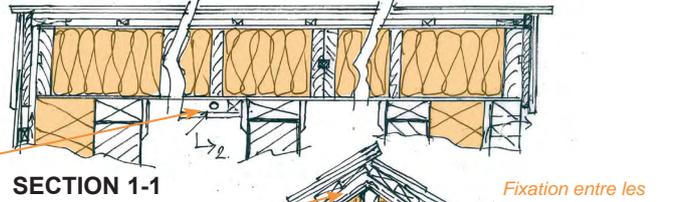
LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

La bavette de sous-toiture ressort entre le crochet et les ardoises de couverture de la planche d'égout



Vérifications :
- 2,14 m sont nécessaires au linteau
- continuité des 3 zones assurée

(Vide technique supplémentaire possible)



Fixation entre les panneaux + isolant

Bande de complément de sous-toiture PE armé

COMBLE INHABITABLE

38 x 125 tous les 40 cm : tirants pour les panneaux de versants

Solive courante fixée aux panneaux

SOLUTION N°5 ECH 1:20
DETAILS D'AVANT-PROJET

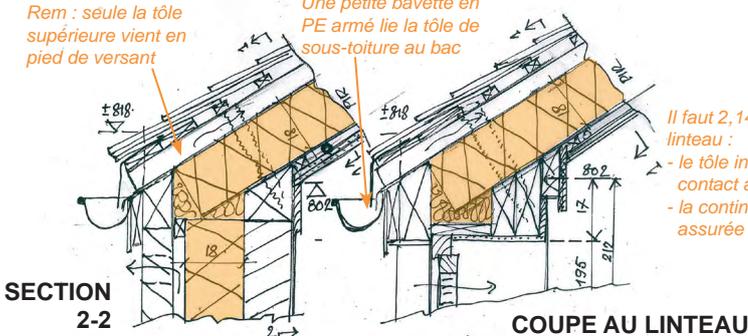
Au stade de l'avant-projet, le dimensionnement des diverses solutions de toiture retenues et leur impact sur l'architecture et sur la mise en oeuvre peuvent être comparés.

Ces cahiers de croquis, à main levée mais à l'échelle, illustrent ce propos.

A partir de là, le projet peut avancer.

Rem : seule la tôle supérieure vient en pied de versant

Une petite bavette en PE armé lie la tôle de sous-toiture au bac



Il faut 2,14 m pour permettre le linteau :
- le tôle inférieure n'est pas en contact avec l'extérieur
- la continuité des 3 zones est assurée

Plat en acier galvanisé de fixation, entre les panneaux

COMBLE INHABITABLE

38 x 125 tous les 40 cm servant de tirant pour les panneaux composites des rampants

Protection feu : laine minérale et plaques de plâtre

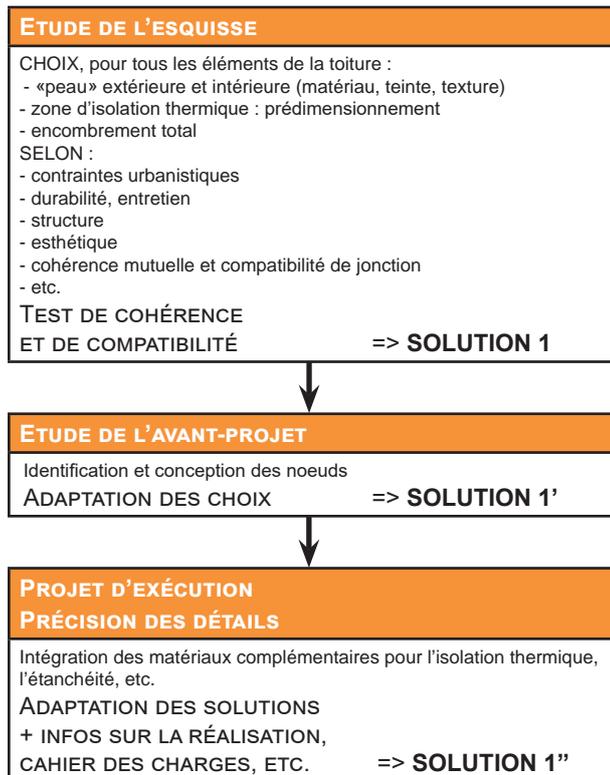
On peut, par exemple, proposer des variantes dans le cahier des charges, ce qui permettra au soumissionnaire de proposer une offre économique pour la variante la mieux adaptée à ses moyens d'exécution et à sa spécialité.

Une certitude, cependant : tant l'expression architecturale, que les performances thermiques et autres, restent assurées, quelle que soit la solution et/ou la variante qui sera exécutée.

SOLUTION N°6 ECH 1:20
DETAILS D'AVANT-PROJET

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINÉE

ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DU PROJET



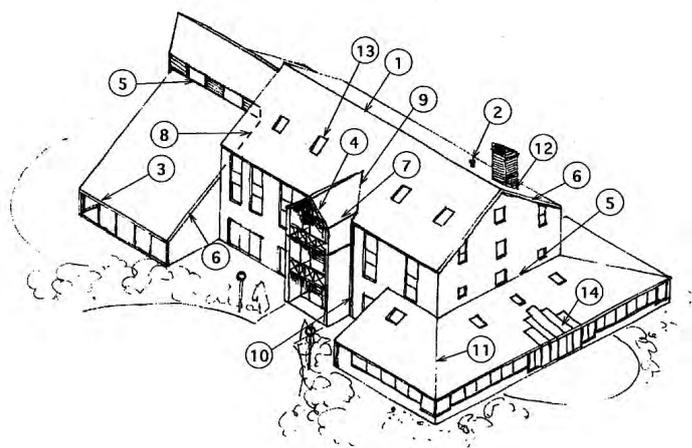
Sur la base de l'évolution des plans eux-mêmes en rapport avec l'architecture générale du projet, les détails de principe vus ci-avant sont suffisamment élaborés pour servir :

- à bien dimensionner les parois ;
- à bien réfléchir à la conception, mais aussi à l'exécution du bâtiment ;
- à bien choisir les matériaux complémentaires qui devront assurer l'isolation thermique, l'étanchéité, etc.

Si ce travail de mise au point aboutit à modifier des options de base, il est aussi préférable de reconsidérer les détails de principe.

A ce stade, l'enveloppe et la configuration des parois et de leurs jonctions sont définies et intégrées dans les plans d'exécution.

Les détails eux-mêmes peuvent être dessinés avec précision, incorporant toutes les informations de matériaux, de réalisation, voire de phase d'exécution.



- | | |
|--|---|
| 1. Ligne de faite | 8. Raccord latéral en butée versant/façade |
| 2. Ventilation (salle de bain) | 9. Noue |
| 3. Gouttière | 10. Évacuation des eaux de toiture |
| 4. Rive en surplomb | 11. Arêtier |
| 5. Raccord du versant contre un mur en butée | 12. Raccord à la pénétration de la cheminée |
| 6. Rive de toiture à fleur de mur | 13. Lucarne |
| 7. Membron | 14. Verrière |

Une documentation intéressante est aisément accessible, auprès des récentes Notes d'Information Technique du CSTC, où des croquis de détails sont abondamment fournis :

- NIT 195 : Toitures en ardoises naturelles [CSTC-95-1] ;
- NIT 240 : Toitures en tuiles [CSTC-11-1] ;
- NIT 184 : Feuilles et bandes en matériaux cuivreux [CSTC-92-1].

Il est également utile de renvoyer le lecteur aux Spécifications Techniques belges et aux Documents Techniques Unifiés français.

LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES

HISTORIQUE	87
LES PERFORMANCES DES TOITURES PLATES	88
LA TOITURE CHAUDE	90
DESCRIPTION	90
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	90
LA TOITURE INVERSÉE	91
DESCRIPTION	91
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	91
LA TOITURE COMBINÉE OU TOITURE “DUO”	92
DESCRIPTION	92
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	92
LA TOITURE VERTE	93
GÉNÉRALITÉS.....	93
LES TYPES DE TOITURE VERTE	93
<i>La toiture-jardin</i>	93
<i>La toiture-jardin légère</i>	93
<i>La toiture végétalisée</i>	93
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	94
LES PARTICULARITÉS DE L'ÉTANCHÉITÉ DE LA TOITURE VERTE	95
LA CONCEPTION ET LA COMPOSITION DE LA TOITURE VERTE	96
<i>La protection mécanique de l'étanchéité</i>	96
<i>Le drainage et la filtration</i>	96
<i>La rétention d'eau</i>	97
<i>L'enracinement des plantes</i>	97
<i>La végétation</i>	97
<i>Détermination des performances thermiques d'une toiture verte</i>	97
LES TYPOLOGIES DE TOITURE À DÉCONSEILLER	98
LA TOITURE FROIDE	98
<i>Inconvénients</i>	98
LES AUTRES COMPOSITIONS DE TOITURE	98
<i>Isolation sous le plancher de la toiture</i>	99
<i>Béton de pente sur l'isolation</i>	99

HISTORIQUE

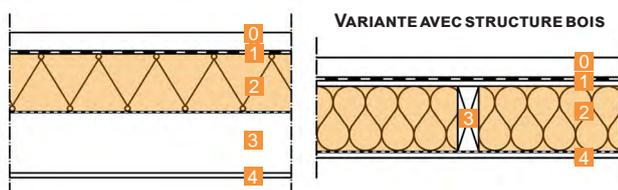
Une toiture plate est une toiture se caractérisant par une étanchéité souple. Elle possède toujours une pente d'au moins 2 %.

Par étanchéité, on entend la couche ou l'ensemble des couches rendant la construction étanche à l'eau de pluie, à la neige et à la fonte des neiges.

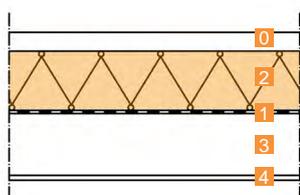
Pour approcher les fonctions de la toiture plate, on différencie quatre systèmes possibles de toiture :

- la toiture chaude, où la couche d'isolation thermique (elle-même protégée par l'étanchéité) protège la structure ;
- la toiture inversée, où la couche d'isolation thermique placée extérieurement protège l'étanchéité ;
- la toiture combinée, où une couche d'isolation thermique protège l'étanchéité et une autre, sous l'étanchéité, protège la structure ;
- la toiture froide, comportant une lame d'air, ventilée par de l'air extérieur : pour mémoire, ce système de toiture est à proscrire (voir p. 98).

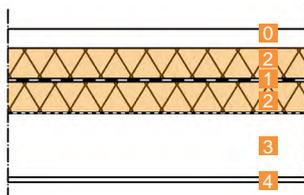
TOITURE CHAUDE



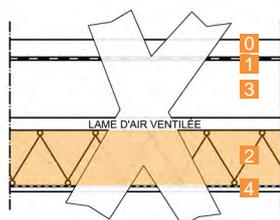
TOITURE INVERSÉE



TOITURE COMBINÉE OU 'DUO'



TOITURE FROIDE



- 0 Zone de lestage + natte de protection éventuels
- 1 Zone d'étanchéité
- 2 Zone d'isolation + pare-vapeur éventuel
- 3 Support
- 4 Zone de finition + zone libre éventuelle pour équipement

L'histoire du toit plat est indissociable de celle de l'architecture de terre, utilisant depuis plus de 10.000 ans la terre crue, tant pour élever les murs des habitations que pour recouvrir leur toiture.

Le sous-sol du Proche Orient est riche en hydrocarbures : pétrole brut, bitume et leurs dérivés. Dès l'Antiquité, le bitume affleurait dans la région de Kirkuk et de Hit. Dans la construction, on utilisait le bitume mélangé, à chaud ou à froid, à divers éléments qui le rendaient plus compact et plus résistant : sable, gypse, paille hachée.

Il n'existe pas à proprement parler une tradition de toit plat en Europe, excepté dans l'architecture militaire et l'habitat de l'aire méditerranéenne. Dans nos régions, les toits plats et toits-terrasses constituent des dispositifs de toiture récents, qui rompent avec la longue tradition du toit à versants.

Le toit plat apparaît en milieu urbain, au moment où celui-ci est l'objet à la fois d'une forte croissance et d'une profonde transformation. Ce phénomène est particulièrement marqué à partir de 1850 dans les villes américaines qui connaissent une mutation de leur centre par le développement sans précédent du secteur tertiaire. Il se développe un nouveau type architectural : l'immeuble à étages multiples, basé sur l'ossature métallique et le plan neutre.

Grâce aux nouveaux matériaux d'étanchéité, élaborés à partir des sous-produits de la distillation du pétrole, le plancher supérieur devient le support de la couverture.

Au départ, le bitume était coulé sur la toiture, puis l'évolution industrielle a pris en charge la préfabrication de membranes en lés.

Au début du XX^{ème} siècle, les supports de couverture étaient soit en béton, soit composés de planchers en bois.

Les problèmes rencontrés étaient essentiellement dus au vieillissement du bitume ; les craquelures donnaient lieu à des infiltrations d'eau dans ce matériau composite et provoquaient la dégradation des feutres d'armature.

Initialement, les toitures étaient recouvertes de sable ou de gravier. Cette couche protégeait l'étanchéité contre l'action des rayons ultraviolets et des brusques variations de température mais elle présentait l'inconvénient de nécessiter l'enlèvement périodique de débris de végétation.

Avec l'apparition de supports légers, tels les panneaux de fibres végétales, les tôles profilées et les hourdis en béton cellulaire, cette couche protectrice lourde a été abandonnée, exposant les feutres bitumés aux rigueurs climatiques et les rendant plus vulnérables.

Pour remédier à la sensibilité à l'eau des membranes, les armatures en feutre ont été progressivement remplacées par des voiles de verre. Cette substitution a conféré aux membranes une résistance supérieure au vieillissement, les rendant également plus souples mais toutefois moins résistantes à la traction et aux déchirures.

L'adjonction de composants synthétiques insensibles à l'eau a permis de garder une certaine souplesse tout en les rendant plus résistants.

La progression du niveau de confort et la crise pétrolière ont introduit une nouvelle exigence : l'isolation thermique de la toiture.

Dans le cas de toiture à structure en bois et panneaux végétaux, les espaces entre les gîtes ont été comblés par l'isolation créant ainsi une zone froide sous le support de l'étanchéité. Cette zone devient favorable à la condensation avec les problèmes de dégradation qui en découlent.

Dans le cas de toiture à support lourd ou avec une chape lourde, l'isolant a été posé sous la chape de pente. Dans ce cas, l'étanchéité et la chape subissent des chocs thermiques très importants, ce qui entraîne leur rupture et les fuites qui en résultent.

Pour éviter ces chocs thermiques, est apparu le concept de la toiture chaude, solution la plus couramment employée aujourd'hui, qui consiste à poser l'isolation thermique sur le plancher sans prévoir de lame d'air entre les différentes couches.

La toiture plate est devenue la toiture engendrant le moins de problèmes : moins de 5 % des problèmes soumis au CSTC concernent une toiture plate.

LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES

LES PERFORMANCES DES TOITURES PLATES

FONCTION DU CONTRÔLE DU CLIMAT		
<p>EAU</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etre étanche à l'eau et à la neige • Evacuer les eaux de pluie et de fonte de neige • Ne permettre qu'une condensation interne acceptable (quantité compatible avec les matériaux et pas de condensation résiduelle) 	<p>Pluie</p>	<p>La zone d'étanchéité doit recueillir et évacuer toute l'eau vers le point le plus bas de la toiture. La membrane d'étanchéité doit avoir été correctement posée par un personnel qualifié, suivant les prescriptions du fabricant et conformément aux agréments techniques. Les raccords doivent être conformes aux règles de l'art (voir [CSTC-94-2]), et les remontées d'étanchéité doivent être suffisantes. Les pontages des joints actifs doivent être adaptés aux mouvements.</p> <p>Les pentes doivent être adaptées aux couvertures et les évacuations des eaux pluviales correctement dimensionnées.</p> <p>Attention : le dispositif d'évacuation des eaux de pluie doit prévoir l'évacuation de l'eau qui s'accumulerait sur la toiture au cas où les orifices habituels d'évacuation seraient bouchés (poussières, feuilles mortes, etc.).</p> <p>L'eau de pluie doit pouvoir déborder sans risque vers l'extérieur et de façon visible en cas d'obstruction des évacuations. L'accumulation de l'eau en hauteur ne peut dépasser une hauteur compatible avec la capacité portante de la structure et avec les configurations des ouvrages qui l'entourent ou la traversent (voir encadré ci-dessous).</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Le relevé d'étanchéité d'une toiture plate doit dépasser d'au moins 15 cm le niveau fini de la toiture, à savoir celui de l'étanchéité, augmenté de l'éventuel lestage. En effet, si le relevé n'est pas suffisamment haut, le risque d'infiltration est plus grand. Dans le cas de dalles sur plots, la hauteur des relevés s'élève également à au moins 15 cm, mesurés cette fois à partir de l'étanchéité, à condition de ménager un joint ouvert suffisant (au moins 2 cm) entre la première dalle et le relevé, et de prolonger ce dernier d'au moins 5 cm au-dessus du niveau des dalles [CSTC-94-2]. En cas de toiture inversée, les 15 cm sont à compter à partir du niveau supérieur de l'isolant. Il est recommandé, lors de la conception d'une toiture plate, de prévoir des relevés suffisamment hauts au cas où des couches d'isolant devraient être ajoutées par la suite.</p> </div>
	<p>Neige</p>	<p>La neige, en plus de son poids, ne peut s'infiltrer dans la zone d'étanchéité et, à sa fonte, l'eau doit être évacuée.</p>
	<p>Gel</p>	<p>Le gel de toute eau stagnante dans la zone d'étanchéité peut détruire la matière, le matériau ou les jonctions de ceux-ci. Il faut donc éviter toute stagnation d'eau et l'utilisation de matériau gélif.</p>
	<p>Vapeur migrant de l'intérieur vers l'extérieur</p>	<p>La connaissance du type de climat intérieur (au point de vue hygrothermique) est essentielle pour la conception et le choix du type de toiture.</p> <p>Plus la pression de vapeur est grande à l'intérieur, plus l'étanchéité à la vapeur et à l'air du complexe toiture devra être grande, mission impartie aux zones de finition et d'isolation thermique.</p> <p>Le pare-vapeur doit être de qualité suffisante et il doit être continu.</p> <p>La toiture doit être étanche à l'air.</p>
	<p>Pénétration de l'air extérieur chargé de vapeur, dans la zone de couverture</p>	<p>Dans le cas d'une toiture froide, l'air extérieur peut circuler dans la zone de couverture. La couverture ayant rayonné vers le firmament peut être plus froide que l'air extérieur, ce qui entraîne la formation de condensation sur sa face inférieure, voire dans sa masse. C'est le phénomène de sur-refroidissement.</p>
<p>AIR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etre étanche à l'air 	<p>Pénétration de l'air extérieur vers l'intérieur</p>	<p>Dans le cas d'une toiture en zinc non protégée en sous-face, le volume séparant le support de la toiture du dessus de la zone d'isolation thermique doit être ventilé. Toute ventilation suppose un air restant extérieur aux autres zones. La zone d'isolation thermique est le rempart à la pénétration de l'air extérieur ; dans le cas d'isolants thermiques étanches à l'air, les joints entre panneaux doivent être colmatés ; dans le cas d'isolants thermiques non étanches à l'air (laine minérale, par exemple), l'étanchéité à l'air extérieur doit être assurée soit par le pare-vapeur, soit par un panneau apposé à l'extérieur de l'isolation, ce panneau étant étanche à l'air et perméable à la vapeur d'eau.</p>
<p>CHALEUR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Participer à l'isolation thermique du bâtiment 	<p>Fonction d'isolation</p>	<p>La chaleur intérieure doit être retenue le plus possible à l'intérieur, de façon à ce que la thermique structure portante soit ainsi protégée des variations climatiques, ce qui évite les désordres dus à la dilatation, au retrait, etc.</p> <p>La zone d'isolation thermique isole thermiquement et doit être continue dans la toiture et en liaison avec les autres zones d'isolation comprises dans les autres parois extérieures. La performance choisie (U_{max}) est de $U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, respectueuse de U_{max} repris à l'Annexe 3 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 28/01/16 [GW -16-1]. Pour les climats intérieurs fort humides, elle doit être peu ou pas perméable à la vapeur. En climat intérieur sec, elle peut être perméable à la vapeur et non capillaire. La structure protégée thermiquement de l'extérieur n'est pas sujette à entraîner des condensations de la vapeur contenue dans l'air intérieur ou pénétrant dans la masse de la structure elle-même.</p> <p>Seule une structure en bois peut pénétrer la zone d'isolation thermique car le bois est peu conducteur de la chaleur ; cela multiplie cependant les joints de la zone d'isolation thermique.</p>
	<p>Fonction d'inertie thermique</p>	<p>Les matériaux de la zone de finition et/ou de la zone de structure peuvent, s'ils sont pondéreux, contribuer à accumuler la chaleur intérieure pour contribuer au volant thermique que constituent les masses accumulatrices de chaleur que sont les parois et planchers (en maçonnerie, pierre, terre cuite ou béton).</p>

LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES

FONCTION DU CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT

LUMIÈRE	Ambiance intérieure	Selon sa teinte et sa texture, le matériau de finition intérieure peut différemment réfléchir la lumière à l'intérieur du local et participer ainsi à l'intensité lumineuse intérieure.
ACOUSTIQUE <ul style="list-style-type: none"> • Isoler acoustiquement par rapport à l'environnement 	Bruit aérien	L'étanchéité à l'air, la masse de la zone de structure, de la laine minérale en zone d'isolation thermique, une différence de masse entre la zone de structure continue et la zone de finition, ainsi qu'une désolidarisation entre ces deux zones, peuvent contribuer à isoler des bruits aériens extérieurs ou à éviter que des bruits aériens émis dans les locaux ne gênent l'environnement immédiat. La zone de finition combinée avec la zone d'équipement et une zone d'isolation thermique en laine minérale peut aider au contrôle de l'acoustique intérieure en limitant le temps de réverbération dans le local sous toiture.
	Bruit d'impact extérieur	Une zone d'isolation thermique résiliente, limitant les contacts directs entre la zone de couverture et la zone de structure continue, contribue à limiter l'effet des chocs sur la toiture, provenant de la pluie ou de la grêle. Les matériaux utilisés dans la zone de couverture ont également une influence sur le bruit d'impact.
SÉCURITÉ À L'EFFRACTION		Les ouvertures en toiture sont un des points faibles du bâtiment sous l'angle de son exposition à l'effraction.
SÉCURITÉ AU FEU <ul style="list-style-type: none"> • Répondre aux exigences 	Résistance au feu	La toiture doit être une barrière au feu entre bâtiments proches ou parties d'un même bâtiment. Les toitures avec une zone de structure lourde en béton, ou une zone de structure légère combinée avec une zone de finition protectrice et étanche aux flammes, sont des solutions offrant une bonne résistance au feu.
	Réaction au feu	La réaction au feu des matériaux (principalement en couverture et en plafond) est très importante pour la sécurité, aux points de vue des émanations toxiques, des fumées, de la propagation de flammes, etc.

FONCTION STRUCTURALE

CHARGES PERMANENTES ET D'EXPLOITATION	Charges permanentes	Poids propre des éléments, augmenté des charges qui, après leur mise en oeuvre, peuvent y agir de façon permanente (par exemple, lestage de la membrane ou substrat de la toiture verte).
	Charges d'exploitation	La structure est calculée en fonction du poids propre de la toiture, des charges d'entretien et de la surcharge d'utilisation si la toiture est accessible, et des panneaux solaires éventuels (lestage compris). La toiture doit résister aux contraintes mécaniques au niveau de toutes les couches.
CHARGES CLIMATIQUES	Neige	La surcharge de neige à prendre en compte dépend de l'altitude du site où est construit le bâtiment. Pour une altitude jusqu'à 100 m, elle est de 400 N/m ² ; au-delà, elle est de : $80 \times [0,50 + 0,007 \times (\text{altitude} - 100)/2]$ en N/m ² (NBN EN 1991-1-3 Actions générales - Charges de Neige (2003)) [IBN -13].
	Vent	Les charges de vent à prendre en compte sont détaillées dans les normes de la série NBN EN 1991-1-4 "Actions sur les structures - Action du vent" [IBN -13]. Tant les pressions que les dépressions doivent être prises en compte. En ce qui concerne la toiture plate, les considérations de résistance au vent (notamment à la succion des matériaux extérieurs exposés) sont particulièrement importantes (voir annexe 2). La toiture doit être conçue de façon à ce que sa structure et ses couches de matériaux résistent aux pressions/dépressions induites par le vent. La protection éventuelle de l'étanchéité ne doit pas être emportée par le vent. L'adhérence ou la fixation de l'étanchéité à son support doit pouvoir résister à la succion du vent.
	Sollicitations thermiques	En ce qui concerne les charges dues aux sollicitations thermiques, il y a lieu de prendre en compte une température de surface pouvant varier entre -10°C et +80°C en basse et moyenne Belgique et entre -15°C et +80°C en haute Belgique. La membrane d'étanchéité doit résister aux érosions éolienne et hydraulique. La membrane d'étanchéité doit résister aux rayonnements ultraviolets (UV) ou être protégée de ceux-ci ; elle doit également être adaptée pour résister à la pollution de l'environnement extérieur auquel elle est exposée.
CHARGES ACCIDENTELLES		Lorsque certaines parties de la toiture peuvent former réservoir d'eau, il y a lieu de tenir compte de cette charge au niveau du trop-plein afin de déterminer la capacité portante. Cette action ne doit pas être combinée avec celle des charges d'exploitation mentionnées ci-dessus, sauf si ces charges sont supérieures à la valeur prévue des charges d'exploitation.

FONCTION VISUELLE

INCLINAISON FAIBLE		Mises à part les vues "aériennes", les matériaux utilisés n'apportent guère de contribution à la composition esthétique de l'ensemble du bâtiment. Toutefois, le souci de la "cinquième façade" apparaît avec le recours aux toitures-jardins, etc.
---------------------------	--	---

LA TOITURE CHAUDE

DESCRIPTION

La toiture chaude désigne la toiture plate dont l'isolant thermique est placé sur le support sans lame d'air entre les différentes couches.

La membrane d'étanchéité est posée sur l'isolation, avec ou sans couche de désolidarisation selon les cas, et éventuellement lestée.

Dans la plupart des cas, un écran pare-vapeur performant doit être interposé entre le support et l'isolant, en respectant les conditions de mise en oeuvre.

Par toiture chaude, on comprend également les toitures constituées d'éléments qui combinent les fonctions de plancher et d'isolation, par exemple béton cellulaire, panneaux sandwichs, etc.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

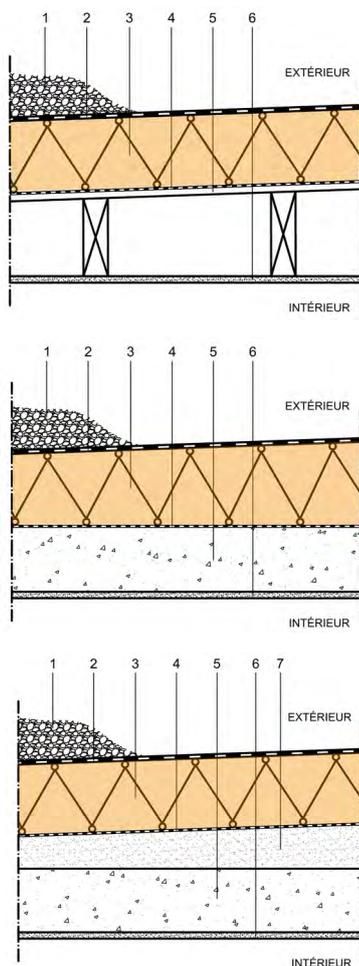
AVANTAGES

- L'isolant thermique, protégé par le pare-vapeur et la membrane d'étanchéité, reste sec ; il conserve ainsi toutes ses caractéristiques thermiques.
- L'isolant thermique étant appliqué à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, protège celle-ci des variations de température, et par conséquent, des dilatations et des contraintes thermiques, du gel et des condensations.
- Ce système d'isolation ne nécessite pas nécessairement de lestage, si l'isolant et la membrane peuvent être fixés mécaniquement ou par collage. Il est dans ce cas relativement léger et peut être appliqué sur des structures existantes qui ne supportent pas une augmentation de charge.
- Lorsque le local couvert est à usage permanent et que le support est de type lourd, ce système augmente l'inertie thermique du local et le rend plus confortable.
- Son entretien étant plus aisé que celui d'une toiture inversée (qui sera abordée ci-après), la toiture chaude est donc particulièrement conseillée lorsque l'environnement est fortement boisé.

INCONVÉNIENTS

- Surtout lorsqu'elle n'est pas lestée, la membrane d'étanchéité est soumise à d'importantes variations de température car elle n'est pas protégée par l'isolant thermique.

- 1 : lestage éventuel
- 2 : membrane d'étanchéité
- 3 : isolant thermique
- 4 : pare-vapeur
- 5 : support
- 6 : plafond
- 7 : béton de pente



Remarque : dans le 1^{er} cas, la pente est réalisée au moyen de cales de hauteurs différentes, tandis que dans le second cas, c'est l'isolant thermique qui forme la pente. Dans le 3^e cas, la pente est réalisée par un béton de pente.

On peut également signaler la technique de projection de mousse polyuréthane directement sur la couche d'étanchéité, la mousse étant ensuite protégée contre les UV par une peinture ; la couche ainsi réalisée est censée également assurer l'étanchéité de la toiture.

Cette technique offre de nombreux avantages :

- légèreté ;
- application par l'extérieur (qui autorise la poursuite des activités dans le bâtiment) : pratique dans le cas d'une rénovation ;
- souplesse d'adaptation à toute forme de toiture et à tous les supports.

Elle présente cependant quelques inconvénients sérieux :

- nécessité d'une entreprise spécialisée, avec un agrément technique ;
- mise en oeuvre délicate et fortement dépendante des conditions climatiques ;
- vieillissement rapide de l'épiderme de protection (peinture), qu'il faut renouveler régulièrement ;
- altérations causées parfois par les oiseaux qui arrachent la mousse et blessent l'épiderme (dont la qualité esthétique devient discutable).

L'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2] détaille la correction de la valeur R à prendre en compte pour une isolation en PUR projetée in situ.

LA TOITURE INVERSÉE

DESCRIPTION

La toiture est dite "inversée" lorsque l'isolation thermique est posée sur l'étanchéité qui, de ce fait, joue le rôle d'écran pare-vapeur. L'isolation thermique, quant à elle, protège l'étanchéité du refroidissement nocturne et des rayons ultraviolets.

Elle doit cependant être lestée par du gravier ou des dalles sur plots, le poids du lestage devant s'opposer au soulèvement ou à la flottaison des panneaux d'isolation thermique ; le lestage protège également les panneaux d'isolation des rayons ultraviolets.

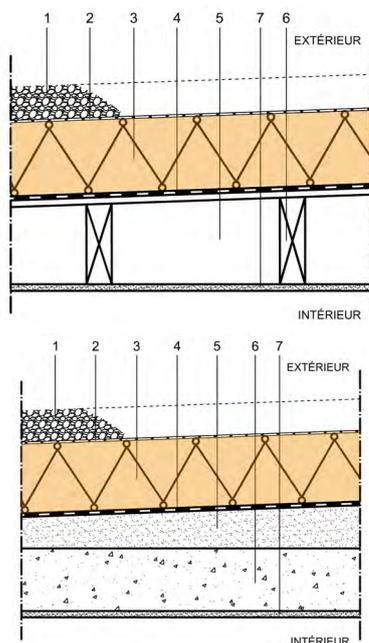
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

AVANTAGES

- Le plancher et l'étanchéité sont protégés contre les variations de températures et contre les influences climatiques (rayonnement solaire, rayonnement nocturne), ainsi que des chocs dus à la chute éventuelle d'objets.
- La toiture inversée est un type de toiture qui permet aisément de réaliser un renforcement a posteriori de l'isolation thermique, et cela même si la toiture comporte déjà une couche d'isolation thermique, devenant ainsi une toiture dite "duo", abordée ci-après.
- La toiture inversée ne nécessite pas d'écran pare-vapeur supplémentaire.

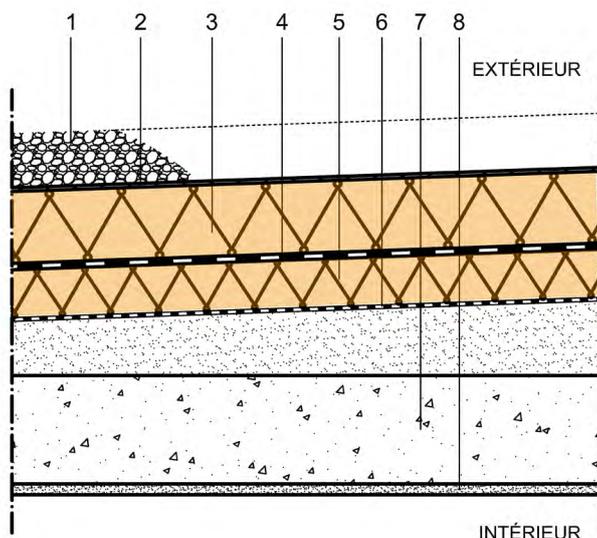
INCONVÉNIENTS

- Le matériau isolant (polystyrène extrudé XPS) disposé sur l'étanchéité, n'est pas protégé des précipitations :
 - exposé à l'humidité et même à l'action du gel, le matériau choisi doit présenter une absorption d'eau négligeable et ne pas être attaqué par l'eau superficielle (dégâts dus à la gelée, par exemple) ;
 - des pertes de chaleur supplémentaires sont dues à l'écoulement de l'eau entre l'isolant et l'étanchéité, au droit des joints entre plaques ou à l'état temporairement humide de l'isolant : l'Annexe 3 (au point 7.2.4) de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2] détaille la procédure de correction du coefficient de transmission thermique (U) pour les toitures inversées.
- La continuité de l'isolation thermique entre la toiture et les parois verticales (relevés) n'est pas toujours aisée, voire parfois impossible.
- L'étanchéité est soumise, plus longtemps qu'une toiture chaude, à un taux d'humidité élevé qui, combiné à une température constante, peut entraîner le développement de micro-organismes.
- Si le support manque d'inertie thermique, il y a un risque d'apparition de condensation par le passage de l'eau (qui se réchauffe) sous l'isolation.



- 1 : lestage éventuel
- 2 : membrane d'étanchéité
- 3 : isolant thermique
- 4 : pare-vapeur
- 5 : support
- 6 : plafond
- 7 : béton de pente

LA TOITURE COMBINÉE OU TOITURE “DUO”



- 1 : lestage
- 2 : natte de protection
- 3 : isolant thermique 1
- 4 : membrane d'étanchéité
- 5 : isolant thermique 2
- 6 : pare-vapeur
- 7 : béton de pente et support
- 8 : plafond

DESCRIPTION

Lorsque l'on désire renforcer l'isolation thermique d'une toiture chaude existante, on peut déposer une couche d'isolation directement sur l'étanchéité, selon le principe de la toiture inversée.

L'isolation thermique de la toiture est ainsi réalisée en deux parties : l'une sous l'étanchéité et l'autre par dessus. Ce type de toiture est une “combinaison” de toiture chaude et de toiture inversée : on l'appelle toiture “combinée” ou encore toiture “duo”.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Par sa combinaison de solutions, la toiture “combinée” ou “duo” peut utilement corriger les inconvénients d'une solution par les avantages de l'autre.

AVANTAGES

- En tant que toiture chaude, l'isolant thermique étant appliqué à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, il protège celle-ci des variations de température et, par conséquent, des dilatations et des contraintes thermiques, du gel et des condensations.
- En tant que toiture inversée, la membrane d'étanchéité et la structure sont protégées des variations climatiques et des chocs dus à la chute éventuelle d'objets.

INCONVÉNIENTS

- La membrane d'étanchéité se retrouve entre deux couches d'isolation thermique : si le pare-vapeur n'est pas performant, elle peut entraîner un ralentissement du flux de vapeur et, par là, la formation éventuelle de condensation interne.
Tout apport d'isolant thermique est favorable mais, si on veut supprimer tout risque de condensation, la résistance thermique de l'isolation apposée sur l'étanchéité doit, en première approche, être au moins le double de celle située en dessous. Si une telle surépaisseur n'est pas réalisable, une vérification de la diffusion de vapeur d'eau doit être simulée.
- Ce système n'est conseillé que lorsque des couches d'isolation très épaisses sont nécessaires.
- Ce système permet de réduire le risque d'apparition de condensation par le passage de l'eau sous l'isolant thermique.

LA TOITURE VERTE

GÉNÉRALITÉS

QUELQUES DÉFINITIONS [CSTC-06]

- **Végétation intensive élaborée** : toutes plantes que l'on peut trouver dans un jardin : gazon, fleurs, arbustes, arbres, etc.
- **Végétation intensive peu élaborée** : gazon et certaines plantes décoratives à croissance lente.
- **Végétation extensive** : lichens, mousses, sédums et certaines plantes vivaces.
- **Substrat** : couche dans laquelle la végétation est plantée ; il s'agit d'un mélange spécialement développé pour les toitures vertes et de masse volumique plus faible que la terre de jardin classique.

Notre paysage urbain, essentiellement minéral et métallique, ne peut plus négliger l'apport du végétal.

La toiture verte est en fait une toiture plate de type chaud ou inversé, rendue accessible (voir figure ci-dessous). Elle est recouverte de végétation et des couches nécessaires au développement de celle-ci : protection de l'étanchéité, drainage, substrat, etc. Il existe différentes sortes de toiture verte en fonction du type et de l'épaisseur des couches constitutives ainsi que de l'usage qui en sera fait.

LES TYPES DE TOITURE VERTE

On distingue trois types de toiture verte dont les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau de la page suivante.

LA TOITURE-JARDIN

La toiture-jardin est recouverte de végétation intensive. C'est une toiture aménagée en espace vert, dont la végétation nécessite un entretien spécifique et régulier.

Elle demande une conception spéciale de la toiture et de sa structure portante parce qu'elle entraîne la mise en oeuvre d'une épaisse couche de terre.

L'importance du substrat de la toiture-jardin conduit à des surcharges permanentes qui sont supérieures à 400 kg/m², auxquelles il faut encore ajouter l'eau qui y est contenue : il est opportun de vérifier que ces surcharges peuvent être acceptées sans risque par la structure de la toiture.

LA TOITURE-JARDIN LÉGÈRE

Elle constitue le cas intermédiaire entre les toitures-jardins et les toitures végétalisées.

L'épaisseur de substrat est réduite afin de limiter le poids, qui varie entre 100 et 400 kg/m².

Les végétations extensives et intensives sont envisageables, à l'exception d'arbres ou d'arbustes de trop grande taille.

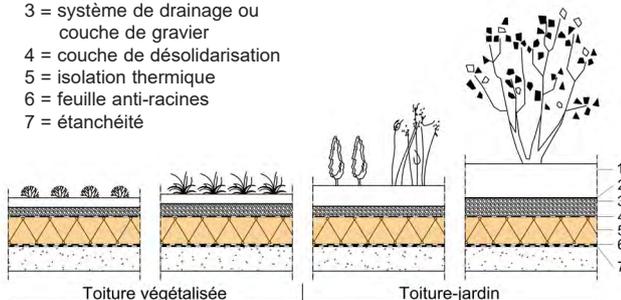
LA TOITURE VÉGÉTALISÉE

Elle est recouverte de végétation extensive. Le substrat est spécialement développé en fonction de cette végétation afin de ne nécessiter qu'une épaisseur très faible, de l'ordre de quelques dizaines de mm de substrat et de ne demander aucun apport d'eau ou d'engrais.

Cette couche représente ainsi une surcharge de l'ordre de 90 kg/m² au maximum (poids lorsqu'elle est humide).

TOITURE VÉGÉTALISÉE ET TOITURE-JARDIN

- 1 = couche de végétation (terre de bruyère, terre arable, etc.)
- 2 = couche filtrante
- 3 = système de drainage ou couche de gravier
- 4 = couche de désolidarisation
- 5 = isolation thermique
- 6 = feuille anti-racines
- 7 = étanchéité



Il faut insister sur le caractère absolument indispensable de toutes ces couches. Elles ont en effet chacune une fonction particulière à assurer.

La couche de plantation (substrat) doit permettre la diffusion de la vapeur d'eau et être aussi légère que possible. Son épaisseur et sa composition doivent être adaptées en fonction des plantes que l'on souhaite voir pousser.

Dans tous les cas, il faut assurer la protection de la membrane d'étanchéité contre les dommages dus aux activités de jardinage.

LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES

	VEGETATION INTENSIVE		VEGETATION EXTENSIVE
	TOITURE-JARDIN	TOITURE-JARDINLÉGÈRE	TOITURE VÉGÉTALISÉE
Épaisseur (indicative)	> 0,25 m	de 0,1 à 0,25 m	< 0,1 m
Surcharge approximative de la toiture	> 400 kg/m ²	100 à 400 kg/m ²	30 à 100kg/m ²
Réalisation en rénovation	souvent non	parfois	oui
Réalisation en bâtiment neuf	à étudier	à étudier	oui
Accessible	oui	oui	non ⁽²⁾
Pente usuelle du support (indicatif) ⁽¹⁾	2 % à 10 %	2 % à 57 %	2 % à 70 %
Entretien de la végétation	important	moyen	limité
Type de végétation	Végétation intensive élaborée : plantes basses, gazon, fleurs, arbustes, arbres...	Végétation intensive peu élaborée : gazon et certaines plantes décoratives à croissance lente	Végétation extensive : lichens, mousses, sédums et certaines plantes vivaces. Substrat spécialement formulé, ne demande aucun apport d'eau ou d'engrais (existe sous la forme de tapis pré-cultivés)

⁽¹⁾ Toitures vertes en pente (NIT 229 [CSTC-06]) : Attention à l'exposition au rayonnement solaire et donc au risque de dessèchement plus élevé, à l'érosion du substrat, au glissement de la végétation, à la sécurité des personnes, à la rétention de l'eau,...

⁽²⁾ Sauf aménagement supplémentaire

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

AVANTAGES

- L'amélioration de la qualité de vie : dans certains quartiers limités en espaces verts, on peut transformer une vue sur un matériau imperméabilisant (par exemple, une membrane bitumineuse) en une vue vers une surface plantée. Le pourcentage d'espaces verts dans les villes augmente, avec comme conséquence des effets positifs sur la qualité de l'air, le développement du biotope animal et végétal et la préservation de la biodiversité.
- L'amélioration de la gestion de l'eau : lors de pluies ou d'orages violents, l'eau tombant sur la toiture plate classique est immédiatement évacuée vers les avaloirs et quasi intégralement rejetée vers les égouts. Dans le cas d'une toiture verte, il existe un effet-tampon : l'eau entre dans les couches de la toiture verte et transite dans celles-ci avant d'atteindre l'avaloir. L'entièreté de la pluie n'est pas rejetée instantanément vers les égouts. En outre, une partie de l'eau est consommée par les plantes ; une autre est rejetée dans l'atmosphère par évapotranspiration et n'atteint donc pas le réseau d'égouttage.
- L'augmentation du confort thermique et acoustique pour les occupants : la terre contribue à l'isolation thermique et acoustique du bâtiment ; l'inertie thermique de ce dernier est également plus importante. La toiture verte permet de limiter les surchauffes et les variations de température de la membrane.

- La protection de l'étanchéité et l'augmentation de sa durée de vie : l'ensemble végétal de la toiture verte recouvre l'étanchéité, qu'elle protège du rayonnement solaire. Au même titre qu'une autre protection (par exemple, gravier), la toiture verte favorise un allongement de la durée de vie de son étanchéité.

INCONVÉNIENTS

- Complexe d'étanchéité difficilement accessible une fois la toiture achevée ;
- Augmentation de la charge appliquée à la structure de la toiture et transmise aux fondations ;
- Entretien annuel et choix judicieux de la végétation à prévoir ;
- Soins à apporter à la réalisation de l'étanchéité et à la jonction des lés, points de passage préférentiels pour les racines en cas de défaut.

Il est difficile de tester la résistance au feu propre aux toitures vertes. En effet, cela dépend du substrat (composition et épaisseur), du type de végétation utilisée et de la saison (la végétation est plus sèche en été). Un compartimentage des zones de végétation par des matériaux inertes, non organiques (dalles en pierre, sable, gravier...) est conseillé, ainsi qu'une composition de substrat à base de matériaux incombustibles.

L'annexe 3 détaille le comportement au feu des toitures.

LES PARTICULARITÉS DE L'ÉTANCHÉITÉ DE LA TOITURE VERTE

Les toitures vertes se caractérisent par un complexe d'étanchéité inaccessible ou difficilement accessible une fois que la toiture est réalisée. Des réparations éventuelles s'avèrent difficiles et coûteuses : il est donc important de prévoir et de réaliser le complexe étanchéité avec le plus grand soin.

Il faut tenir compte de l'état de rugosité de la chape lors de la pose de l'étanchéité afin d'éviter que des irrégularités trop importantes ne provoquent le poinçonnement de la membrane suite à la charge de la toiture verte (voir NIT 229 [CSTC-06]).

Outre la présence des racines, il faut éviter de perforer l'étanchéité suite à un choc mécanique : la perforation permettrait ainsi le passage des racines, que l'on essaie d'éviter.

Les étanchéités bitumineuses n'ont pas une résistance intrinsèque aux racines. Cependant, différents procédés permettent d'améliorer cette résistance :

- des adjuvants chimiques peuvent être ajoutés au bitume de manière à lui conférer cette résistance ;
- une pose en revêtement bicouche et en adhérence totale augmente la résistance du complexe d'étanchéité aux racines.

Les recouvrements des étanchéités bitumineuses doivent toujours être soudés.

LES MESURES SUIVANTES PEUVENT ÊTRE UTILES OU NÉCESSAIRES :

- interdire tout accès jusqu'à la pose de la toiture verte ;
- prévoir des protections temporaires lorsque l'accès doit rester possible ;
- poser une première couche d'étanchéité afin d'assurer la mise hors eau du bâtiment, et une deuxième immédiatement avant la pose de la toiture verte ;
- réaliser une mise sous eau de l'étanchéité entre la pose de l'étanchéité et la pose de la toiture verte ;
- dans la mesure du possible, faire poser la toiture verte, ou la première couche de celle-ci, par l'étancheur ;
- prévoir une couche de protection mécanique.

L'expérience montre que les étanchéités synthétiques ont une meilleure résistance intrinsèque aux racines à condition d'avoir des recouvrements homogènes, c'est-à-dire d'un même matériau.

Afin de limiter les dommages en cas de fuite dans une toiture chaude, il est conseillé de compartimenter l'étanchéité et l'isolation thermique en zones de l'ordre de maximum 100 m², de manière à pouvoir facilement déplacer les terres.

Cependant, si le compartimentage de l'isolation thermique est bien réalisé, l'eau va rester emprisonnée dans les compartiments et va humidifier de façon permanente l'isolant thermique. Il faut donc prévoir un système de détection de l'humidité.

L'isolant doit posséder une résistance à la compression adaptée à la charge permanente de la toiture. Pour les toitures à végétation extensive, cela ne pose en général pas de problème, sauf en cas de charges localisées (par exemple, poinçonnement de bacs à fleurs). Par contre, pour les toitures inversées, l'isolant est directement en contact avec les sous-couches de la toiture verte. Il devra donc présenter une haute résistance à l'eau et aux différentes attaques chimiques du sol. Seul le polystyrène extrudé (XPS) est actuellement utilisé pour les toitures inversées. (D'après la NIT 229 [CSTC-06]).

LA CONCEPTION ET LA COMPOSITION DE LA TOITURE VERTE

Il faut insister sur la nécessaire collaboration entre les divers acteurs (auteur de projet, entrepreneur d'étanchéité, entrepreneur de jardin) afin de mettre au point les détails de finition qui déboucheront sur une réalisation parfaitement adaptée à cette technique : hauteur des rives, des jonctions, des arrêts, installation éventuelle de conduites pour l'arrosage, etc.

La toiture verte doit être, selon son type, composée de certains des éléments suivants :

- la protection mécanique de l'étanchéité ;
- le drainage et la filtration ;
- la rétention d'eau ;
- le substrat ;
- la végétation.

LA PROTECTION MÉCANIQUE DE L'ÉTANCHÉITÉ

Il peut être nécessaire de protéger mécaniquement l'étanchéité et les relevés pour éviter les dégâts causés par :

- la circulation sur la toiture et le dépôt éventuel de matériaux sur celle-ci lorsque la toiture verte n'a pas été mise en place ;
- les outils utilisés pour l'entretien de la toiture verte.

LE DRAINAGE ET LA FILTRATION

La couche de drainage doit assurer l'évacuation de l'eau de pluie excédentaire dont l'accumulation peut favoriser les infiltrations dans le bâtiment et peut être défavorable à la toiture verte.

La couche de drainage est généralement accompagnée d'une couche de filtration qui a pour but d'éviter le colmatage du drainage par des particules fines provenant du substrat.

Le choix de la couche de drainage dépend du type de toiture verte et donc de la quantité d'eau qu'il faut accumuler.

Présentant comme avantages une faible épaisseur, une facilité de pose et une grande légèreté, certains matériaux combinent directement les fonctions de drain et de filtre :

- la couche drainante est le plus souvent constituée par des plaques gaufrées en matière synthétique, par des panneaux rainurés en polystyrène extrudé ou par des panneaux en billes de polystyrène collées ;
- la couche filtrante se compose d'un non tissé synthétique ou d'un voile de verre.

NÉCESSITÉ D'UNE RÉTENTION D'EAU POUR LA VIABILITÉ DE LA VÉGÉTATION

Si le système de rétention d'eau est asséché (ou n'a pas été prévu), les plantes assoiffées vont envoyer leurs racines à la recherche d'eau ou de vapeur d'eau. Les racines risquent alors de pénétrer dans le complexe de toiture, en traversant soit un recouvrement, soit la membrane d'étanchéité en partie courante.

La couche drainante peut être constituée par :

- des matériaux retenant l'humidité, comme les granulats d'argile expansée, de schiste expansé ou de pouzzolane (en épaisseur minimale de 10 cm) ;
- des matériaux ne retenant pas l'humidité, comme les graviers (en épaisseur de 10 cm), les plaques gaufrées en matière synthétique, les plaques rainurées en polystyrène extrudé, les panneaux en billes de polystyrène collées, les nattes en fibres polyamides, etc.

Outre les qualités de perméabilité à l'eau et d'imputrescibilité, les matériaux constituant le filtre doivent présenter une bonne résistance au déchirement et au poinçonnement.

Les couches filtrantes sont constituées par :

- des nattes tissées ou non tissées à base de fibres synthétiques (polypropylène ou polyester) d'une porosité adaptée au sol du substrat ;
- des nattes à base de fibres de verre liées au moyen de résines synthétiques ;
- des agro-mousses (fournies en blocs ou produites sur place) dont le pouvoir filtrant se complète d'un pouvoir de rétention d'eau.

LA RÉTENTION D'EAU

La couche de rétention d'eau doit assurer une réserve d'eau suffisante pour la survie et la croissance de la végétation.

La rétention d'eau peut être assurée soit au niveau du drainage, soit au niveau du substrat, soit dans une couche séparée ne servant qu'à cet effet (par exemple des granulats d'argile expansée placés entre le filtre et le drainage).

L'ENRACINEMENT DES PLANTES

La végétation est plantée dans le substrat qui remplit les fonctions suivantes :

- fixation des plantes ;
- stockage d'eau, d'air, d'éléments minéraux et organiques, d'oligo-éléments, tous nécessaires à la survie des plantes.

Par opposition à la terre de jardin, le substrat est plus léger afin de limiter les charges permanentes sur la toiture ; ses caractéristiques assurent en outre un développement idéal de la végétation.

LA VÉGÉTATION

La végétation constitue la partie visible de la toiture verte. C'est le type de végétation qui détermine la conception du système.

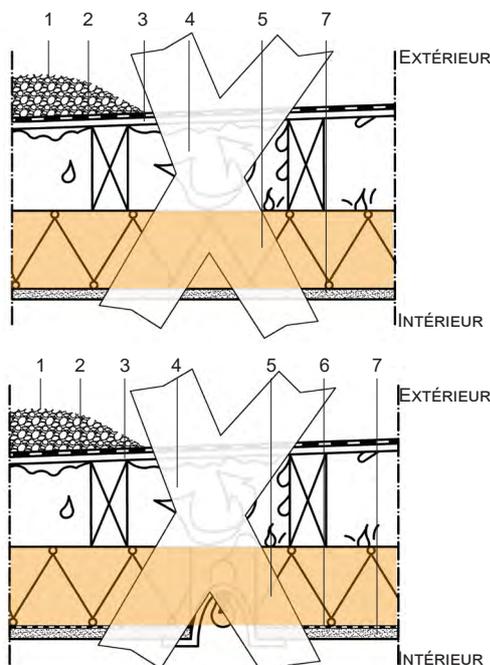
DÉTERMINATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UNE TOITURE VERTE

La détermination des performances thermiques d'une toiture verte est très complexe, de par l'existence du transfert de chaleur et d'humidité au travers des différentes couches constitutives. Ses performances thermiques, variables

LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES

dans le temps, sont fonction de la végétation, de la contenance en eau du substrat, du drainage, etc. La conductivité thermique λ de la terre est de 2 W/mK (voir Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2]).

LES TYPOLOGIES DES TOITURES À DÉCONSEILLER



- 1 : lestage éventuel
- 2 : membrane d'étanchéité
- 3 : support
- 4 : lame d'air ventilée
- 5 : isolant thermique
- 6 : pare-vapeur déficient
- 7 : plafond

Dans le cas où la couche d'air ne serait pas ventilée du tout par de l'air extérieur (ni intérieur), on pourrait considérer que la disposition en toiture froide serait acceptable.

S'impose toutefois la condition impérative que le pare-vapeur interposé du côté chaud de l'isolant thermique soit parfaitement mis en place, donc de préférence sur un support continu.

La difficulté pratique de cette mise en oeuvre justifie que nous ne retiendrons pas cette disposition dans la suite du présent ouvrage.

LA TOITURE FROIDE

La toiture froide est une toiture plate dont l'isolant thermique est séparé du support de l'étanchéité par une lame d'air ventilée au moyen de l'air extérieur.

Jadis régulièrement mis en oeuvre, ce système est aujourd'hui à proscrire. Les toitures neuves réalisées suivant ce principe sont considérées de conception incorrecte.

INCONVÉNIENTS

Il s'agit d'un système dépassé qui peut causer des dégâts considérables résultant essentiellement de la condensation interne due aux fuites d'air et à une température des matériaux inférieure à la température de l'air.

Lorsque le pare-vapeur est inexistant, déficient ou mal placé, la vapeur d'eau qui migre de l'intérieur vers l'extérieur se condense sous l'étanchéité, sur le support d'étanchéité. La ventilation réelle de la lame d'air est souvent plus faible que celle nécessaire au séchage des condensats.

Lorsque le plafond n'est pas étanche à l'air, l'air intérieur chaud est aspiré dans l'espace ventilé et la vapeur favorise la condensation d'autant plus que les flux d'air sont importants.

Cette condensation peut entraîner l'altération de l'isolant thermique et la suppression de son efficacité, la pourriture des supports de l'étanchéité, le gel des matériaux, le décollement ou le ramollissement des matériaux agglomérés, le développement de moisissures, etc.

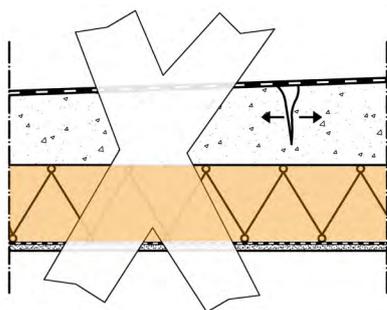
La toiture froide est à déconseiller car la mise en oeuvre d'un pare-vapeur efficace est particulièrement difficile et les problèmes de condensation interne presque inévitables. De plus, si le support est en béton, celui-ci travaille thermiquement, ce qui peut engendrer des dégradations.

LES AUTRES COMPOSITIONS DE TOITURE

Il faut également éviter de placer l'isolant thermique à la face inférieure du plancher de toiture ou entre le plancher et le béton de pente.

Tout comme dans la toiture froide, le support de ces toitures reste froid et est exposé à de plus grandes variations de température.

ISOLATION SOUS LE PLANCHER DE LA TOITURE

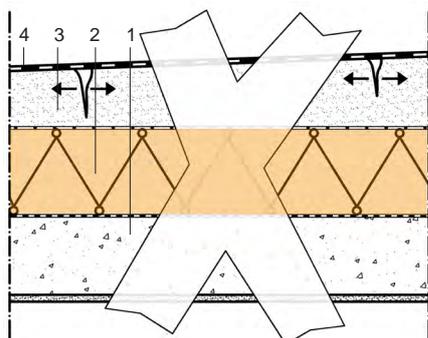


L'isolation est placée à la face inférieure du plancher de toiture et combinée ou non avec une plaque de plâtre, par exemple, et un écran pare-vapeur.

Ce système est à déconseiller car le local perd l'inertie thermique du support, lequel est exposé à de plus grandes variations de température. Il subit donc des contraintes thermiques et peut se fissurer. De plus, l'humidité de la construction migre dans le matériau d'isolation.

Il est à noter que ce système a été la première évolution des toitures plates isolées. On en trouve encore en place lors de rénovation.

BÉTON DE PENTE SUR L'ISOLATION



- 1 : support
- 2 : isolation
- 3 : pente
- 4 : étanchéité

L'isolation se situe entre le plancher de la toiture et le béton de pente.

Ce système est déconseillé car la rétention d'humidité de construction et l'humidification de l'isolation sont inévitables. Tout comme dans le cas précédent, des contraintes thermiques importantes peuvent entraîner la fissuration du béton de pente et de l'étanchéité. Ce problème peut être résolu si l'on place de l'isolation thermique sur le béton de pente.

LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES

LE SUPPORT DU COMPLEXE ISOLANT - ÉTANCHÉITÉ	101
LA PENTE.....	101
LES FORMES DE PENTE.....	102
L'ÉLÉMENT PORTANT	103
<i>Les dalles monolithiques ou les éléments préfabriqués rendus monolithiques.....</i>	103
<i>Les éléments préfabriqués sans couche de compression.....</i>	103
<i>Les planchers en bois ou dérivés.....</i>	103
<i>Les tôles profilées métalliques.....</i>	103
<i>Les panneaux de toiture composites avec isolation thermique intégrée.....</i>	104
LE PARE-VAPEUR.....	105
LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR.....	105
LES TYPES DE PARE-VAPEUR.....	105
LA POSE DU PARE-VAPEUR	107
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	108
L'ISOLATION THERMIQUE.....	108
LES PERFORMANCES PRINCIPALES DES MATÉRIAUX ISOLANTS.....	108
<i>Les sollicitations mécaniques externes.....</i>	108
<i>La compatibilité avec le support.....</i>	109
<i>La compatibilité avec la composition de toiture.....</i>	109
<i>Le comportement au feu.....</i>	109
<i>Le comportement en présence d'humidité.....</i>	109
LA POSE DE L'ISOLANT THERMIQUE.....	110
<i>Le collage au bitume chaud.....</i>	110
<i>La pose à la colle bitumineuse à froid.....</i>	110
<i>La pose à la colle synthétique à froid.....</i>	110
<i>La fixation mécanique.....</i>	111
L'ÉTANCHÉITÉ DE TOITURE.....	113
LES MEMBRANES BITUMINEUSES	113
<i>La couche supérieure.....</i>	113
<i>La (les) sous-couche(s) éventuelle(s).....</i>	113
<i>Les méthodes de pose.....</i>	113
LES MEMBRANES SYNTHÉTIQUES	114
LES FEUILLES MÉTALLIQUES	114
L'ASPHALTE COULÉ.....	114
LES PROTECTIONS.....	116
LES PROTECTIONS LÉGÈRES	116
LES PROTECTIONS LOURDES.....	116

LE SUPPORT DU COMPLEXE ISOLANT - ÉTANCHÉITÉ

Tant en construction neuve qu'en rénovation, la nature du support du complexe isolant-étanchéité est généralement définie.

La nature du support influence donc les techniques choisies pour réaliser l'isolation thermique et l'étanchéité.

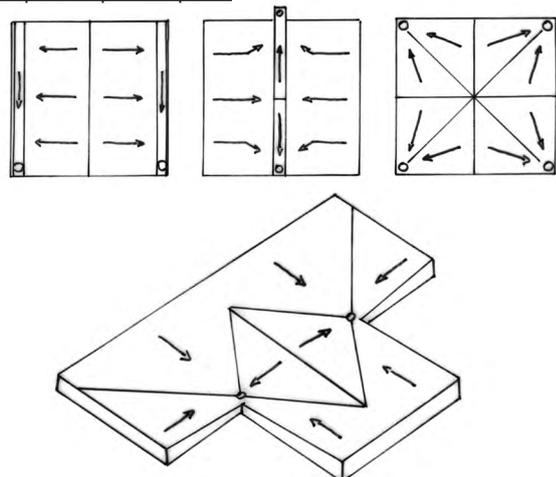
Les supports sont à considérer en fonction de :

- leur capacité portante ;
- leurs déflexions éventuelles (une déflexion étant une déformation ponctuelle formant un creux) ;
- leur coefficient de transmission thermique ;
- leur comportement hygrothermique ;
- leur étanchéité à l'air ;
- leur fluage.

REMARQUES

L'architecte doit d'abord réaliser un plan général de configuration des pentes pour gérer les surépaisseurs, les rehausses, les acrotères, etc. Ce plan doit être compatible avec les joints de tassement et de dilatation du bâtiment.

Exemples de plan de pente :



REMARQUES

La pente d'une toiture plate est donnée soit par l'élément portant lui-même, soit par une forme de pente rapportée, pouvant être l'isolant thermique, sur laquelle le complexe d'étanchéité est posé. Le calcul de la valeur U d'un élément de construction d'épaisseur variable est détaillé dans l'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 (au point 7.4.2 - Décomposition en formes de base) [GW -16-2].

LA PENTE

La pente doit être réalisée de façon à ce que toute l'eau de la toiture puisse s'évacuer.

Si une stagnation d'eau réduite doit être tolérée, sans quoi il serait impossible de réaliser pratiquement une toiture qui soit acceptable, les stagnations d'eau importantes sur une toiture présentent différents inconvénients [CSTC-00] :

- dans le cas de structures porteuses trop légères, le poids supplémentaire entraîne des déformations accrues ;
- les fuites éventuelles peuvent causer de graves infiltrations d'eau ;
- le gel engendre des efforts de traction dans l'étanchéité ;
- les fuites sont plus difficiles à réparer aux endroits humides ;
- des saletés peuvent se concentrer et attaquer la protection contre les rayons ultraviolets.

La pente d'une toiture plate est comprise entre des valeurs minimales et maximales qui dépendent des facteurs suivants [ARCH-13] :

- le type de toiture plate :
 - *toiture chaude* : pente minimale de 2 % ;
 - *toiture inversée* : pente minimale de 2 % ; sauf pour la toiture-jardin où on renonce à toute pente afin de retenir les eaux de pluie et d'arrosage et d'obtenir un niveau d'eau uniforme ;
- le type de protection :
 - *gravier* : pente maximale de 5 % afin d'empêcher le déplacement du gravier ;
 - *toiture-jardin* ;
- le type de fixation de la membrane : lorsque la membrane est fixée à l'aide de colle bitumineuse à froid, la pente maximale admissible est de 15 %, à cause de la plasticité de la colle.

De façon générale, dans les nouvelles constructions, la pente doit être de préférence d'au moins 2 % en tout point, et d'au moins 1 % dans les chéneaux réalisés avec le matériau d'étanchéité (0,5 % pour les chéneaux métalliques).

LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES

LES FORMES DE PENTE [CSTC-00]

La pente peut être réalisée de différentes manières reprises dans le tableau ci-dessous.

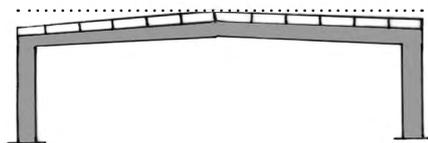
RÉALISATION DU PLANCHER DE TOITURE EN PENTE



Cette solution évite d'avoir recours à une pente supplémentaire et offre l'avantage de réduire le poids de la forme de pente ainsi que de limiter l'humidité de construction. En pratique, toutefois, il n'est pas toujours possible de réaliser une parfaite évacuation des eaux sans prévoir localement une forme de pente supplémentaire.

- Risque de stagnation d'eau : réel
- Augmentation du poids : nulle
- Augmentation de l'humidité de construction : nulle
- Pouvoir isolant par rapport au pouvoir isolant total : faible
- Niveau de compétence requis pour l'exécution : élevé

ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS POSÉS EN PENTE



Les pentes réalisées à l'aide d'éléments préfabriqués se rencontrent le plus souvent dans les bâtiments industriels, où ces éléments sont posés sur une structure porteuse - elle-même en pente - en béton, en acier ou en bois pour les éléments de toiture légers.

- Risque de stagnation d'eau : faible
- Augmentation du poids : nulle
- Augmentation de l'humidité de construction : nulle
- Pouvoir isolant par rapport au pouvoir isolant total : bon si béton cellulaire
- Niveau de compétence requis pour l'exécution : normal

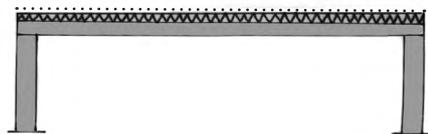
POSE D'UNE FORME DE PENTE



La mise en oeuvre d'une forme de pente permet une bonne évacuation des eaux, quel que soit le type de plancher de toiture, mais augmente le poids de l'ensemble et peut renfermer de grandes quantités d'humidité de construction, surtout en cas de forte surépaisseur. Une forme de pente en charpente est également possible. La forme de pente doit être considérée comme un élément du plancher de toiture.

- Risque de stagnation d'eau : très faible
- Augmentation du poids : importante
- Augmentation de l'humidité de construction : importante
- Pouvoir isolant par rapport au pouvoir isolant total : faible
- Niveau de compétence requis pour l'exécution : élevé

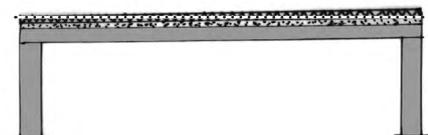
UTILISATION D'UNE ISOLATION À PENTE INTÉGRÉE OU DE GRANULATS LIÉS AU BITUME



Cette isolation offre l'avantage de n'occasionner qu'un léger supplément de poids et de ne pas renfermer une humidité de construction. Dans le cas de longues lignes de pente, les épaisseurs d'isolation peuvent toutefois devenir localement importantes. L'écran pare-vapeur éventuel doit toujours être placé sous l'isolation.

- Risque de stagnation d'eau : faible
- Augmentation du poids : très faible
- Augmentation de l'humidité de construction : nulle
- Pouvoir isolant par rapport au pouvoir isolant total : bon - très bon
- Niveau de compétence requis pour l'exécution : très élevé

COMBINAISON D'UNE ISOLATION À PENTE INTÉGRÉE ET D'UNE FORME DE PENTE



Cette combinaison des deux solutions précédentes est relativement légère et contient moins d'humidité de construction que le béton de pente.

Attention : pour obtenir une isolation thermique optimale, il faut que les composants puissent sécher vers l'intérieur, ce qui n'est pas le cas lorsque la mise en oeuvre s'effectue sur une étanchéité existante.

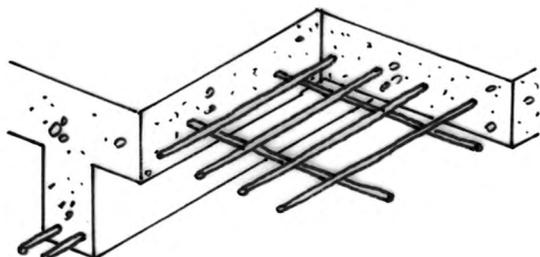
- Risque de stagnation d'eau : très faible
- Augmentation du poids : limitée
- Augmentation de l'humidité de construction : limitée
- Pouvoir isolant par rapport au pouvoir isolant total : bon
- Niveau de compétence requis pour l'exécution : très élevé

L'ÉLÉMENT PORTANT [CSTC-00] [ARCH-13]

LES DALLES MONOLITHIQUES OU LES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS RENDUS MONOLITHIQUES

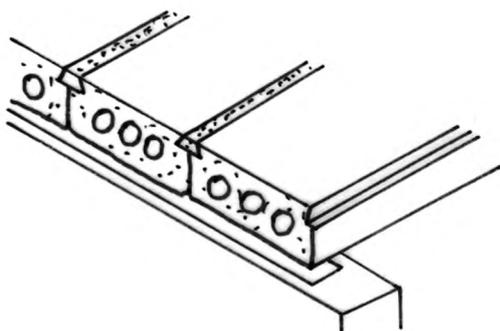
Les supports monolithiques peuvent être constitués :

- d'une dalle de béton coulé sur place donnant la pente ou d'une chape de pente coulée sur le support de structure principal ;
- des éléments préfabriqués en béton ou en terre cuite, solidarisés par un béton de solidarisation.



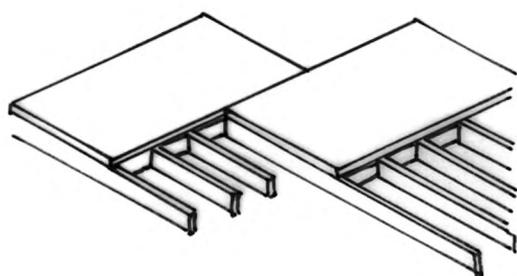
Les dalles en béton cellulaire diffèrent des hourdis en béton. Elles participent à l'isolation thermique et offrent une résistance thermique intéressante lorsque la toiture est de type inversée. De fortes épaisseurs sont néanmoins nécessaires pour atteindre les performances thermiques réglementaires ($U_{\max} \leq 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$), épaisseurs bien trop importantes pour respecter la valeur U.

Il faut faire attention à ce type de toiture auto-isolante en cas d'humidité importante (classe de climat III et IV) et en l'absence de pare-vapeur car les armatures risquent de se corroder.



LES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS SANS COUCHE DE COMPRESSION

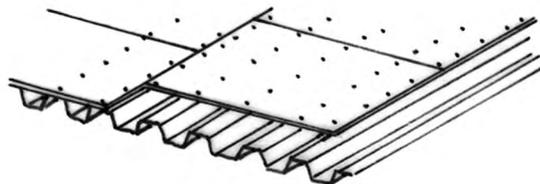
- Les hourdis en béton peuvent contenir une quantité importante d'humidité ; ils doivent être suffisamment secs en surface avant d'entamer les travaux de toiture.
- Les joints longitudinaux de ces éléments doivent toujours être remplis tant pour des raisons structurelles qu'afin de rendre le support de toiture étanche à l'air mais aussi pour améliorer la planéité globale de la surface.



LES PLANCHERS EN BOIS OU DÉRIVÉS

Ils peuvent être :

- des planches ou voliges en bois : tous les éléments en bois doivent être traités contre les moisissures et les insectes avant d'être mis en oeuvre. Les produits de traitement utilisés doivent être compatibles avec les autres matériaux mis en oeuvre ;
- des panneaux de particules et les panneaux multiplex : ils doivent avoir une épaisseur supérieure ou égale à 18 mm et un collage résistant à l'eau ;
- des panneaux OSB : leur collage doit être résistant à l'eau ;
- des panneaux en fibres-ciment ;
- des panneaux à base de copeaux de bois agglomérés au ciment.



LES TÔLES PROFILÉES MÉTALLIQUES

Il faut veiller :

- au choix des tôles profilées à utiliser, qui doit résulter d'une étude de stabilité ;

RÉNOVATION [ARCH-13]

Le support du complexe isolant-étanchéité est déterminant dans le choix de la technique de rénovation de la toiture.

• Connaître la nature du support

Dans le cas d'un bâtiment existant dont on souhaite améliorer l'isolation thermique, la nature du support influence nécessairement le choix des techniques de couverture à adopter, principalement en matière d'accrochage et de protection.

Il faut être attentif à éviter une condensation dans le support en dimensionnant correctement l'isolant thermique et le pare-vapeur.

• Connaître la résistance du support

Lorsque la toiture à améliorer est déjà lestée, on peut estimer que le support est capable de supporter un lestage et donc la récupération de l'ancien lestage ou la pose d'un nouveau sont possibles.

Dans le cas contraire, la pose d'un lestage nécessite de vérifier la capacité portante du support.

• Connaître l'état du support :

- la pente doit être suffisante ;
- la flèche du support doit être vérifiée : si la flèche est anormale (surcharge excessive, fluage, humidité excessive, etc.), il convient de supprimer la cause du désordre, d'assainir le support ou de le remplacer et de corriger les contre-pentes lorsque l'étanchéité ne supporte pas les stagnations ;
- s'il existe des traces d'humidité sous la toiture, il faut en déterminer la cause exacte, vérifier si cette cause existe encore, vérifier l'état du support par un ou des sondages, réparer ou remplacer les parties altérées ;
- un examen de la face inférieure du support, lorsqu'elle est visible, permet de détecter certaines faiblesses : fissuration, corrosion, traces d'attaque par les insectes, moisissures, taches d'humidité.

- à l'épaisseur nominale des tôles (coating et galvanisation éventuels compris) ;
- à la stabilité et à la planéité du plancher de toiture, imposant que :
 - les tôles profilées reposent de préférence sur trois points d'appui au minimum ;
 - les tôles profilées soient disposées en quinconce ;
 - les tôles profilées soient soutenues sur tout le pourtour de la toiture ;
 - les tôles profilées soient fixées les unes aux autres au moins tous les 0,5 m dans les joints longitudinaux ;
 - les tôles profilées soient libres de toute tension lors de leur mise en oeuvre ;
- à l'étanchéité à l'air des ouvertures créées par les ondes des tôles à hauteur des rives ;
- aux joints entre les tôles profilées, qui pénalisent la résistance à la diffusion et la perméabilité à l'air des tôles ;
- à l'accumulation d'eau dans le creux des ondes pendant l'exécution ;
- au pontage des ondes : l'épaisseur de l'isolation doit être suffisante et dépend du type d'isolant choisi ;
- au traitement de surface des tôles profilées (durabilité et aspect).

LES PANNEAUX DE TOITURE COMPOSITES AVEC ISOLATION THERMIQUE INTÉGRÉE

- Le plancher est perméable à l'air du fait de la présence de joints entre les éléments du plancher.
- Les panneaux sandwichs de toiture avec âme isolante appartiennent généralement, dès la fabrication, à la classe de pare-vapeur E1.
Les dispositions relatives à la résistance au passage de la vapeur d'eau, à prendre en fonction de la classe de climat intérieur, sont prévues dans l'ATG des panneaux.
- Lorsque l'étanchéité est fixée mécaniquement, il faut veiller à ce que les joints entre les éléments sandwichs soient bien étanches à l'air (tant les points entre les éléments que les points entre appuis).
L'exécution est délicate et doit se faire conformément aux prescriptions stipulées dans l'ATG des éléments.

RECOMMANDATIONS

Pour assurer le bon comportement des compositions de toiture, il convient de veiller à la siccité, la planéité, la rugosité de surface ainsi qu'à la cohésion et à l'étanchéité à l'air du support.

Consulter à ce sujet la NIT 215 du CSTC "La toiture plate : Composition - Matériaux - Réalisation - Entretien" [CSTC-00].

LE PARE-VAPEUR

La toiture plate nécessitant d'office une étanchéité totale à l'extérieur, ne répond pas au principe général de la constitution d'une enveloppe vis-à-vis du transfert de vapeur, à savoir être de plus en plus perméable à la vapeur depuis l'intérieur vers l'extérieur.

Le pare-vapeur est donc ici pratiquement toujours nécessaire pour empêcher toute migration de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi de toiture plate.

LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR

Lorsque le plancher de toiture est perméable à l'air, l'écran pare-vapeur qui y est fixé directement améliore la résistance au vent.

Sur une toiture inversée, la fonction d'écran pare-vapeur est remplie par l'étanchéité qui est située sous l'isolation thermique.

LES TYPES DE PARE-VAPEUR

Le tableau de la page suivante [CSTC-00] présente les données moyennes calculées pour chaque type de pare-vapeur à utiliser en fonction des caractéristiques du plancher de toiture, de l'isolation thermique et de la classe de climat intérieur.

Ces données peuvent servir de solutions alternatives à des calculs plus détaillés.

LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES

SUPPORT OU FORME DE PENTE	Classe du climat intérieur	Mousses synthétiques		Laine minérale MW Perlite EPB Liège ICB		Verre cellulaire CG
		Technique de pose de l'étanchéité (k)				
		M (a)	L/T/P	M (a)	L/T/P	
Béton coulé in situ, éléments préfabriqués en béton (b) (c)	I	E3	E3	E3	E3	(h)
	II	E3	E3	E3	E3	(h)
	III	E3	E3	E3	E3	(h)
	IV	(j)	E4	(j)	E4	(d)
Voligeage ou panneaux à base de bois résistant (e) (f)	I	-	-	-	-	-
	II	E1 (g)	E1 (g)	E2	E2	(h)
	III	E2	E2	E3	E3	(h)
	IV	(j)	E4	(j)	E4	(d)
Tôles profilées métalliques	I	(i)	(i)	-	-	-
	II	E1 (g)	E1 (g)	E2	E2	(h)
	III	E2	E2	E3	E3	(h)
	IV	(j)	E4	(j)	E4	(d)
Panneaux sandwiches autoportants	I	Ces panneaux appartiennent généralement à la classe de pare-vapeur E1. Les dispositions relatives à la résistance au passage de la vapeur d'eau sont prévues dans l'ATG des panneaux.				
	II					
	III					
	IV	Non autorisé				

(a) Afin d'éviter un «effet de pompage» résultant de l'action du vent, l'étanchéité à l'air du complexe toiture dont le support est perméable à l'air doit toujours être assurée.

(b) Pour la rénovation des toitures avec un plancher de toiture étanche à l'air en béton sec, on ne prévoit pas de pare-vapeur dans les classes de climat intérieur I, II et III.

(c) Dans les classes de climat intérieur I, II et III, on ne pose pas d'écran pare-vapeur complémentaire sur les planchers de toiture en béton léger sans couche d'isolation thermique complémentaire, si la membrane d'étanchéité est adhérente ou lestée. Dans le cas contraire, il est nécessaire de rendre étanches les joints entre les éléments en béton. Dans des climats de la classe IV, une condensation résiduelle annuelle peut entraîner des dégâts aux éléments, de sorte qu'une isolation thermique complémentaire posée sur un pare-vapeur non perforé est indispensable.

(d) Pour les bâtiments de la classe de climat IV, il convient d'examiner, avec le fabricant de l'isolation, si un pare-vapeur complémentaire est éventuellement nécessaire.

(e) Préalablement au collage d'un isolant thermique au moyen de bitume sur un plancher en bois, les joints (y compris le joint périphérique) sont rendus étanches au moyen d'une membrane du type P 150/16. Lorsque les joints de cette membrane sont collés, celle-ci peut être assimilée à un pare-vapeur de la classe E2.

(f) Lorsque l'isolation est posée en panneautage, les joints de ce dernier ainsi que les joints aux rives sont rendus étanches par la pose d'une bande de «pontage».

(g) La résistance à la diffusion de vapeur des panneaux d'isolation pourvus d'un parement (type aluminium ou voile de verre bitumé présent sur les deux faces) équivaut au minimum à celle offerte par un pare-vapeur de classe E1, lorsque les panneaux sont à épaulement sur les quatre bords et qu'ils sont mis en oeuvre sur un support permettant une bonne fermeture des emboîtements.

(h) La pose d'un écran pare-vapeur n'est pas requise si les joints entre les panneaux d'isolation sont entièrement remplis de bitume (voir l'ATG pour cette application).

(i) Dans le cas d'une isolation en PF, on pose une couche de désolidarisation continue.

(j) La fixation mécanique au travers du pare-vapeur n'est pas autorisée en classe de climat IV.

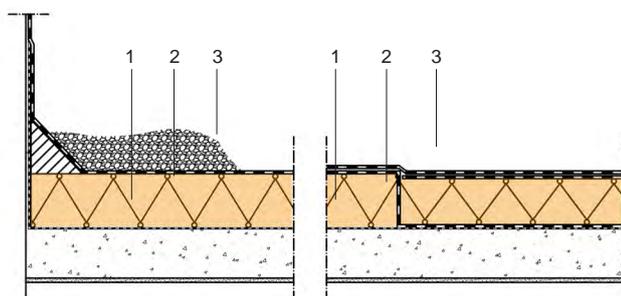
(k) Différentes techniques de pose existent pour les couches d'étanchéité : fixation mécanique (M), en indépendance (L), en adhérence totale (T) et en semi-indépendance (P).

**DONNÉES MOYENNES CALCULÉES POUR
CHAQUE TYPE DE PARE-VAPEUR À UTILISER
EN FONCTION DES CARACTÉRISTIQUES DU
PLANCHER DE TOITURE, DE L'ISOLATION
THERMIQUE ET DE LA CLASSE DE CLIMAT
INTÉRIEUR [CSTC-96]**

REMARQUES

- **Compatibilité** : lorsque l'étanchéité est de type bitumineux, on pose de préférence un pare-vapeur bitumineux. Lorsque l'étanchéité est de type synthétique, on pose de préférence un pare-vapeur synthétique. Les deux types de matières peuvent être combinés à condition d'être compatibles entre eux, car ils sont en contact au droit des rives et des lignes de compartimentage de l'isolant thermique.
- **Rénovation** : l'étanchéité existante peut être conservée et faire office de pare-vapeur. Dans ce cas, il convient de vérifier si ce pare-vapeur présente une étanchéité suffisante à la vapeur.
- **Panneaux sandwichs** :
 - lorsque la classe du climat intérieur du bâtiment protégé ne dépasse pas la classe III, les panneaux doivent présenter une résistance à la diffusion de vapeur μ d au moins équivalente à celle d'un pare-vapeur de classe E1. Dans ce cas, les joints entre les panneaux doivent être munis d'emboîtement. Les joints doivent être mastiqués ou pontés pour éviter les condensations parasites ;
 - lorsque le climat intérieur du bâtiment protégé est de la classe IV, il faut prévoir un pare-vapeur de classe supérieur ou égale à E3, sous les panneaux et sans fixation mécanique.

RACCORDEMENT DE L'ÉCRAN PARE-VAPEUR ET DE L'ÉTANCHÉITÉ [CSTC-00]



- 1 : écran pare-vapeur
2 : isolation
3 : étanchéité

COMPARTIMENTAGE DE L'ISOLATION THERMIQUE

Compartimentage de l'isolation thermique :

La présence du pare-vapeur a pour effet de retarder la découverte d'éventuelles infiltrations d'eau, de ralentir, voire d'empêcher le séchage de l'humidité occluse. On peut remédier à cette dernière difficulté sur chantier, en compartimentant l'isolation thermique en fin de chaque journée de travail.

Ce compartimentage s'effectue en assemblant l'étanchéité et l'écran pare-vapeur, pour autant qu'ils soient compatibles.

Cette technique de compartimentage peut aussi s'employer pour diviser la toiture suivant les zones de vent. En cas de tempête, le compartimentage réduit les risques d'arrachage complet de l'étanchéité sur des planchers étanches à l'air.

LA POSE DU PARE-VAPEUR

Le pare-vapeur se pose toujours du côté chaud par rapport à l'isolant thermique et il doit être continu.

Il faut être attentif à ne pas emprisonner d'eau dans les couches situées entre l'écran pare-vapeur et la membrane d'étanchéité.

Aux rives et raccords, l'étanchéité et le pare-vapeur sont reliés en emprisonnant complètement l'isolant thermique.

Le mode de pose du pare-vapeur dépend :

- Du mode de pose et de fixation de l'isolant thermique et de l'étanchéité :

- lorsque l'étanchéité est posée en indépendance totale ou fixée mécaniquement, le pare-vapeur peut être posé en indépendance totale. Il est toutefois préférable de le poser en semi-indépendance pour faciliter la mise en oeuvre ;
- lorsque l'étanchéité et l'isolant sont collés, le pare-vapeur doit également être collé de façon à ce que l'ensemble puisse résister au vent.

- Du support :

- *sur les supports en bois* :
 - écrans pare-vapeur bitumineux : ils peuvent être posés en indépendance, collés, posés au bitume chaud ou fixés mécaniquement ;
 - écrans pare-vapeur synthétiques : ils sont généralement posés en indépendance sur les planches et fixés mécaniquement en même temps que l'isolation et l'étanchéité, ou lestés ;
- *sur les supports en tôles profilées* : écrans pare-vapeur de classe E1, E2 et E3 posés en indépendance, collés, soudés ou fixés mécaniquement. Tous les joints doivent être pourvus d'un recouvrement et les joints longitudinaux doivent se trouver sur la nervure supérieure du support. Pour la classe de climat IV, le pare-vapeur doit être posé par collage sur un support continu fixé mécaniquement sur le support en tôles profilées.

• *sur les autres supports* :

- pose en indépendance : uniquement en cas d'étanchéité ou d'isolation lestée ou fixée mécaniquement ;
- l'adhérence totale ou l'adhérence partielle (collage à chaud ou à froid) sont admises dans tous les cas.

- Des raccords :

Au droit des rives de toiture, des relevés et des pénétrations, l'écran pare-vapeur et l'étanchéité doivent être raccordés entre eux selon les principes illustrés ci-contre [CSTC-00]. L'isolation thermique se trouve donc enfermée entre l'écran pare-vapeur et l'étanchéité.

L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

Assurer l'étanchéité à l'air des toitures est particulièrement important car leur fonction et leur position au sommet du bâtiment les rendent très vulnérables aux problèmes d'humidité.

Pour que l'enveloppe du bâtiment soit étanche à l'air, il convient de veiller à assurer la continuité entre l'étanchéité à l'air de la toiture plate et celle des murs extérieurs, et d'éviter tout percement de l'écran à l'air. Les murs sont généralement rendus étanches grâce à l'enduit intérieur ou à une membrane d'étanchéité à l'air appliquée le long du côté intérieur des parois.

L'étanchéité à l'air d'une toiture plate peut être réalisée de trois manières différentes :

- à l'aide d'un plancher de toiture imperméable à l'air (exemple : plancher en béton), en veillant à assurer la continuité de l'étanchéité plancher - mur ;
- à l'aide d'un pare-vapeur, parfaitement continu et raccordé de manière étanche au droit de toutes les discontinuités (rives, avaloirs, ...) ;
- à l'aide de l'étanchéité de toiture.

Les autres détails de raccord (tels les spots encastrés, les percements, ...) sont identiques à ceux détaillés pour les toitures inclinées.

L'ISOLATION THERMIQUE

LES PERFORMANCES PRINCIPALES DES MATÉRIAUX ISOLANTS

LES SOLLICITATIONS MÉCANIQUES EXTERNES

L'étanchéité et l'isolation des toitures plates sont soumises à différentes sollicitations mécaniques :

- sollicitations statiques réparties (lestage) ;
- sollicitations statiques concentrées (plots) ;
- sollicitations dynamiques concentrées (circulation, chocs provoqués par la chute d'objets, grêle).

Les sollicitations et l'utilisation de la toiture (qui peut être accessible ou non), limitent le choix des matériaux isolants. Chacun des matériaux disponibles sur le marché possède une résistance à l'écrasement spécifique.

La résistance de l'isolation aux sollicitations doit être évaluée en tenant compte des propriétés mécaniques de l'étanchéité.

Si on classe les matériaux isolants couramment utilisés pour les toitures plates, du plus résistant au moins résistant aux sollicitations mécaniques, on obtient :

- le verre cellulaire ;
- la perlite expansée ;
- la mousse de polystyrène extrudé ;
- la mousse de polystyrène expansé ;
- la mousse phénolique, la mousse de polyuréthane, la mousse de polyisocyanurate ;
- le liège ;
- la laine de roche.

LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES

CLASSIFICATION DE L'ISOLANT DU POINT DE VUE DE SA COMPRESSIBILITÉ

CLASSE	DÉFORMATION	TEMPÉRATURE [°C] (*)	CHARGE D'ESSAI [kPa]
A (**)	≤ 10 %	23 et 80	20
	≤ 15 %	(60)	20
B	≤ 5 %	80 (60)	20
C	≤ 5 %	80 (60)	40
D	≤ 5 %	80 (60)	80

(*) 60°C au lieu de 80°C sur les toitures à couche de protection lourde.

(**) Non applicable pour une toiture plate.

L'aptitude à l'emploi des différentes classes d'isolants, suivant la destination de la toiture, est appréciée sur la base des règlements nationaux :

A : toiture uniquement accessible pour l'entretien (non applicable pour une toiture plate).

B : toiture uniquement accessible pour l'entretien.

C : toiture accessible aux piétons. Peut être utilisée pour l'entretien fréquent d'équipements.

D : toiture accessible aux véhicules légers. Ne peut être utilisée que si le revêtement d'étanchéité est protégé par un dallage en béton ou autre.

On spécifie habituellement la résistance à la compression de l'isolation de toiture selon le classement de l'UEAtc, c'est-à-dire par les lettres B, C et D (voir tableau ci-contre).

LA COMPATIBILITÉ AVEC LE SUPPORT

Lorsque le support est relativement souple et exposé à des mouvements dus au vent, aux charges, etc., il y a intérêt à choisir un matériau isolant suffisamment souple comme la laine de roche, pour suivre le mouvement sans subir de contraintes importantes.

LA COMPATIBILITÉ AVEC LA COMPOSITION DE TOITURE

- Pour une toiture inversée, le seul matériau isolant généralement utilisé est la mousse de polystyrène extrudé XPS, à cause de sa très faible absorption d'eau.

- Pour une toiture chaude, la mise en oeuvre de panneaux de mousse de polystyrène extrudé XPS n'est pas indiquée car son coefficient de dilatation thermique est élevé.

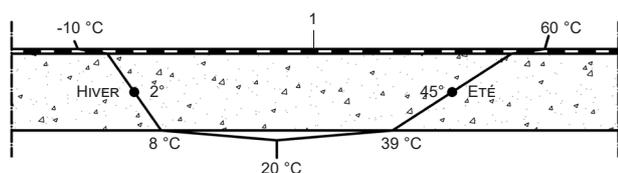
La mousse de polystyrène expansé EPS ne peut être utilisée que moyennant certaines précautions prescrites par les fabricants. Elle doit être recouverte sur les deux faces d'un voile de verre bitumé avec recouvrement au droit des joints. Il est conseillé de couvrir cette toiture d'un lestage car ce matériau résiste mal à une température supérieure à 70°C.

Dans le cas de revêtements d'étanchéité posés sur de la mousse de polyuréthane PUR, le matériau isolant doit être revêtu d'un voile de verre bitumé sur les deux faces. La laine de verre est à proscrire à cause de sa faible résistance à l'écrasement et à l'arrachement.

MOUVEMENTS THERMIQUES [CSTC-00]

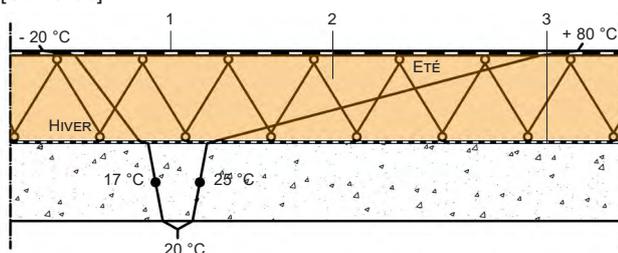
Une toiture plate peut être soumise à des fluctuations très importantes de température. Celles-ci entraînent non seulement des tensions superficielles au droit de l'étanchéité (dilatation/retrait), mais elles provoquent également un gradient de température dans le matériau d'isolation, ce qui peut impliquer un risque de déformation.

La plupart des panneaux isolants étant peu rigides, une fixation appropriée peut empêcher ce phénomène.



1 : étanchéité

EVOLUTION DES TEMPÉRATURES POUR UNE TOITURE NON ISOLÉE [CSTC-00]



1 : étanchéité

2 : isolation

3 : écran pare-vapeur

4 : support en béton

EVOLUTION DES TEMPÉRATURES POUR UNE TOITURE ISOLÉE [CSTC-98-2]

LE COMPORTEMENT AU FEU

Suivant le degré de sécurité que l'on souhaite atteindre, on détermine le degré d'inflammabilité acceptable pour l'isolant thermique.

Les mousses de polystyrène et de polyuréthane sont inflammables et résistent mal à la chaleur.

Les seuls isolants ininflammables pour les toitures plates sont le verre cellulaire et la laine de roche.

Il faut également veiller à ce que le panneau ne dégage pas de gaz toxique lorsqu'il est exposé à la chaleur d'un incendie.

LE COMPORTEMENT EN PRÉSENCE D'HUMIDITÉ

La présence d'humidité dans le matériau isolant entraîne une diminution de son pouvoir isolant et, occasionnellement, une diminution de sa cohésion ainsi que d'autres caractéristiques mécaniques.

L'isolation d'une toiture chaude peut s'humidifier de plusieurs manières :

- par la pluie pendant l'entreposage et la pose ;
- par des fuites occasionnelles ;
- par l'humidité de construction et/ou la condensation interne.

VALEURS DE RÉFÉRENCE

Pour les logements, bâtiments d'hébergement, bureaux et bâtiments scolaires neufs ou rénovés, la réglementation thermique wallonne impose pour les toitures, une valeur maximale du coefficient de transmission thermique de $U \leq 0,24 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Pour une toiture chaude, elle correspond à une épaisseur approximative d'isolant :

- de 19 cm de laine minérale ;
- ou de 16 cm de mousse de polyuréthane ;
- ou de 21 cm de verre cellulaire.

Pour une toiture inversée, elle correspond à une épaisseur d'isolant d'environ 18 cm de mousse de polystyrène extrudé.

Les valeurs des conductivités thermiques sont les valeurs par défaut reprises à l'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2].

Lorsque l'isolant thermique n'est pas fixé au support, on dit qu'il est posé en indépendance ; il est alors nécessaire de le lester ou de lester l'étanchéité qui le couvre. Ce type de pose ne convient pas pour le verre cellulaire.

La fixation de l'isolant thermique est toujours conseillée, même sous une étanchéité posée en indépendance.

LA POSE DE L'ISOLANT THERMIQUE

Le mode de pose de l'isolation thermique dépend de celui de l'étanchéité. Lorsque l'étanchéité est fixée mécaniquement ou lestée, l'isolation peut être posée librement, bien qu'il soit préférable, pour faciliter la mise en oeuvre, de prévoir une pose en semi-indépendance ou encore certaines fixations mécaniques.

Lorsque l'étanchéité est collée, l'isolation thermique est collée ou fixée mécaniquement.

Quelle que soit la technique de pose, il faut placer la première couche de l'étanchéité immédiatement après avoir posé l'isolant.

LE COLLAGE AU BITUME CHAUD

La méthode de collage à plein bain de bitume consiste à déverser un bitume chaud et liquide sur le support et à déposer, immédiatement dans le bitume, l'isolant à faire adhérer. Le bitume que l'on utilise pour le collage à chaud est le bitume soufflé (ou bitume oxydé) chauffé à environ 200°C.

Ce système convient à tous les supports de toiture sauf aux tôles profilées en acier ; en effet, sur l'acier, le bitume se refroidit trop vite et la surface de collage est réduite de par la forme des profilés.

Il est parfois nécessaire d'appliquer un vernis d'adhérence sur certains supports, comme le béton ou l'acier, avant de couler le bitume.

Le bitume chaud ne convient pas non plus aux supports constitués de planches, à moins d'y avoir cloué au préalable une membrane armée de polyester pour éviter que le bitume ne s'infiltré entre les joints.

S'il s'agit de PUR ou PIR, il faut interposer une membrane perforée pour le collage par points.

LA POSE À LA COLLE BITUMINEUSE À FROID

La mise en oeuvre de la colle et la quantité dépendent du type de support et de l'action du vent sur la toiture.

La colle est appliquée sur l'entièreté de la surface du support ou sur une partie de celui-ci, par bandes ou plots.

Ces colles restant longtemps plastiques, elles peuvent provoquer des déplacements inadmissibles des panneaux d'isolation lorsque ceux-ci sont posés sur des supports déformables.

LA POSE À LA COLLE SYNTHÉTIQUE À FROID

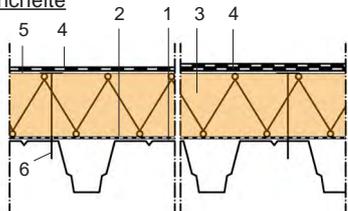
La quantité de colle à utiliser dépend de la qualité du support, de la qualité du matériau à coller et de l'action du vent sur la toiture.

La colle est généralement appliquée sur une partie de la surface du support, par bandes.

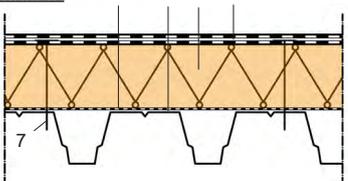
Ces produits doivent être fournis ou agréés par les fabricants des isolants.

FIXATION MÉCANIQUE D'UNE TOITURE CHAUDE SUR DES TÔLES PROFILÉES MÉTALLIQUES [CSTC-00]

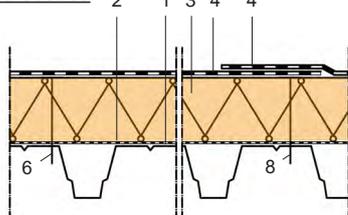
- Fixation mécanique des panneaux d'isolation et collage ou soudage de l'étanchéité



- Fixation mécanique de la sous-couche et collage ou soudage de la couche de finition



- Fixation mécanique d'une étanchéité monocouche dans les joints collés ou soudés



LA FIXATION MÉCANIQUE

Cette méthode est en principe possible sur tous les supports mais ne s'applique en pratique que sur les supports en bois et les tôles profilées en acier.

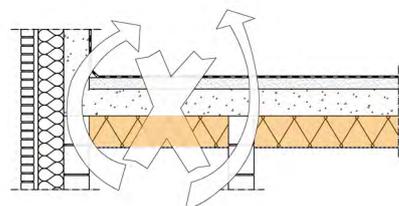
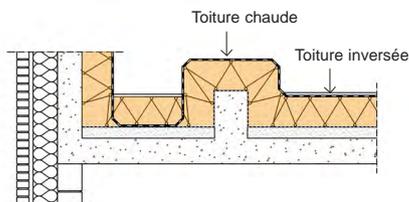
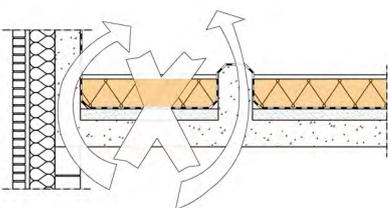
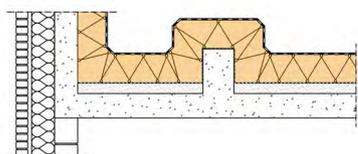
Elle est compatible avec tous les matériaux d'isolation, excepté le verre cellulaire.

L'isolation est fixée au moyen de plaquettes de répartition et de vis autoforantes. Le nombre de points de fixation dépend de l'action du vent, des propriétés mécaniques de l'isolation ainsi que du type et des dimensions de l'ancrage. On distingue trois méthodes de mise en oeuvre (voir schémas ci-contre) [CSTC-00] :

- fixation mécanique des panneaux d'isolation et collage ou soudage de l'étanchéité ;
- fixation mécanique de la sous-couche de l'étanchéité et collage ou soudage de la couche de finition ;
- fixation mécanique d'une étanchéité monocouche dans les joints collés ou soudés.

- 1 : tôle profilée en acier
- 2 : écran pare-vapeur éventuel
- 3 : isolation
- 4 : étanchéité
- 5 : étanchéité collée ou soudée sur l'isolation
- 6 : fixation de l'isolation
- 7 : fixation de la sous-couche à travers l'isolation
- 8 : fixation de l'étanchéité monocouche à travers l'isolant

NOEUDS CONSTRUCTIFS ET PONTS THERMIQUES [ARCH-13]



L'isolation thermique de certains ouvrages de raccord (rives, chéneaux, pénétrations verticales, lanterneaux, etc.) est difficile à réaliser et nécessite un soin important. C'est donc à ces endroits que le risque de nœud constructif est le plus important. La méthode d'isolation rendra plus ou moins difficile la résolution des nœuds constructifs.

La toiture chaude permet la fixation de l'isolant sur les remon-tées.

Par contre, la toiture inversée ne permet pas de fixer l'isolant verticalement. Dans ce cas, les parties verticales peuvent être isolées par la technique de la toiture chaude.

Certains indices peuvent révéler la présence de nœuds constructifs non résolus. Le plus flagrant est la présence d'eau condensée sur la paroi. Mais la zone peut être simplement humide (l'eau s'étant condensée à l'intérieur du matériau) ou être provisoirement sèche. Dans ce cas, l'humidité peut avoir laissé des traces (moisissures, taches, etc.).

Un thermomètre de contact permet de comparer la différence de température entre les différentes zones de la paroi concernée. En hiver, à l'endroit du nœud constructif non conforme, la température superficielle intérieure est nettement inférieure à celle des éléments environnants.

L'isolant d'une toiture froide ou d'une toiture isolée par l'intérieur est généralement interrompu par les murs supportant la toiture.

Pour rappel, ce type de toiture est à proscrire.

Le traitement des nœuds constructifs (méthode de calcul) est détaillé dans l'Annexe B2 de l'AGW PEB du 15/12/16 [GW -16-2].

RÉNOVATION [ARCH-13]

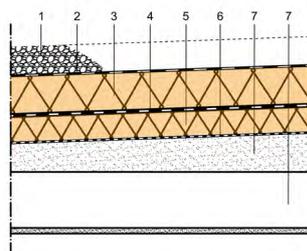
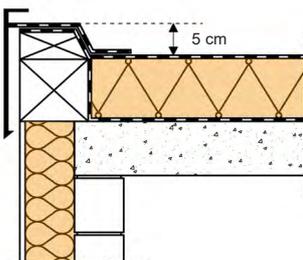
• Comment isoler une toiture existante non isolée ?

Le plus souvent possible, on réalisera une **toiture chaude** en plaçant l'isolant thermique en sandwich entre deux étanchéités (le pare-vapeur en dessous et la membrane au-dessus).

Lorsque la membrane d'étanchéité existante est encore suffisamment bonne pour servir de pare-vapeur, et lorsqu'elle est encore suffisamment accrochée au support pour assurer la stabilité au vent si la couverture n'est pas lestée, on peut la conserver.

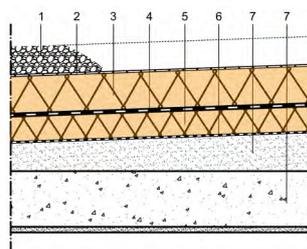
On peut également poser l'isolant au-dessus d'une membrane d'étanchéité existante : on réalise ainsi une **toiture inversée**. Celle-ci peut être envisagée lorsque :

- la membrane d'étanchéité existante est récente et peut être récupérée ;
- le support tolère la charge du lestage ;
- les rives du toit sont assez hautes pour déborder d'au moins 5 cm le bord supérieur des panneaux isolants ;
- la forme de la toiture n'est pas trop compliquée (difficulté de réaliser des remontées de l'isolant).



- 1 : lestage récupéré et remplacé
- 2 : nouvelle membrane d'étanchéité
- 3 : nouvel isolant thermique
- 4 : membrane d'étanchéité conservée
- 5 : isolant thermique conservé
- 6 : pare-vapeur conservé
- 7 : béton de pente et support

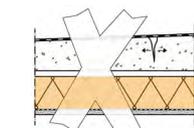
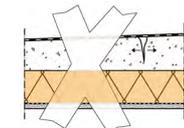
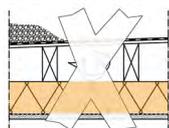
Lorsque la membrane d'étanchéité existante est récente et peut être récupérée, et lorsque le support tolère la charge d'un lestage, on peut réaliser une toiture combinée en plaçant une toiture inversée sur la toiture chaude existante.



- 1 : lestage récupéré et remplacé
- 2 : natte de protection
- 3 : nouvel isolant thermique
- 4 : membrane d'étanchéité conservée
- 5 : isolant thermique conservé
- 6 : pare-vapeur conservé
- 7 : béton de pente et support

• Que faire d'une toiture isolée par l'intérieur ?

C'est le cas lorsque la toiture est une toiture froide, lorsque l'isolant se trouve accroché sous le support ou lorsqu'il existe un faux-plafond isolant sous la toiture.



TOITURE FROIDE

ISOLATION SOUS LE SUPPORT

FAUX-PLAFOND ISOLANT

Etant donné la difficulté de réaliser un pare-vapeur continu, la vapeur d'eau risque de former de la condensation dans la toiture. De plus, le support est soumis aux chocs thermiques.

Si la toiture est assez isolée, que l'usage des locaux n'est pas modifié et qu'aucun désordre (fissures, humidité, etc.), y compris interne, ne se manifeste, on peut éventuellement conserver le système existant.

Lorsque, dans le cadre d'une rénovation, l'isolation d'une toiture froide existante doit être renforcée, il faut transformer cette toiture en toiture chaude et enlever l'isolant ancien.

Il est, en général, plus difficile de transformer la toiture froide en toiture inversée car les supports des toitures froides sont souvent légers et ne supportent pas l'augmentation du poids du lestage nécessaire. De plus la ventilation interne à la toiture doit être rigoureusement supprimée.

Une autre solution consiste à appliquer une seconde isolation thermique sur le béton de pente. Il faut, dans ce cas, être particulièrement attentif à la remontée de l'isolant par rapport au trop-plein.

• Comment renforcer l'isolation thermique d'une toiture chaude ?

- Si l'isolant thermique est dégradé :

- l'étanchéité et l'isolant doivent être complètement enlevés ;
- le pare-vapeur peut être conservé sauf s'il est mal accroché ou si le support lui-même est dégradé ;
- les rives sont éventuellement adaptées à la nouvelle épaisseur d'isolant ;
- on réalise un nouveau système de couverture isolée, de préférence une toiture chaude, sinon une toiture inversée.

- Si l'isolant thermique est en bon état et bien accroché :

- l'isolant est conservé ainsi que la membrane d'étanchéité, lorsque celle-ci est encore assez accrochée au support pour résister au vent ;
- une nouvelle toiture chaude est posée sur la couverture existante.

• Comment renforcer l'isolation thermique d'une toiture inversée ?

Il faut s'abstenir d'ajouter une nouvelle couche d'isolant sur l'isolant existant, pour éviter des problèmes de condensation interne dans l'isolant.

L'isolant thermique existant doit donc être enlevé et remplacé par un isolant plus épais.

On peut également réaliser une nouvelle toiture chaude, surtout si la membrane d'étanchéité est en mauvais état et doit être remplacée. La membrane existante peut éventuellement servir de pare-vapeur.

• Que faire lorsque l'isolant thermique est détremé ?

Un isolant thermique trempé perd toute son efficacité : il faut donc le remplacer, ce qui nécessite en outre l'enlèvement de la membrane d'étanchéité et la pose d'une nouvelle.

Lorsque les désordres sont dus à un défaut du pare-vapeur, outre le remplacement de l'isolant et de la membrane, le pare-vapeur lui-même devra être renforcé ou remplacé par un autre plus efficace.

Remarque : le verre cellulaire posé en toiture compacte ne peut s'humidifier puisqu'il est étanche tant à l'eau qu'à la vapeur d'eau. Il ne sera donc jamais nécessaire de le remplacer pour cause d'humidification.

• Que faire lorsque l'isolant thermique est écrasé ?

Lorsque l'isolant a été accidentellement écrasé, ses qualités d'isolation thermique diminuent à l'endroit de l'écrasement.

Si l'écrasement est local, il y a un risque de noeud constructif à cet endroit. S'il ne provoque pas de condensation superficielle ou interne, l'écrasement localisé n'a pour seule conséquence qu'une perte d'énergie de chauffage.

Si l'écrasement concerne de grandes surfaces, la qualité thermique de la toiture est fortement diminuée et il convient dès lors de vérifier si le niveau d'isolation thermique souhaité est bien satisfait.

• Que faire lorsque l'isolant thermique n'est plus continu ?

Suite à des retraits, des mouvements thermiques ou des contraintes mécaniques extérieures, il arrive que les panneaux isolants se déplacent ou rétrécissent, créant ainsi des discontinuités dans la couche isolante. Si les joints ainsi créés ne sont pas bouchés, l'isolation thermique est interrompue : il se crée alors un pont thermique et la qualité thermique de la toiture est diminuée. Il convient de vérifier si le niveau d'isolation résultant est toujours acceptable, sinon il faut réparer le désordre.

Il est également nécessaire d'intervenir si la déformation de l'isolant thermique a provoqué une rupture de la membrane d'étanchéité, accompagnée d'infiltrations d'eau.

L'ÉTANCHÉITÉ DE TOITURE

Pour réaliser l'étanchéité de la toiture plate, on a le choix entre différents types de membranes qui possèdent des caractéristiques différentes les rendant plus ou moins aptes à répondre aux exigences du chantier.

Le choix du type de membrane dépend des possibilités d'exécution, du type de support et d'isolant thermique, des conséquences d'une fuite éventuelle, des moyens de localiser une fuite et de la réparer.

LES MEMBRANES BITUMINEUSES

Une membrane bitumineuse est constituée d'une armature enrobée de bitume. L'étanchéité des toitures plates s'obtient par la pose d'une ou plusieurs membranes bitumineuses superposées dont les lés sont soudés latéralement les uns aux autres et en bout.

On parle d'un système "monocouche" lorsqu'une seule épaisseur de membrane est posée et d'un système "multicouche" lorsque plusieurs membranes, généralement deux (système bicouche), sont superposées.

LA COUCHE SUPÉRIEURE

La couche supérieure doit résister au vieillissement dû au rayonnement solaire et aux sollicitations mécaniques et thermiques. C'est pourquoi elle est toujours armée d'un voile de polyester et le bitume utilisé est additionné de polymères qui améliorent considérablement les performances. Son épaisseur est d'au moins 4 mm. Ces bitumes sont appelés "bitumes modifiés".

Les polymères additionnés peuvent être de deux types :

- les plastomères APP qui, mélangés à raison d'environ 30 %, donnent au bitume des propriétés plastiques ;
- les élastomères SBS qui, mélangés à raison d'environ 12 %, donnent au bitume des propriétés élastiques.

LA (LES) SOUS-COUCHE(S) ÉVENTUELLE(S)

Les matériaux à base de bitume soufflé donnent de bons résultats comme sous-couche ou couche intermédiaire. Ils peuvent être armés d'un voile de verre, d'une feuille d'aluminium ou d'un voile de polyester.

LES MÉTHODES DE POSE [CSTC-98-2]

Remarque : en présence de deux couches (ou davantage), le collage entre les couches s'opère toujours en adhérence totale, par soudage à la flamme, au moyen de bitume chaud ou de colle à froid.

- Pose en indépendance avec une couche de protection lourde :

Cette technique consiste à poser une couche de désolidarisation, une sous-couche éventuelle puis une membrane de SBS ou d'APP au-dessus desquelles on pose un lestage. Elle permet d'obtenir une meilleure durabilité de l'étanchéité car elle limite considérablement les variations de températures et protège l'étanchéité contre les UV. Cependant, son prix est élevé et la localisation ainsi

LA MEMBRANE MONOCOUCHE

On considère qu'une étanchéité est monocouche lorsqu'elle comprend une sous-couche perforée et une couche finale.

- Sa pose requiert une grande expérience et une formation spécialisée.
- Elle est utilisée surtout lorsqu'on souhaite un investissement minimal tout en sachant que l'entretien après quelques années risque de nécessiter de gros frais.
- Elle est utilisée lorsqu'on peut contrôler facilement l'exécution des recouvrements et pratiquer un essai d'étanchéité à l'eau en mettant la toiture sous eau.

LA MEMBRANE MULTICOUCHE

- Elle offre plus de garantie en cas d'erreur de mise en oeuvre au niveau des assemblages des lés.
- Lorsque le bâtiment doit être mis à l'abri alors qu'il n'est pas achevé, ce système permet de protéger provisoirement le bâtiment avec la première couche et de n'achever le travail par la pose de la dernière couche que lorsque le bâtiment est complètement achevé.
- Il y a moins de risques d'infiltration.
- Elle résiste mieux au poinçonnement.

SYSTÈME DE CODAGE [CSTC-00]

Le codage se compose de deux lettres majuscules, complétées ou non d'une ou de plusieurs minuscules.

La première majuscule indique le mode de fixation de l'ensemble de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance, avec une couche de protection lourde ;
- T : en adhérence totale ;
- P : en semi-indépendance (adhérence partielle) ;
- M : fixation mécanique.

La deuxième majuscule renvoie à la technique de fixation de la première couche (sous-couche ou couche unique) de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance ;
- B : collage au bitume chaud ;
- S : soudage ;
- C : collage à froid ;
- V : fixation par vis ;
- N : fixation par clous.

La lettre minuscule indique la technique utilisée pour fixer la deuxième couche de l'étanchéité sur la sous-couche :

- s : soudage ;
- c : collage à froid.

Le codage des étanchéités bitumineuses est repris dans un tableau en annexe 4.

RÉNOVATION [ARCH-13]

L'âge, le type et l'état de l'étanchéité existante peuvent influencer la décision de la rénover et éventuellement de profiter de l'intervention pour améliorer l'isolation thermique de la toiture plate. La durée de vie d'une membrane dépend de nombreux facteurs, notamment de :

- sa nature ;
- son épaisseur ;
- ses armatures ;
- la rigidité de son support ;
- la façon dont elle est protégée des agents extérieurs ;
- la conception et la réalisation correcte du complexe isolant - étanchéité ;
- son entretien ;
- du site où elle se trouve.

Toutes les étanchéités sont garanties dix ans ; dans de bonnes conditions, la durée de vie des membranes actuelles dépasse largement ces dix ans.

Les indices de vétusté ou d'altération d'une membrane d'étanchéité sont les suivants :

- **l'eau stagnante** ;
- **les blessures** : elles sont généralement provoquées par une agression mécanique extérieure.
Dans le cas d'une toiture chaude, la perforation de la membrane entraîne la pénétration de l'eau dans la couche isolante. Si cette couche est inondable, l'eau va imprégner totalement l'isolant, entraînant une surcharge importante et l'inefficacité de l'isolation. Les dégâts provoqués par la perforation de l'étanchéité sont moindres lorsque l'isolant a été compartimenté ou lorsque l'isolant utilisé est le verre cellulaire (toiture compacte) ;
- **les déchirures** : elles sont dues à des tractions excessives dans le plan de la membrane. Ces tensions peuvent provenir d'un retrait du matériau, d'une instabilité thermique du support, d'une mauvaise réalisation des joints de mouvement ;
- **la végétation** :
 - *les plantes* : elles sont les plus agressives. Les graines amenées par le vent sur l'isolant avant la pose de l'étanchéité peuvent y trouver, dans certains cas, assez d'humidité pour se développer et perforer la membrane d'étanchéité ;
 - *les mousses* : elles se développent en général au-dessus de la membrane, dans la poussière déposée sur la membrane ou dans le lestage. Pour se développer, elles n'ont besoin que d'humidité et ne possèdent pas de racines ;
 - *les algues* : elles se développent uniquement dans l'eau. On les retrouve donc dans les zones de stagnation.
- **l'usure de la protection UV** : suite à l'action mécanique ou chimique des agents extérieurs, les couches légères de protection de l'étanchéité s'usent et finissent par ne plus remplir leur fonction. L'absence de protection peut avoir provoqué un vieillissement accéléré de la membrane ;
- **les défauts des fixations mécaniques** : il n'est pas possible de connaître l'état des fixations mécaniques sans effectuer un sondage. Certains indices extérieurs peuvent indiquer des désordres :
 - déchirure autour de la fixation ;
 - soulèvement du complexe étanchéité - isolant ;
 - poinçonnement de l'étanchéité par la fixation ;
 - etc. ;
- **les boursouffures** : elles sont dues à l'occlusion de poches d'air humide ou de vapeur d'eau entre les différentes couches qui composent l'étanchéité. Les boursouffures en elles-mêmes ne sont pas sources d'infiltration mais elles rendent l'étanchéité fragile aux contraintes mécaniques ;
- **les plis** : ils peuvent être dus à une mauvaise fixation de la membrane d'étanchéité ou à un coefficient de dilatation trop élevé du matériau constituant la membrane ;
- **les fissures, craquelures, émiettements** : le vieillissement de la membrane sous l'effet des rayons UV, des variations de températures, des chocs thermiques ou de l'évaporation de certains constituants se traduit par une fragilisation de celle-ci, entraînant des désordres profonds visibles en surface.

que la réparation des fuites sont plus difficiles.

- **Pose en adhérence totale** :
On pose d'abord un vernis d'adhérence bitumineux sur le support puis on applique une sous-couche éventuelle et une couche supérieure en SBS ou APP.
- **Pose en semi-indépendance** :
Il s'agit du même principe que pour la pose en adhérence totale mais la sous-couche n'est que partiellement collée.
Le choix entre ces deux types de pose dépend principalement du support. Si les deux types sont possibles, la pose en adhérence totale offre une meilleure résistance au vent et celle en semi-indépendance permet une meilleure répartition des tensions dans l'étanchéité.
La pose en semi-indépendance est imposée lorsque l'isolant thermique est du polyuréthane PUR.
- **Pose avec fixations mécaniques** :
Ce système comprend une sous-couche vissée ou clouée et une couche supérieure en SBS ou APP.
L'avantage de cette technique est qu'on peut adapter le nombre de fixations suivant les zones de toitures. Les supports les plus adaptés à cette technique sont les tôles profilées en acier, le béton cellulaire et le bois.

LES MEMBRANES SYNTHÉTIQUES

Les matériaux utilisés sont également appelés "hauts polymères". Ils ont de bonnes caractéristiques mécaniques, ils résistent bien au froid, à la chaleur, aux produits chimiques et aux influences atmosphériques.

Les étanchéités synthétiques sont de deux types :

- les élastomères ;
- les plastomères.

Le tableau de la page suivante reprend les différentes membranes synthétiques et leurs principales caractéristiques.

LES FEUILLES MÉTALLIQUES

Ces feuilles sont en général en cuivre ou en zinc ; ces dernières doivent être ventilées en sous-face.

Nous renvoyons le lecteur au chapitre "*L'isolation thermique de la toiture inclinée*", dans lequel ce type de couverture a été examiné.

L'ASPHALTE COULÉ

Il s'agit d'un mélange correctement dosé de bitume et d'agrégats : sable, gravier, filler. Il est appliqué sans compactage en une couche de plusieurs centimètres.

Le mélange doit être exempt de cavités et de matériaux gélifs.

Ce type d'étanchéité constitue une bonne couche d'usure et de répartition des charges pour la circulation piétonne et automobile. Une couche de bitume polymère reste nécessaire sous cette couche d'usure.

LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES

	TYPES D'ETANCHEITE	DESCRIPTION	EPAISSEUR ET COULEUR	POSE ET ADHERENCE AU SUPPORT	JONCTION DES LES
ELASTOMERES	EPDM Copolymère d'éthylène, de propylène et de diène-monomère	Egalement appelé EPT, il est actuellement le plus utilisé des hauts-polymères élastomères sous forme de membrane.	1,2 - 1,5 et 2 mm noir ou gris	Pose en adhérence totale, en adhérence partielle ou en pose libre lestée. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de colle à chaud à base de bitume et d'EPDM, à l'aide de colle de contact ou à l'aide de bitume lorsque les feuilles sont dépourvues d'une couche dorsale constituée d'un voile qui sert à réaliser l'adhérence avec le bitume.	Elle se fait sur chantier à l'aide de "gumtape" et de colle. En atelier, la jonction des lés se fait par soudure à chaud et bande adhésive.
	IIR Butyle		1,5 et 2 mm noir	Pose en adhérence totale, en adhérence partielle ou en pose libre lestée. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de colle à chaud à base de bitume et de butyle ou à l'aide de colle de contact.	Elle se fait sur chantier à l'aide de "gumtape" et de colle. En atelier, la jonction des lés se fait par soudure à chaud et bande adhésive.
	CR Polychloroprène	Membrane en caoutchouc munie d'une couche dorsale en voile de verre destinée à améliorer l'adhérence de la colle.	1 - 1,2 - 1,5 et 2 mm noir	Pose en adhérence totale. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume ou à l'aide de colle de contact.	Elle se fait à l'air chaud avec des bandes de soudure ou à la colle à froid.
	CSM Polyéthylène chlorosulfoné	Le CSM présente la particularité de se vulcaniser sur la toiture sous l'effet des rayons UV.	1,2 mm armature comprise gris, noir, blanc ou beige	La membrane est posée en adhérence totale ou en pose libre lestée. Elle peut aussi être fixée mécaniquement. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume, de colle de contact ou de colle de dispersion.	Elle se fait à l'air chaud avec des bandes de soudure ou à la colle à froid.
	NBR Caoutchouc nitrile	La membrane est munie d'une couche dorsale en voile de verre.	1,1 ou 1,5 mm noir	Pose en adhérence totale ou en pose libre lestée. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume ou de colle de contact.	Elle se fait à l'aide de colle à deux composants.
PLASTOMERES	PIB Polyisobutylène	Ces membranes sont toujours doublées sur leur face inférieure d'une armature épaisse en feutre de polyester.	1,2 mm feutre non compris noir	Pose en adhérence totale, en adhérence partielle ou en pose libre lestée. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume ou à l'aide de colle à froid.	Elle se fait à l'aide de bandes d'étanchéité auto-adhésives et par soudure par gonflement pour les joints transversaux.
	EVA Ethylène et acétate de vinyle		1,2 mm feutre non compris blanc	Pose en adhérence totale, ou en pose libre lestée. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume ou à l'aide de colle de contact.	Elle se fait par soudure par gonflement ou par soudure à air chaud.
	ECB Copolymère d'éthylène et bitume	Il n'y a pas d'armature. La membrane est pourvue d'une couche dorsale en voile de verre ou en polyester pour améliorer l'adhérence de la colle.	2 mm noir	La membrane est posée en adhérence totale, en adhérence partielle ou en pose libre lestée. Elle peut aussi être fixée mécaniquement. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume. Lors de la pose, la surface de ce matériau est visqueuse ; cette caractéristique disparaît après quelques semaines.	Elle se fait par soudure à air chaud.
	CPE Polyéthylène chloré	Ce sont soit des membranes simples, soit des membranes composées de deux membranes avec ou sans armature en polyester tissé ou avec un feutre de polyester extérieur.	1,2 ou 1,5 mm gris ou noir	La membrane est posée en adhérence totale, en adhérence partielle ou en pose libre lestée. Elle peut aussi être fixée mécaniquement. L'adhérence au support se fait par collage à l'aide de bitume. Elle peut aussi se faire à la colle de contact lorsque la membrane est pourvue d'un feutre de polyester extérieur.	Elle se fait par soudure par gonflement. Lorsque la membrane est pourvue d'une armature tissée, le joint est mastiqué au moyen d'une pâte à base de CPE.
	PVC Chlorure de polyvinyle	On n'utilise que des membranes armées de fibres de verre (sans retrait) ou armées de polyester (avec faible retrait). Les feuilles sont constituées de deux couches entre lesquelles l'armature est calendrée.	1,2 ou 1,5 mm gris ou beige (plastifiant monomère) couleurs différentes sur les deux faces (plastifiant polymère)	Lorsqu'une membrane en PVC ne résiste pas au bitume, il faut poser une couche de séparation entre le PVC et les matériaux bitumineux. Elle peut être soit fixée mécaniquement, soit posée librement et lestée.	Elle se fait par soudure par gonflement ou par soudure à air chaud. Dans les deux cas, le joint est mastiqué au moyen d'une pâte en PVC.

LES PROTECTIONS

Les couches de protection assurent plusieurs rôles : protéger des rayons UV, améliorer l'aspect esthétique, réduire la température superficielle en cas d'ensoleillement.

On distingue les protections légères, des protections lourdes.

Le choix de la protection dépend essentiellement de cinq facteurs :

- le type de toiture ;
- la pente de toiture ;
- la nature de la membrane d'étanchéité ;
- la capacité portante du support ;
- l'utilisation de la toiture.

LES PROTECTIONS LÉGÈRES

Une protection légère peut se présenter sous trois formes.

- Une couche de paillettes d'ardoise : les paillettes sont uniquement appliquées sur les étanchéités bitumineuses. Elles peuvent être de couleurs différentes, les couleurs foncées étant les plus courantes. Les paillettes sont directement appliquées sur les membranes en usine.

- Une couche de peinture : elle est appliquée sur chantier. Pour éviter tout problème d'incompatibilité, il faut utiliser uniquement des peintures agréées par le fabricant des membranes.

Les étanchéités synthétiques reçoivent rarement une couche de protection légère car la majorité d'entre elles offrent une résistance suffisante aux rayons UV et sont de teinte claire. La seule protection légère que l'on applique sur certaines étanchéités synthétiques sombres est une couche de peinture réfléchissante.

- Une feuille métallique : certaines membranes en bitume modifié SBS sont revêtues en usine d'une feuille de cuivre ou d'aluminium gaufré, destinée à réfléchir le rayonnement solaire. Le métal s'oxydant avec le temps, l'effet réfléchissant disparaît malheureusement au bout de quelques années.

LES PROTECTIONS LOURDES

La couche de protection lourde (gravier, dalles, asphalte coulé, béton, etc.), également appelée lestage, peut être posée sur n'importe quel support, pour autant que la stabilité de ce dernier le permette. Elle est particulièrement recommandée :

- sur un support humide (pour éviter l'apparition de boursoffures) ;
- sur un support incompatible (goudrons, certains enduits, certaines matières synthétiques).

- Le gravier

Le gravier peut être roulé ou concassé.

La pente de la toiture ne peut pas être supérieure à 5 % pour éviter que le gravier ne roule.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES PROTECTIONS LOURDES [CSTC-00]

• Avantages :

- réduction des contraintes thermiques sur la toiture ;
- amélioration du comportement au feu ;
- excellente protection contre les rayons UV.

• Inconvénients :

- nécessité d'une structure porteuse plus lourde ;
- entretien accru ;
- difficulté de localiser les fuites éventuelles et de les réparer. Il peut donc être utile de contrôler l'étanchéité à l'eau en mettant la toiture temporairement sous eau avant de procéder aux finitions.

AUTRES TYPES DE DALLAGE [ARCH-13]

• Les dalles drainantes ou à plots intégrés

On peut également poser, sur l'étanchéité (ou sur l'isolant dans le cas d'une toiture inversée), des dalles drainantes. Il s'agit de dalles, largement rainurées en face inférieure. L'eau s'évacue par ces évidements.

La planéité de l'assise des dalles doit être particulièrement régulière puisque le réglage vertical n'est pas possible (absence de plots).

• Les dalles sur chape et les carrelages scellés

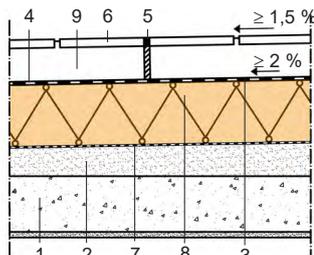
Les dalles peuvent également être posées à plein bain de mortier sur une chape armée posée en indépendance de l'étanchéité. Une couche de désolidarisation est placée entre l'étanchéité et la chape ; elle assure aussi l'écoulement de l'eau d'infiltration au niveau de l'étanchéité.

Ces dalles sur chape sont plus faciles à entretenir que les dalles sur plots, mais l'accès à la membrane est pratiquement impossible.

Un carrelage ou un dallage constitue généralement le revêtement d'une toiture-terrasse. Celle-ci se compose également :

- d'un élément porteur en encorbellement, le plus souvent en béton armé ;
- d'une couche d'égalisation ou d'une forme de pente en mortier ou en béton maigre ;
- d'une étanchéité en membranes bitumineuses ou synthétiques, placée entre deux couches de désolidarisation.

Si la terrasse se prolonge au-dessus de locaux chauffés, on intègre à l'ensemble une couche d'isolation thermique placée entre la forme de pente et l'étanchéité



- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 : élément porteur | 5 : joint de dilatation |
| 2 : forme de pente | 6 : carrelage |
| 3 : étanchéité | 7 : écran pare-vapeur éventuel |
| 4 : couche de désolidarisation drainante | 8 : isolation thermique |
| | 9 : chape |

L'évacuation de l'eau doit être assurée non seulement au niveau du carrelage (eau de ruissellement), mais aussi et surtout au niveau de l'étanchéité (eau infiltrée par les joints du carrelage). L'eau doit être évacuée le plus rapidement possible. Il est conseillé de prévoir :

- une pente minimale de 1,5 % pour le carrelage ;
- une pente minimale de 2 % pour le revêtement d'étanchéité, de façon à éviter une accumulation de l'eau dans le mortier de pose ou la chape ;
- une couche de désolidarisation drainante située au-dessus de l'étanchéité favorisant l'écoulement de l'eau vers les points bas.

L'étanchéité doit être totalement désolidarisée, tant du support que de la sous-couche du carrelage (chape ou lit de sable stabilisé). Elle doit être complètement indépendante afin de ne pas être soumise aux déformations dimensionnelles, principalement d'origine thermique, du support et de la chape de mortier.

• Les dalles complexes isolantes

La dalle se compose d'un panneau isolant en mousse rigide de polystyrène extrudé sur lequel est ancrée une couche supérieure en béton renforcé de fibres.

En fonction de la nature et de l'épaisseur du béton, ces dalles peuvent être accessibles aux piétons ou n'être accessibles que pour l'entretien de la toiture.

Les dalles sont posées librement sur la membrane d'étanchéité, les unes contre les autres. Elles peuvent être munies de rainures et languettes.

La toiture ainsi constituée est une toiture inversée ou une toiture combinée.

Dans les zones critiques, le lestage par gravier peut être insuffisant et doit parfois être complété par la pose d'un dallage en béton ou en ciment.

Les graviers roulés peuvent être directement déposés sur l'étanchéité. Les graviers concassés ne peuvent être posés que sur des membranes épaisses de type bitume modifié APP ou SBS armées de voile polyester. Une couche de protection intermédiaire constituée d'une natte de polyester ou de polypropylène est conseillée sous le lestage. Cette couche est toujours nécessaire dans le cas d'une toiture inversée.

• Les dalles

Elles doivent, de préférence, être posées sur des plots, eux-mêmes disposés sur une étanchéité et ce, en veillant à ce que la pente ne dépasse pas 10 %.

La surface de contact des plots doit être suffisamment grande pour éviter une pression exagérée sur les matériaux d'étanchéité et d'isolation.

Un entretien régulier est nécessaire afin d'éliminer les salissures et les boues susceptibles de s'accumuler entre les dalles et l'étanchéité.

Sur une étanchéité en pente, les plots réglables permettent d'obtenir une surface de circulation horizontale favorisant un séchage rapide.

• L'asphalte coulé ou le béton monolithique

Ils sont généralement utilisés sur les toitures-parkings ou les accès de secours réservés, par exemple, aux véhicules de pompiers. De telles applications requièrent une étude particulière, étant donné les sollicitations très importantes qui en résultent.

• Les pavements sur gravillon

Des pavés en béton de petit format sont posés sur une couche de gravier de granulométrie de 5 à 8 mm. La couche de gravier a une épaisseur d'environ 3 cm.

Il doit être tenu compte du poids de la protection lourde lors du calcul de la résistance et de la flèche du support.

La couche de protection proprement dite doit être résistante au vent.

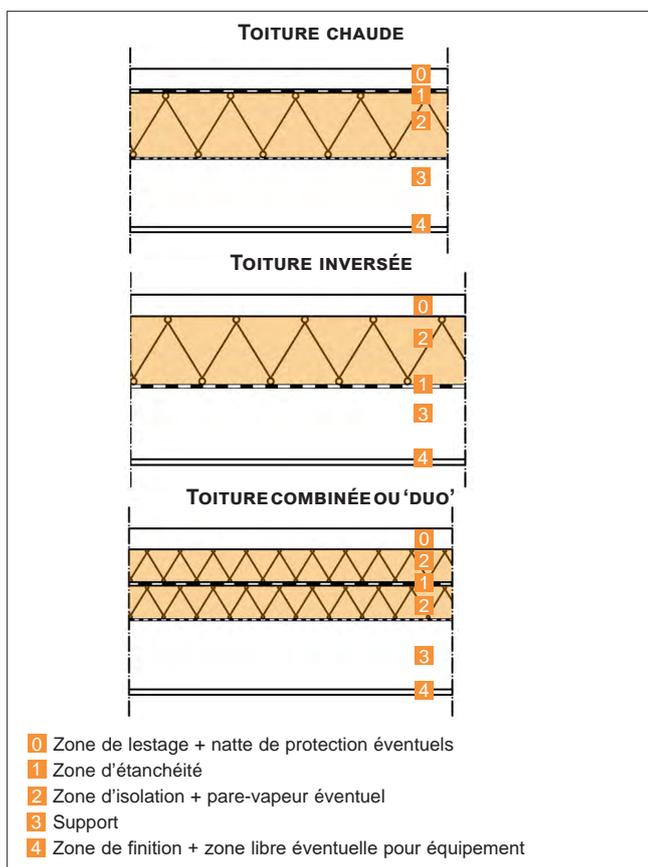
Les éléments indépendants, tels que les dalles ou les panneaux, doivent au moins avoir un certain poids.

Le gravier et les dalles en pose libre rendent l'entretien, le contrôle et les réparations de l'étanchéité plus difficiles. Ils permettent également la formation de poussière et la prolifération de végétaux.

Les matériaux coulés sur place et les dalles sur chape ne permettent pas un accès à l'étanchéité sans détruire la couche de protection.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	118
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE	120
LE PARTI ARCHITECTURAL	121
LES CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE	122
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET	123
EXEMPLE D'ÉTUDE DE DÉTAILS	123
<i>Détail 1 : rive contre toiture inclinée en Zn-Cu-Ti à joints debouts</i>	123
<i>Détail 2 : jonction toiture-terrasse accessibles et baie d'accès</i>	124
<i>Détail 3 : jonction toiture - mur creux devenant mur intérieur sous la toiture</i>	124
<i>Détail 4 : rives acrotères (rive latérale libre) et récolte des eaux de pluie (chêneau)</i>	125



LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET

Le tableau de la page suivante donne une chronologie des choix que l'auteur de projet doit faire lors de la conception d'une toiture plate.

Cette chronologie concerne les toitures de type chaude, inversée et "duo" dont les compositions sont reprises dans l'encadré ci-contre.

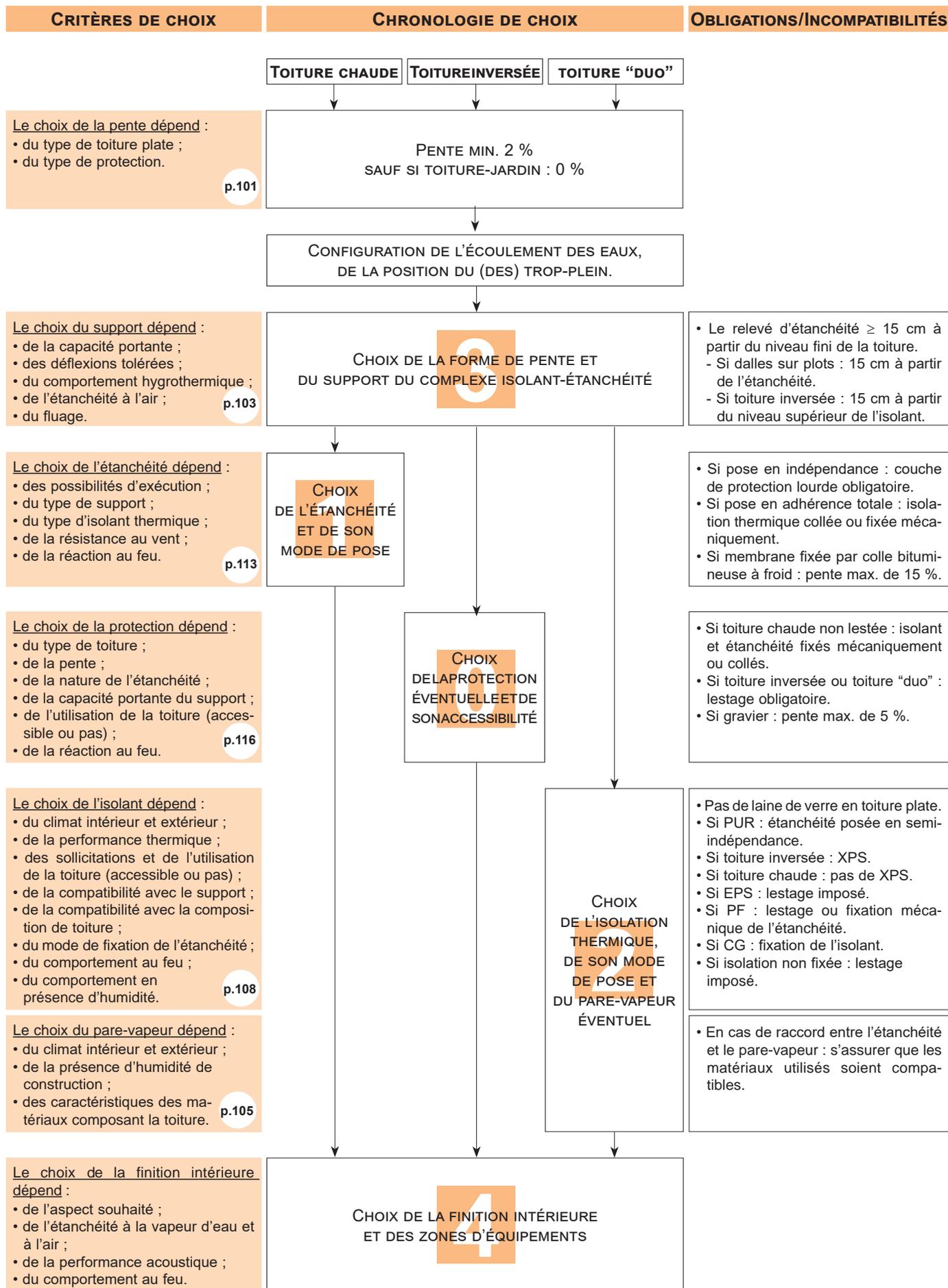
Chaque typologie de toiture est divisée en cinq zones (de 0 à 4) reprises dans le tableau :

- zone de lestage + natte de protection éventuels (zone 0) ;
- zone d'étanchéité (zone 1) ;
- zone d'isolation + pare-vapeur éventuel (zone 2) ;
- zone du support (zone 3) ;
- zone de finition + zone libre éventuelle pour équipements (zone 4).

Le cas de la toiture froide n'est pas abordé dans cette partie car ce type de toiture est fortement déconseillé (voir p. 98).

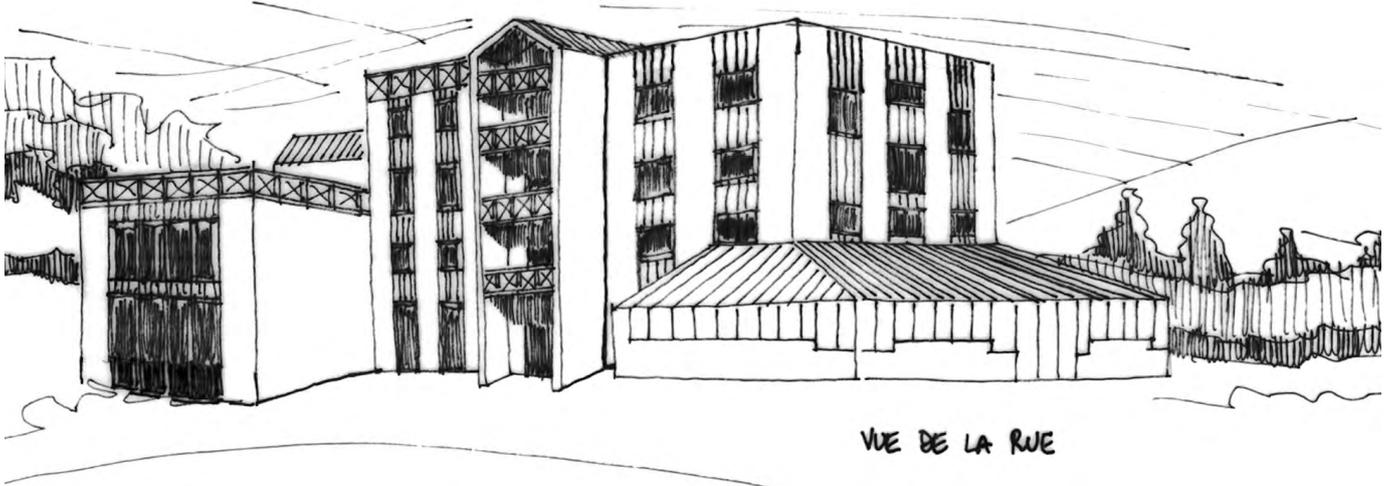
Le tableau reprend également les différents critères de choix ainsi que les principales obligations ou incompatibilités concernant le choix de chacune des zones de la toiture plate.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

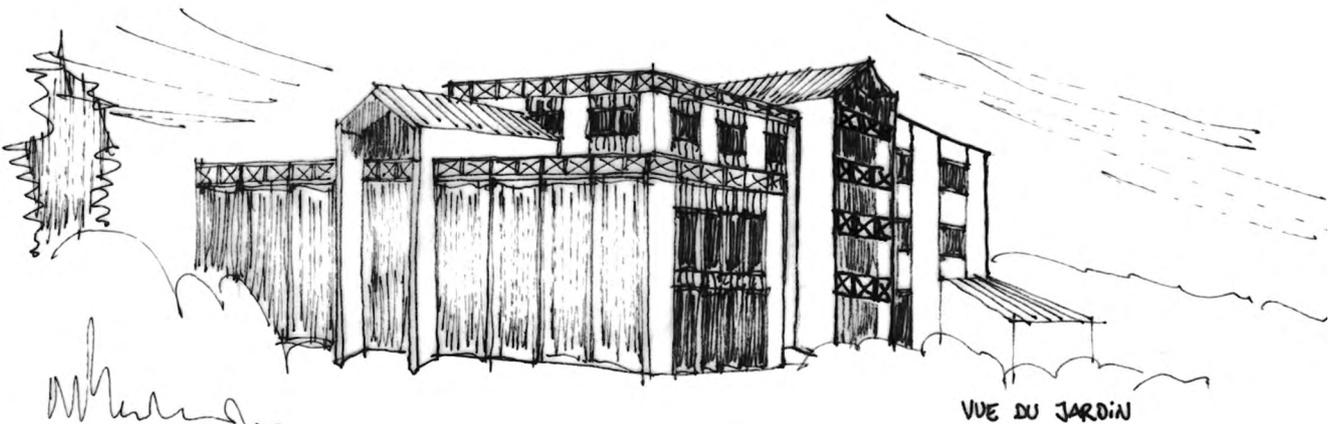
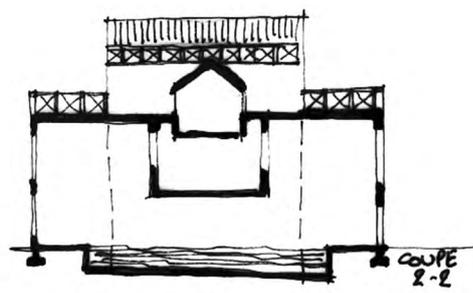
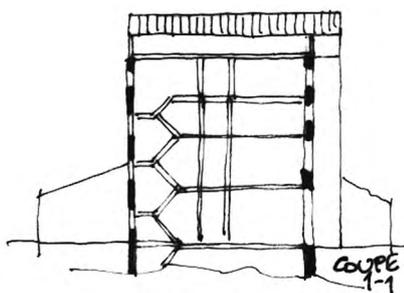
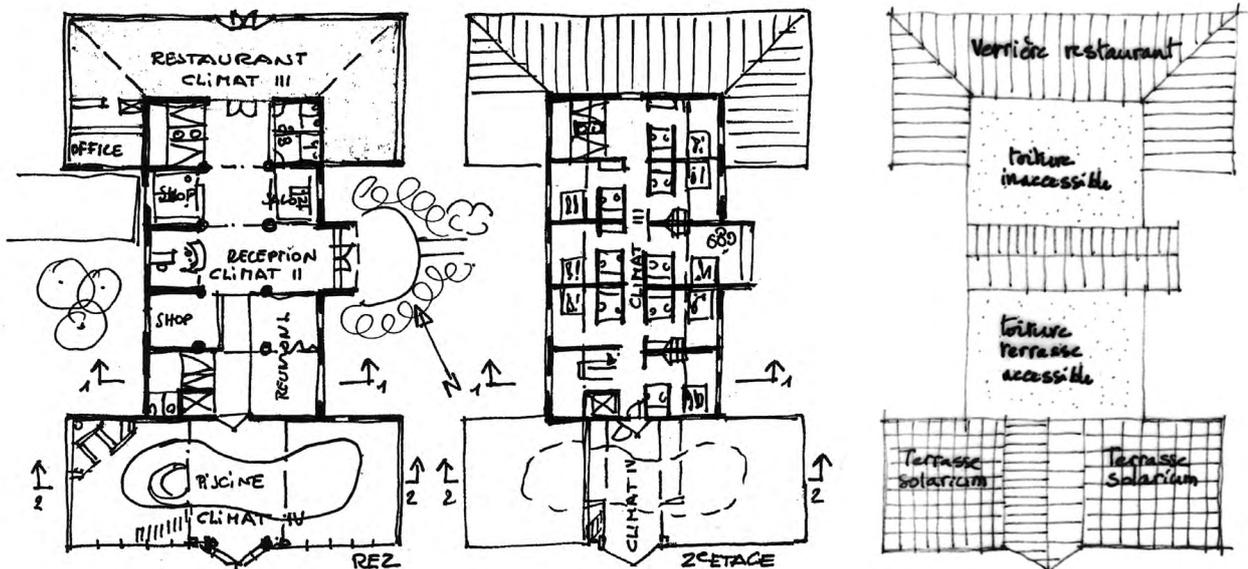


LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE

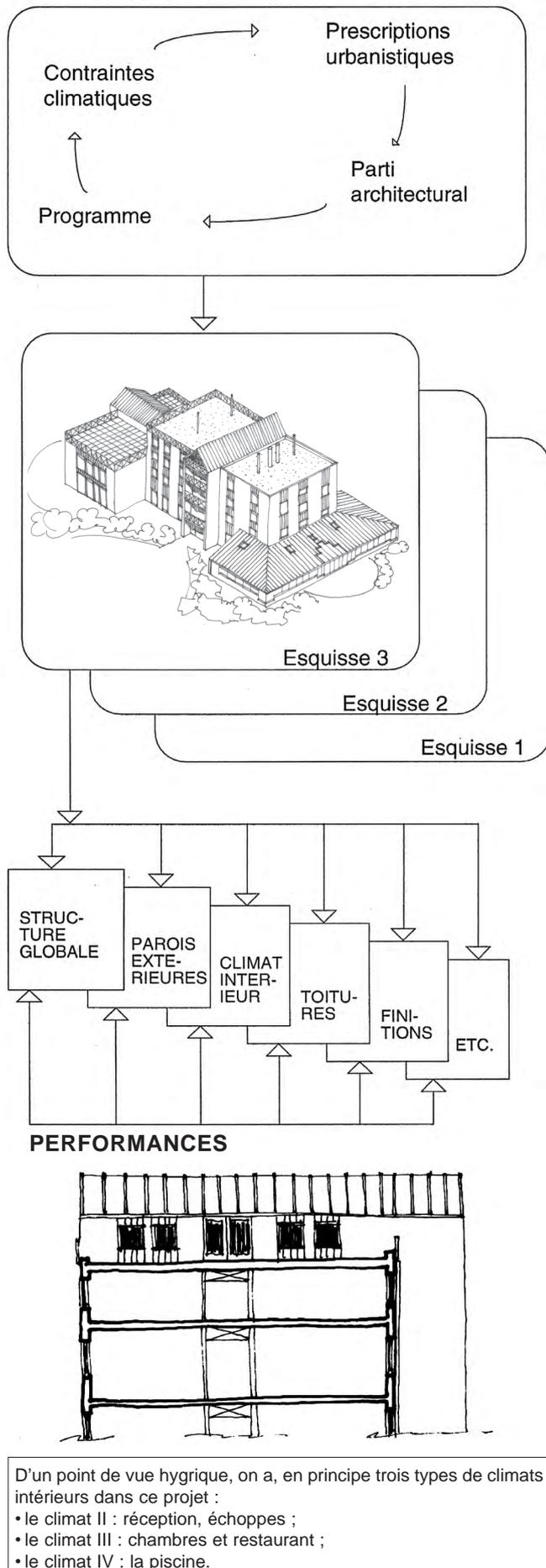


VUE DE LA RUE



VUE DU JARDIN

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES



Soit, à titre d'exemple, le programme architectural d'un petit hôtel, comprenant :

- au rez-de-chaussée : réception, magasins, restaurant, piscine ;
- à l'étage : mezzanine surplombant la piscine et les chambres.

LE PARTI ARCHITECTURAL

L'ensemble du bâtiment de cet hôtel s'inscrit dans un contexte urbanistique et paysager tel que les toitures plate-formes sont privilégiées, par une volonté d'intégration dans le contexte existant, d'autres bâtiments majoritairement recouverts d'une toiture plate.

Ainsi, le volume principal a-t-il été considéré comme un parallépipède rectangle, flanqué d'un volume plus bas abritant la piscine, dont la terrasse sert de solarium. Un autre volume encore plus bas, en appentis, vient enserrer sa base opposée ; ce dernier volume, traité en verrière, abrite le restaurant.

L'inclinaison de cette verrière sera limitée de façon à s'inscrire en dessous des allèges des fenêtres du premier étage, et pouvoir réaliser un raccord parfaitement étanché entre le mur et la rive haute de la toiture en appentis.

Après vérification que les prescriptions urbanistiques permettent ce type de pente pour les volumes secondaires (ou après une demande de dérogation), il est décidé de choisir une peau extérieure en zinc-cuivre-titane à joints debout, de façon à créer un rythme de lignes de pente compatible avec les supports des parties vitrées.

Une "nervure" médiane vient animer chaque volume principal ; la toiture de cette nervure est légèrement inclinée et recouverte de plaques planes en zinc-cuivre-titane. Les eaux ayant ruisselé sur ces toitures peuvent être déversées sur les toitures-terrasses qui pourraient être recouvertes d'un matériau bitumineux : si le zinc-cuivre-titane craint les eaux provenant de toitures bitumineuses, à l'inverse, les matériaux bitumineux peuvent recevoir les eaux provenant d'une toiture en zinc-cuivre-titane.

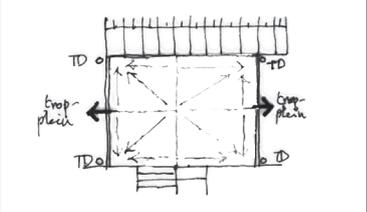
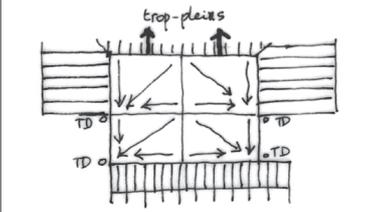
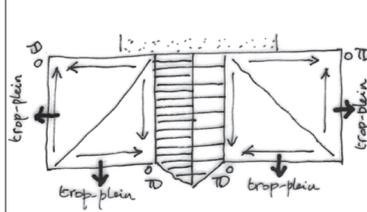
Par contre, toujours dans l'hypothèse d'un choix de matériaux bitumineux pour les toitures des deux volumes principaux, il sera prudent d'utiliser des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales en cuivre ou en PVC plutôt qu'en zinc. On pourrait aussi généraliser l'emploi du cuivre aux toitures inclinées ; le cuivre nécessitant un coût légèrement supérieur, le zinc prépatiné lui a été préféré.

La toiture plate du volume principal est, pour moitié, accessible en toiture-terrasse pour le personnel et la Direction de l'hôtel ; l'autre moitié est considérée comme inaccessible. La toiture recouvrant la piscine est utilisable en tant que solarium, à l'usage des clients de l'hôtel.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

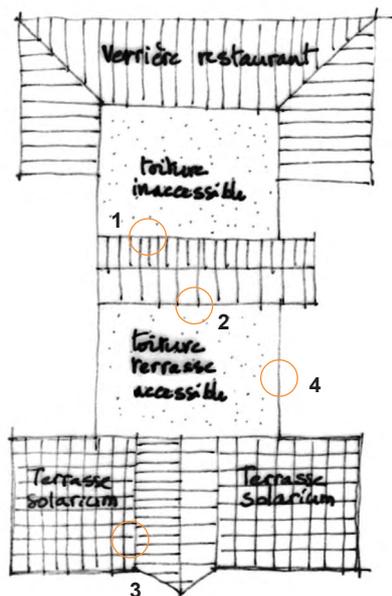
Le tableau ci-après récapitule l'application, à l'exemple, de la méthodologie de conception de la toiture plate telle que schématisée en p. 119.

LE CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE

	TOITURE BÂTIMENT PRINCIPAL - PARTIE ACCESSIBLE	TOITURE BÂTIMENT PRINCIPAL - PARTIE INACCESSIBLE	TOITURE PISCINE - ACCESSIBLE
Système de toiture	Toiture chaude (pente min. 2 %) + lestage par carrelage sur plots.	Toiture inversée avec protection lourde (gravier).	Toiture chaude (pente min. 2 %) + lestage par voligeage sur plots.
Configuration de l'écoulement des eaux	Pour positionner les tuyaux de descente à des arêtes déjà existantes.	Idem	Idem
Positionnement du trop-plein			
Choix de la forme de pente	Béton de pente.	Béton de pente.	Pente intégrée aux panneaux d'isolation (évite humidité de construction du béton de pente).
Choix de l'élément portant	Pour obtenir une inertie thermique, intéressante dans ce type de bâtiment à occupation continue (ou presque), choix d'une dalle monolithe ou d'éléments préfabriqués rendus monolithes.		
Choix de l'étanchéité	Membrane bitumineuse de type SBS, plus élastique et moins fragile à l'appui des plots.	Membrane bitumineuse de type APP.	Plutôt membrane PVC, laissant un peu mieux diffuser la vapeur que les autres membranes.
Choix du mode de pose	Pose en indépendance (pour meilleure durabilité de l'étanchéité).	Pose en adhérence totale (pour meilleure résistance au vent de cette partie de toiture la plus exposée).	Fixation mécanique (protection restant légère).
Choix de la protection éventuelle	Carrelage sur plots (= protection lourde) <u>Attention</u> : la protection lourde étant ajourée, on ne peut considérer que son comportement au feu est satisfaisant.	Gravier (= protection lourde)	Voligeage sur plots (= pour confort des usagers) <u>Attention</u> : la protection étant ajourée, on ne peut considérer que son comportement au feu est satisfaisant.
Choix de l'isolation thermique et de son mode de pose	Panneaux de PIR.	Puisque toiture inversée : XPS.	Verre cellulaire CG offrant une meilleure protection contre la diffusion accidentelle de vapeur d'eau (climat IV) + panneaux à pente intégrée.
Finition intérieure	Double plaque de plâtre posée sur un lattage permettant une zone d'équipement (principalement électrique) et offrant une résistance au feu supplémentaire.		Voligeage ajouré avec couche d'isolation phonique (MW) absorbante derrière les planches ; il est posé sur un lattage offrant une zone d'équipement.
Résistance au feu	Pour un bâtiment moyen, les toitures doivent présenter R60, à moins que le plancher sous toiture ne présente REI 60 et que l'accès éventuel à l'espace sous toiture, qui doit être vide, se fasse par des portes ou trappes présentant EI1 30.		Pour un bâtiment bas, les toitures doivent présenter R30, à moins que la toiture soit séparée du reste du bâtiment par un élément de construction EI 30.

LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET

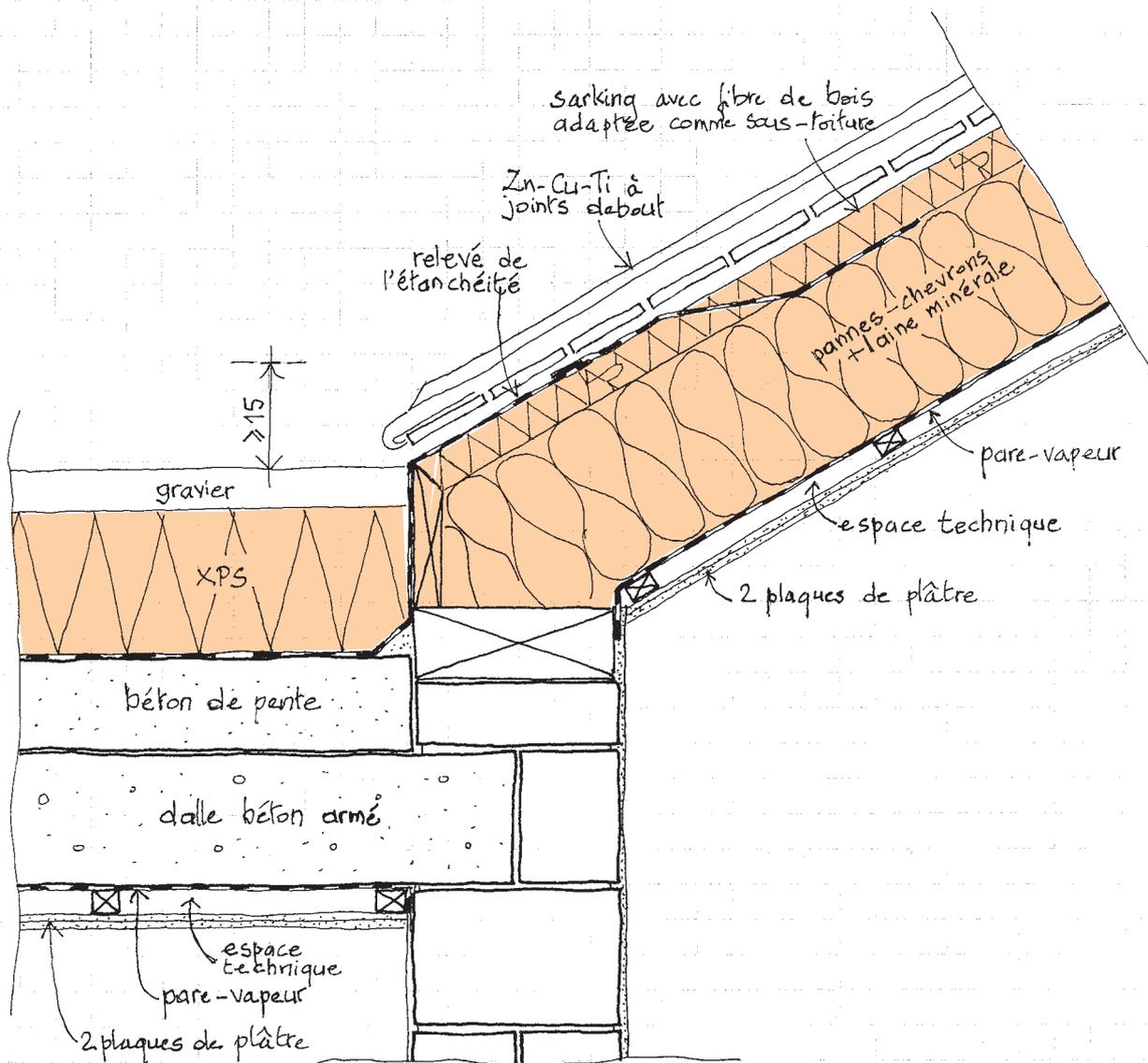


EXEMPLE D'ÉTUDE DE DÉTAILS

Les détails examinés sont les suivants :

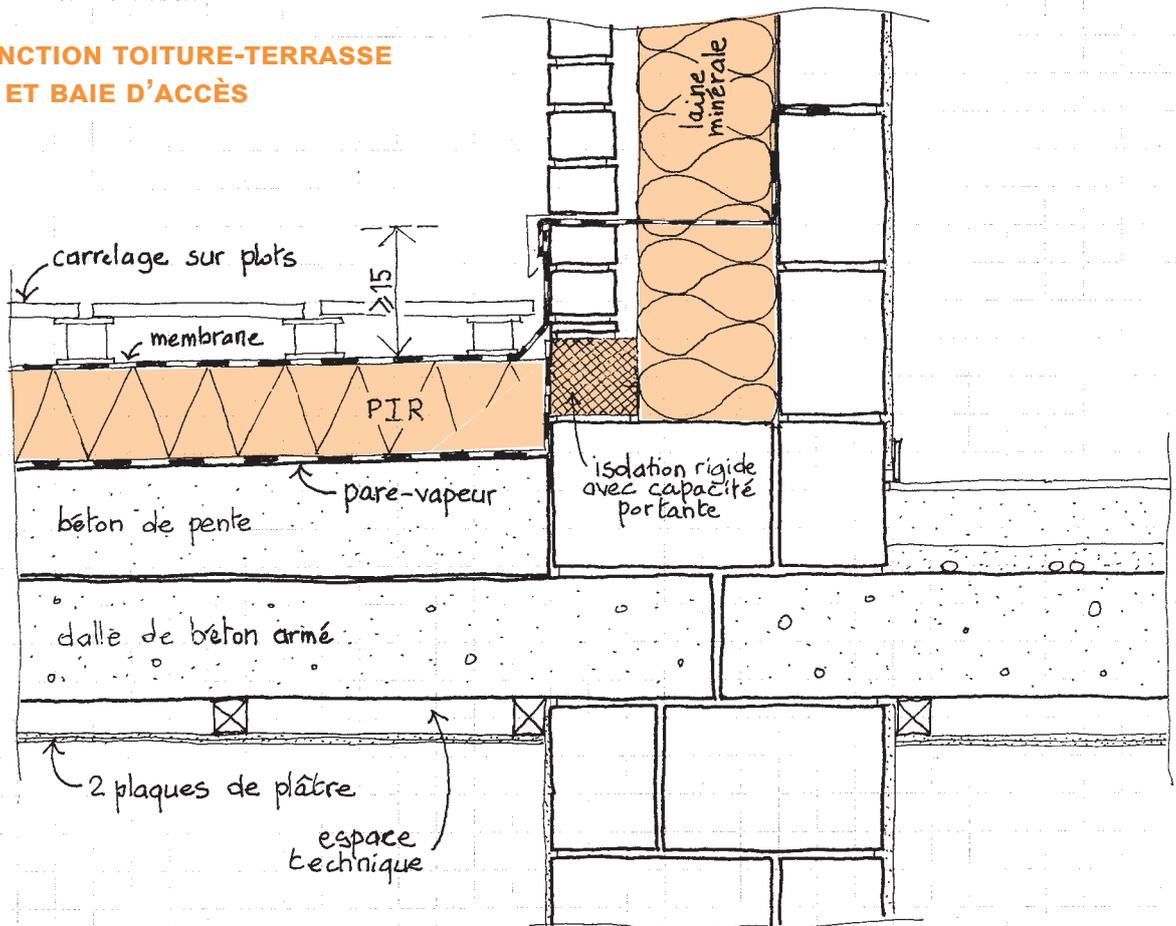
- détail 1 : rive contre toiture inclinée en Zn-Cu-ti à joints debouts ;
- détail 2 : jonction toiture-terrasse accessible et baie d'accès ;
- détail 3 : jonction toiture - mur creux (surplombant la toiture) devenant mur intérieur sous la toiture ;
- détail 4 : rives acrotères (rive latérale libre) et récolte des eaux de pluie (chêneau).

DÉTAIL 1 : RIVE CONTRE TOITURE INCLINÉE EN ZN-CU-TI À JOINTS DEBOUT

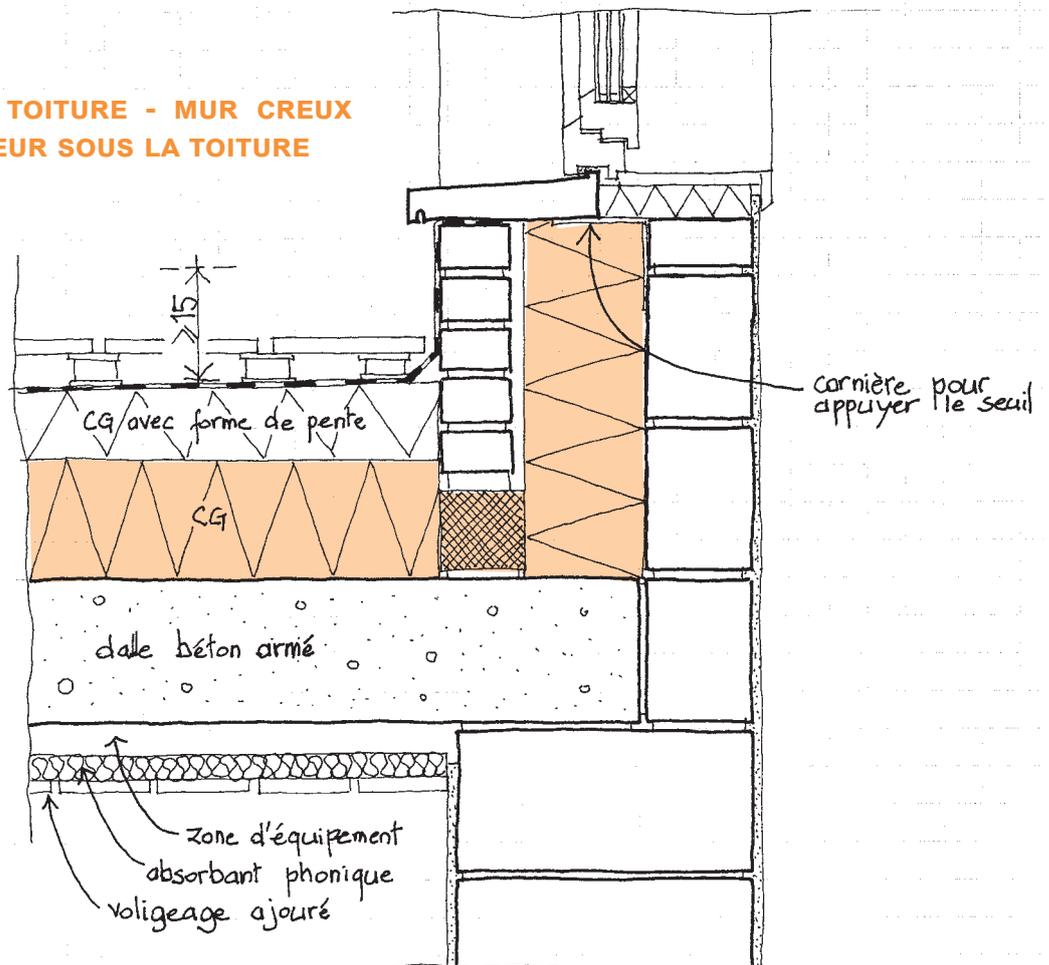


LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

DÉTAIL 2 : JONCTION TOITURE-TERRASSE ACCESSIBLES ET BAIE D'ACCÈS

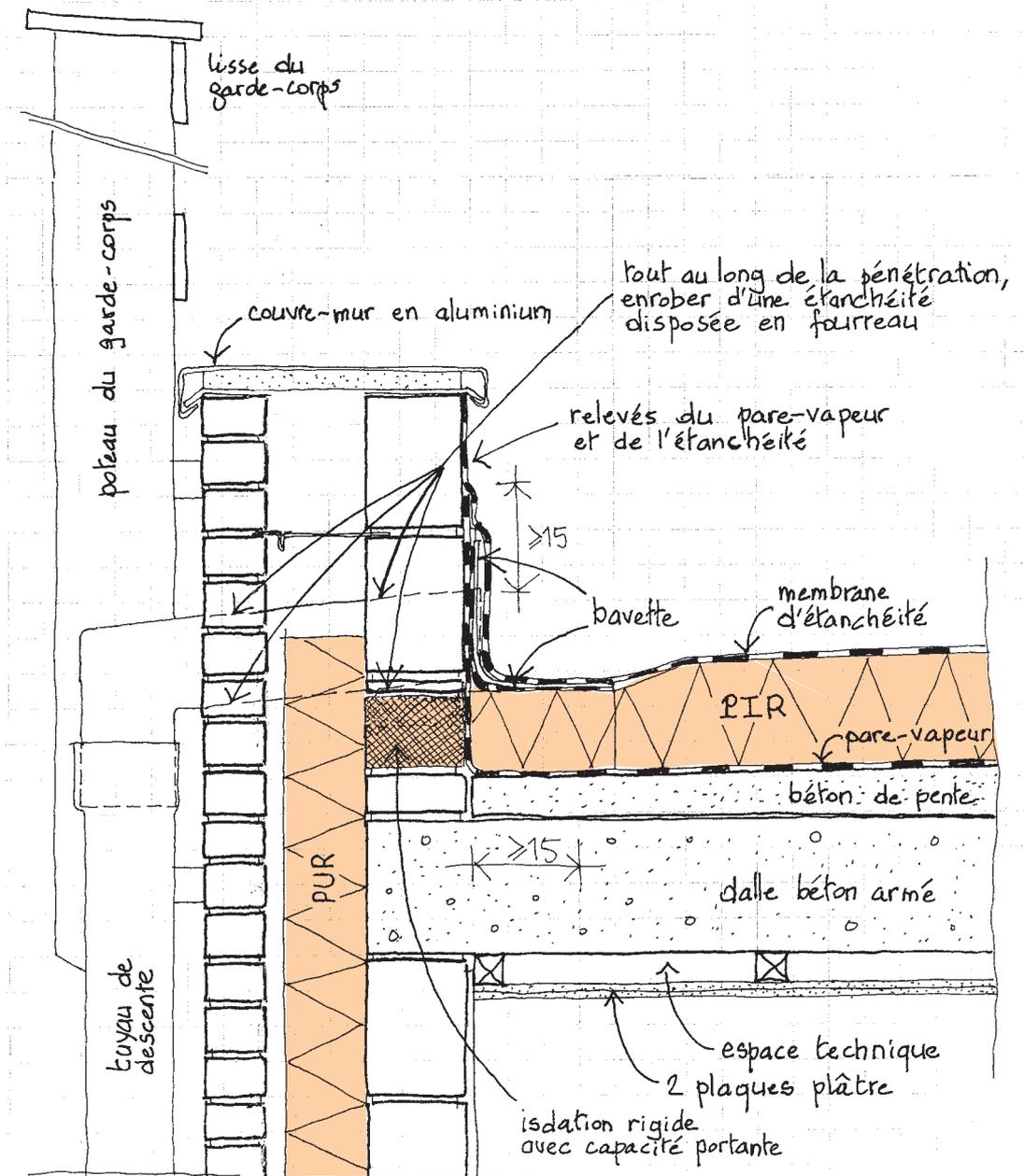


DÉTAIL 3 : JONCTION TOITURE - MUR CREUX DEVENANT MUR INTÉRIEUR SOUS LA TOITURE



LA MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES

DÉTAIL 4 : RIVES ACROTÈRES (RIVE LATÉRALE LIBRE) ET RÉCOLTE DES EAUX DE PLUIE (CHÉNEAU)



- [ARCH-13] ARCHITECTURE ET CLIMAT (2013), *Energie+ version 8 : Conception et rénovation énergétique des bâtiments tertiaires*, UCL, SPW (DGO4)
- [CIFI-99] CIFIUL (Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège), CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction), Ministère de la Région Wallonne - DGTRE (1999), *Isolation thermique des toitures inclinées - Guide pratique du menuisier et du couvreur*, Fonds de Formation professionnelle de la Construction
- [CIFI-09] CIFIUL (Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège) (2009), *Isolation thermique des bâtiments*, Outil didactique, Editions du FFC - ULg - SPW (DGO4)
- [CIFI-10] CIFIUL (Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège) (2010), *Guide bâtiments résidentiels*, Editions ULg - SPW (DGO4)
- [CSTC-82] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1982), *Comportement à l'humidité des éléments de construction. Application aux toitures*, in CSTC - Revue n°1
- [CSTC-89-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1989), *NIT 175 Toitures en tuiles de terre cuite. Conception et mise en oeuvre*
- [CSTC-89-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1989), *Les toitures-jardins*
- [CSTC-92-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1992), *NIT 184 Couvertures par feuilles et bandes en matériaux cuivreux*
- [CSTC-92-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1992), *NIT 186 Toitures en tuiles plates. Conception et mise en oeuvre*
- [CSTC-92-3] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1992), *Choisir la pente d'une toiture selon le matériau de couverture*, in CSTC - Revue n°1
- [CSTC-94-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1994), *Couvertures en plaques ondulées de fibres-ciment*, in CSTC - Revue n°1, Hiver 1993 et Printemps 1994
- [CSTC-94-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1994), *NIT 191 La toiture plate. 2e partie. Exécution des ouvrages de raccord*
- [CSTC-95-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1995), *NIT 195 Toitures en ardoises naturelles. 1e partie. Conception et mise en oeuvre*
- [CSTC-95-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1995), *NIT 196 Les balcons*
- [CSTC-96] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1996), *NIT 202 Toitures en tuiles de béton. Conception et mise en oeuvre*
- [CSTC-98-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1998), *Isolation thermique des murs pleins*, Ministère de la Région Wallonne - DGTRE
- [CSTC-98-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (1998), *Isolation thermique de la toiture plate*, Ministère de la Région Wallonne - DGTRE
- [CSTC-00] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2000), *NIT 215 La toiture plate : Composition - Matériaux - Réalisation - Entretien*
- [CSTC-05] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2005), *Contact n°6, Les produits minces réfléchissants*
- [CSTC-06] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2006), *NIT 229 Les toitures vertes*
- [CSTC-11-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2011), *NIT 240 Toitures en tuiles*
- [CSTC-11-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2011), *NIT 240.1 Tuiles de terre cuite*, Addendum 1 à la NIT 240
- [CSTC-11-3] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2011), *NIT 240.2 Tuiles de béton*, Addendum 2 à la NIT 240
- [CSTC-12] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2012), *Contact n°33, Edition spéciale : étanchéité à l'air*
- [CSTC-14] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2014), *Spécifications techniques unifiées STS P71.3 Etanchéité à l'air des bâtiments - Essai de pressurisation*, Editeur : SPF Economie
- [CSTC-15-1] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2015), *NIT 255 L'étanchéité à l'air des bâtiments*
- [CSTC-15-2] CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) (2015), *Spécifications techniques unifiées STS P73.1 Systèmes pour la ventilation de base dans les applications résidentielles*, Editeur : SPF Economie
- [CTIB-08] CTIB-TCHN, SECO, CSTC, FEDUSTRIA,

- PROBOIS, ABPB, FNS, HOUT INFO BOIS, FNN, FBNS (2008), *Spécifications techniques unifiées STS 31 Charpenterie*, Editeur : SPF Economie
- [GF -97] GF (Gouvernement Fédéral) (1997), *Annexes à l'arrêté royal du 19 décembre 1997 modifiant l'arrêté royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire*, Moniteur belge du 30/12/97
- [GF -09] GF (Gouvernement Fédéral) (2009), *Arrêté Royal modifiant l'arrêté royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire*, Moniteur belge du 1/03/09
- [GF -12] GF (Gouvernement Fédéral) (2012), *Arrêté Royal du 12 juillet 2012 modifiant l'Arrêté Royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire*, Moniteur belge du 21/09/2012
- [GW -14] GW (Gouvernement Wallon) (2014), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 15 mai 2014 déterminant la méthode de calcul et les exigences, les agréments et les sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments*
- [GW -15] GW (Gouvernement Wallon) (2015), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 19 novembre 2015 modifiant l'AGW du 15/05/2014 portant exécution du décret du 28/11/2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*
- [GW -16-1] GW (Gouvernement Wallon) (2016), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 28 janvier 2016 modifiant l'AGW du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*
- [GW -16-2] GW (Gouvernement Wallon) (2016), *Arrêté du Gouvernement Wallon du 15 décembre 2016 modifiant l'AGW du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*
- [HENS-91] HENS H. (1991) *Hellende daken, of, hoe onderzoek traditionele ideeën onderuit haalt, Journée d'étude Fysisch gedrag van hellende daken. Nieuwe inzichten*, Anvers
- [IBN -80] IBN (Institut Belge de Normalisation) (1980), *NBN S21-203, Protection contre l'incendie dans les bâtiments - Réaction au feu des matériaux - Bâtiments élevés et bâtiments moyens*
- [IBN -91] IBN (Institut Belge de Normalisation) (1991), *NBN D50-001, Dispositifs de ventilation dans les bâti-ments d'habitation*
- [IBN -00] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2000), *NBN-EN 12056-3, Réseaux d'évacuation gravitaire à l'intérieur des bâtiments - Partie 3 : système d'évacuation des eaux pluviales, conception et calculs*
- [IBN -01] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2001), *NBN EN 13829, Performance thermique des bâti-ments – Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments – Méthode de pressurisation par ventila-teur*
- [IBN -03] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2003), *NBN B62-003, Calcul des déperditions calorifiques, 1986 et NBN EN 12831, Systèmes de chauffage dans les bâtiments - Méthode de calcul des déper-ditions calorifiques de base (remplace partiellement la NBN B 62-003)*
- [IBN -04] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2004), *NBN B46-401, La toiture plate : Composition - Matériaux - Réalisation – Entretien*
- [IBN -08-1] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2008), *NBN B 62-002, Performances thermiques de bâti-ments - Calcul des coefficients de transmission thermique (valeurs U) des composants et éléments de bâtiments - Calcul des coefficients de transfert de chaleur par transmission (valeur HT) et par ven-tilation (valeur Hv)*
- [IBN -08-2] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2008), *NBN B62-301, Performance d'isolation thermique des bâtiments - Niveau K d'isolation thermique glo-bale des bâtiments*
- [IBN -08-3] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2008), *NBN S01-400-01, Critères acoustiques pour les immeubles d'habitation*
- [IBN -09-1] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2009), *NBN EN 13501-1 :2007 +A1 : 2009 Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1: Classement à partir des données d'essais de réaction au feu*
NBN EN 13501-2 : 2007 +A1 : 2009 Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 2: Classement à partir des données d'essais de résistance au feu à l'exclusion des produits utili-sés dans les systèmes de ventilation
NBN EN 13501-5 : 2005 + A1 : 2009 Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 5: Classement utilisant des données d'essais au feu des toitures exposées à un feu extérieur

- [IBN -09-2] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2009), *NBN EN ISO 10456/AC, Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques*
- [IBN -12] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2012), *NBN S01-400-02, Critères acoustiques pour les écoles*, 2012
- [IBN -13] IBN (Institut Belge de Normalisation) (2013), *NBN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-1 : Actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation bâtiments - Partie 1-2: Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu (+ AC:2013) - Partie 1-3: Actions générales - Charges de neige (+ AC:2009) - Partie 1-4: Actions générales - Actions du vent (+ AC:2010) - Partie 1-4 ANB : Actions générales - Actions du vent - Annexe nationale - Partie 1-4/1 : Actions générales - Actions du vent*
- [IEA -91] IEA (International Energy Agency) (1991), Report Annex XIV, *Condensation and Energy*, Volume 3 : Catalogue of Material Properties
- [JANS-98] JANSSENS A (1998)., *Reliable Control of Interstitial Condensation in Lightweight Roof Systems - Calculation and Assessment Methods*, Thèse de doctorat défendue à la KUL
- [KUMA-96] KUMARAN K. (1996), *Material Properties, International Energy Agency Annex XXIV Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts*, Final Report Volume 3
- [OLIV-01] OLIVIA J.-P. (2001), *L'isolation écologique - Conception - Matériaux - Mise en oeuvre*, Editions Terre Vivante
- [PHYS-15-1] PHYSIBEL (2015), *Bisco : logiciel 2D de calcul du transfert de chaleur, version 11.0w*
- [PHYS-15-2] PHYSIBEL (2015), *Glasta : logiciel de calcul du transfert de la vapeur d'eau au travers des parois, version 5.0w*
- [PHYS-15-3] PHYSIBEL (2015), *Kobra : logiciel de calcul de ponts thermiques tri-dimensionnels, version 3.0w*
- [PHYS-15-4] PHYSIBEL (2015), *Kobru : logiciel de calcul de ponts thermiques bi-dimensionnels, version 13.0w*
- [PHYS-15-5] PHYSIBEL (2015), *Trisco : logiciel 3D de calcul du transfert de chaleur, version 13.0w*
- [SIMO-96-1] SIMON F. (1996), *Cours de Composition architectonique et d'Architecture civile*, UCL
- [SIMO-96-2] SIMON F. (1996), *Techniques de rénovation de l'habitat en Région wallonne*, Travail collectif - Direction : F. SIMON - MRW (DGATLP), U.C.L. Unité Architecture
- [SPWE-17] SPW Energie (Service Public de Wallonie Energie - Direction des bâtiments durables) (2017), *Bilans énergétiques DGO4 - 2014*
- [UBAT-97] UBAtc (Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction) (1997), *Systèmes d'isolation thermique*, Feuillet d'information 97/2
- [UBAT-98] UBAtc (Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction) (1998), *Comportement au feu des toitures plates - L'approche ATG*, Feuillet d'information 98/1
- [UBAT-01] UBAtc (Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction) (2001), *Panneaux de toiture à base de bois autoportants et résistants au feu - Approche ATG*, Feuillet d'information 01/01
- [UBAT-11] UBAtc (Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction) (2011), *Murs creux isolés de façades en maçonnerie*, Feuillet d'information 2011/1

ANNEXE 1

DONNÉES

HYGROTHERMIQUES

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE AUX SURFACES ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	129
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE	129
RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	130
COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U DES FENÊTRES	130
LES PARE-VAPEUR	132
LES SOUS-TOITURES	132
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	133
LES MATÉRIAUX ISOLANTS	134

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR

AGW PEB DU 15/12/16, ANNEXE 3 [GW -16-2]

RÉSISTANCE THERMIQUE D'ÉCHANGE

Pour les surfaces planes et en l'absence de toute information spécifique concernant les conditions de bord, les valeurs de conception des résistances thermiques d'échange R_{si} (conditions intérieures) et R_{se} (conditions extérieures) du tableau ci-dessous peuvent être utilisées.

Ces valeurs sont valables pour des surfaces en contact avec de l'air.

	DIRECTION DU FLUX DE CHALEUR		
	Ascendant	Horizontal ⁽¹⁾	Descendant
R_{si} [m ² K/W]	0,10	0,13	0,17
R_{se} [m ² K/W]	0,04	0,04	0,04
<small>(1) Valable pour une direction du flux de chaleur qui ne dévie pas de plus de ± 30° du plan horizontal</small>			

RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE R_{si} ET R_{se} (EN m²K/W)

RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR

La résistance thermique d'une couche d'air est dépendante du type de couche d'air, de la direction du flux thermique à travers la couche d'air, de son épaisseur, de la géométrie et de la pente de la couche d'air, de l'émissivité des surfaces délimitantes et des possibilités de ventilation de la couche d'air.

Suivant les cas, la résistance thermique de la couche d'air peut être déterminée soit avec précision par des essais ou des calculs, soit à l'aide de valeurs par défaut qui peuvent être sélectionnées dans des tableaux.

Dans certains cas, la résistance thermique de la couche d'air ou du creux n'est pas calculée séparément mais est déjà comprise dans la valeur U de l'élément de construction dans lequel cette lame d'air ou ce creux sont présents (c'est le cas par exemple des briques perforées, des blocs creux, des vitrages, des encadrements, ...).

NOTE : Les couches d'air ayant une épaisseur supérieure à 300 mm sont traitées comme des espaces adjacents non-chauffés.

Les différentes valeurs à considérer pour la résistance thermique d'une couche d'air sont détaillées dans l'Annexe 3 de l'AGW PEB du 15/12/16 (point 5.4 – Résistance thermique des couches d'air) [GW -16-2].

EXEMPLE DE RÉSISTANCES THERMIQUES EN (m²K/W) DES COUCHES D'AIR NON VENTILÉES ORDINAIRES, DÉLIMITÉES PAR DES SURFACES À ÉMISSIVITÉ ÉLEVÉE

ÉPAISSEUR D DE LA COUCHE D'AIR [MM]	DIRECTION DU FLUX THERMIQUE		
	ASCENDANT	HORIZONTAL (1)	DESCENDANT
0 < d < 5	0,00	0,00	0,00
5 ≤ d < 7	0,11	0,11	0,11
7 ≤ d < 10	0,13	0,13	0,13
10 ≤ d < 15	0,15	0,15	0,15
15 ≤ d < 25	0,16	0,17	0,17
25 ≤ d < 50	0,16	0,18	0,19
50 ≤ d < 100	0,16	0,18	0,21
100 ≤ d < 300	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

(1) pour un flux thermique qui ne dévie pas de plus de ± 30° du plan horizontal

COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U DES FENÊTRES

COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DES FENÊTRES ET PORTES, DE MATÉRIAUX ET DE DIMENSIONS STANDARD

Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre U_w ou d'une porte U_D ayant des dimensions connues et pourvue de parties vitrées et/ou de panneaux de remplissage opaques et/ou de grilles de ventilation, est généralement calculé au moyen de la formule suivante :

$$U_w \text{ (ou } U_D) = \frac{A_g U_g + A_f U_f + A_p U_p + A_r U_r + l_g \Psi_g + l_p \Psi_p}{A_g + A_f + A_p + A_r}$$

où,

A [m²] = superficie du vitrage (A_g), du châssis (A_f), de la grille de ventilation (A_r) ou du panneau de remplissage (A_p)

U [W/m²K] = coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g), du châssis (U_f), du panneau de remplissage opaque (U_p) ou de la grille de ventilation (U_r)

Ψ [W/mK] = coefficient de transmission linéique tenant compte des effets combinés

- du vitrage, de l'intercalaire et de l'encadrement (Ψ_g)
- du panneau de remplissage, de l'intercalaire et de l'encadrement (Ψ_p)

l [m] = longueur du raccordement entre l'encadrement et

- le vitrage (l_g)
- le panneau de remplissage (l_p).

La procédure générale pour la détermination de la valeur U des fenêtres et des portes est détaillée dans l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2].

Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre (U_w) est déterminé soit par des essais selon la NBN EN ISO 12567-1 (ou NBN EN ISO 12567-2 pour les fenêtres de toit), soit d'après un calcul décrit dans l'Arrêté. Dans l'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment dans le cadre de la PEB, un calcul fenêtre par fenêtre est en principe réalisé, utilisant la formule reprise dans l'encadré ci-contre.

Une approche simplifiée est également autorisée. Pour des fenêtres sans grille de ventilation ni panneau de remplissage, le coefficient se calcule comme suit :

$$\text{si } U_g \leq U_f, \text{ alors : } U_{w,T} = 0,7 U_g + 0,3 U_f + 3 \Psi_{f,g} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$\text{si } U_g > U_f, \text{ alors : } U_{w,T} = 0,8 U_g + 0,2 U_f + 3 \Psi_{f,g} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

A titre indicatif, le tableau de la page suivante fournit quelques valeurs de coefficients de transmission thermique $U_{w,T}$ des fenêtres, calculés d'après cette procédure

ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

Cette équation peut être utilisée pour les fenêtres constituées de plusieurs types de vitrages, encadrements ou panneaux de remplissage.

Dans son paragraphe « 9. Coefficient de transmission thermique des composants des fenêtres et des portes », l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 donne le détail du mode de calcul des coefficients de transmission thermique du vitrage, de l'encadrement, du panneau de remplissage opaque éventuel et de la grille de ventilation éventuelle.

Elle donne également :

- le coefficient de transmission thermique linéique tenant compte des effets combinés du vitrage, de l'intercalaire et de l'encadrement ;
- et le coefficient de transmission thermique linéique tenant compte des effets combinés du panneau de remplissage, de l'intercalaire et de l'encadrement.

simplifiée tenant compte d'une proportion fixe entre l'aire du vitrage et l'aire du châssis, ainsi que d'un périmètre fixe de la vitre ou des intercalaires. Les jonctions entre les profilés et les vitrages sont pourvues d'intercalaires dont le coefficient de transmission thermique Ψ_g [W/mK] est repris dans le tableau ci-dessous, avec pour hypothèse que l'intercalaire choisi est « isolant » lorsque $U_g \leq 1,1$ W/m²K.

La valeur U des fenêtres concerne l'ensemble de la fenêtre, c'est-à-dire la partie vitrage et le châssis et l'intercalaire.

Elle sera plus importante que la valeur U centrale du vitrage, à cause de l'influence du châssis, de l'intercalaire et des raccords au mur.

$U_{w,max} = 1,5$ W/m ² K $U_{g,max} = 1,1$ W/m ² K			VITRAGE DOUBLE				VITRAGE TRIPLE		
			air + 0 couche peu émissive 4/12/4	argon + 1 couche peu émissive 4/12/4	argon + 1 couche peu émissive 4/15/4	krypton + 2 couches peu émissives 6/10/4	argon + 2 couches peu émissives 4/15/4/15/4	argon + 2 couches peu émissives 4/18/4/18/4	
CHÂSSIS			$U_g = 2,9$	$U_g = 1,3$	$U_g = 1,1$	$U_g = 0,8$	$U_g = 0,6$	$U_g = 0,5$	
Type de châssis	U_f		$\Psi_g = 0,06$	$\Psi_g = 0,11$	$\Psi_g = 0,07$	$\Psi_g = 0,07$	$\Psi_g = 0,07$	$\Psi_g = 0,07$	
Métal (alu, acier...)	Coupure 20 mm	2,75	3,05	2,07	1,81	1,60	1,46	1,39	
	Coupure 28 mm	2,55	3,01	2,01	1,75	1,54	1,40	1,33	
	Coupure 36 mm	2,50	3,00	1,99	1,73	1,52	1,38	1,31	
	U_f déterminé par calcul selon norme EN ISO 10077-2, par le fabricant de châssis		1,60	2,82	1,72	1,46	1,25	1,11	1,04
			1,20	2,74	1,61	1,34	1,13	0,99	0,92
		0,90	2,68	1,55	1,27	1,04	0,90	0,83	
		0,71 (2)	2,64	1,51	1,23	0,99	0,84	0,77	
PUR ép. ≥ 8 mm avec renfort métal.		2,80	3,06	2,08	1,82	1,61	1,47	1,40	
Bois type 1 : Afzelia, Merbau, Chêne...	ép. 60 mm	2,20	2,94	1,90	1,64	1,43	1,29	1,22	
	ép. 80 mm	1,96	2,89	1,83	1,57	1,36	1,22	1,15	
	ép. 120 mm	1,58	2,82	1,71	1,45	1,24	1,10	1,03	
Bois type 2 : Dark Red Meranti, Sapelli...	ép. 60 mm	2,10	2,92	2,87	1,61	1,40	1,26	1,19	
	ép. 80 mm	1,85	2,87	1,80	1,54	1,33	1,19	1,12	
	ép. 120 mm	1,48	2,80	1,68	1,42	1,21	1,07	1,00	
Bois type 3 : Pin sylvestre, Résineux...	ép. 60 mm	1,93	2,89	1,82	1,56	1,35	1,21	1,14	
	ép. 80 mm	1,67	2,83	1,74	1,48	1,27	1,13	1,06	
	ép. 120 mm	1,32	2,76	1,64	1,38	1,17	1,03	0,96	
Bois + PUR + capot alu (1)		0,66 (3)	2,63	1,50	1,22	0,98	0,83	0,76	
PVC avec ou sans renforts métalliques	2 chambres	2,20	2,94	1,90	1,64	1,43	1,29	1,22	
	3 chambres	2,00	2,90	1,84	1,58	1,37	1,23	1,16	
	4 chambres	1,80	2,86	1,78	1,52	1,31	1,17	1,10	
	5 chambres	1,60	2,82	1,72	1,46	1,25	1,11	1,04	
	+ PUR (1)		0,74 (4)	2,65	1,52	1,24	1,00	0,85	0,78

REMARQUES : Selon la réglementation énergétique wallonne en vigueur à partir du 1/01/2017 [GW -16-1], la valeur U_w ne peut être supérieure à 1,5 W/m²K, et la valeur de U_g ne peut dépasser 1,1 W/m²K. Les fenêtres ne respectant pas cette double condition sont grisées dans le tableau.

(1) Selon la fabricant de châssis, qui détermine la valeur de U_f par calcul, conformément à la norme EN ISO 10077-2

(2) Pour atteindre cette performance, les chambres en alu sont remplies de mousse isolante

(3) Pour atteindre cette performance, les cadres extérieurs du châssis en bois (dormant et ouvrant) sont recouverts d'une mousse isolante, elle-même protégée d'un capot en aluminium

(4) Pour atteindre cette performance, les chambres de PVC sont remplies de mousse isolante

ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

PROFILÉ D'ENCADREMENT	SIMPLE VITRAGE	VITRAGE MULTIPLE			
		$U_g > 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$		$U_g \leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	
		Intercalaire normal	Intercalaire isolant	Intercalaire normal	Intercalaire isolant
$U_i \geq 5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$	0	0,02	0,01	0,05	0,04
$U_i < 5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$	0	0,06	0,05	0,11	0,07

LES PARE-VAPEUR

MATERIAUX PARE-VAPEUR		$\mu \times d$ [m]
Papier peint	ordinaire ép. $\pm 0,15 \text{ mm}$	0,03
	textile ép. $\pm 1 \text{ mm}$	0,045
	vinyl ép. $\pm 1 \text{ mm}$	0,43
Papier bitume	sur une face	0,70
Papier kraft	bitumé ou revêtu d'une feuille d'alu	5,00 (E2)
Plaque de plâtre	enrobé avec une feuille alu ép. $9 \mu\text{m}$	5,00 (E2)
	enrobé avec une feuille alu ép. $15 \mu\text{m}$	15 (E2)
	enrobé avec une feuille alu ép. $30 \mu\text{m}$	35 (E3)
Membrane	en PVC	40 (E3)
	en polyisobuthylène	520 (E4)
Peinture	minérale	0,02
	au latex	0,60
	acrylique	0,70
	à l'huile	2,40 (E1)
	vernis d'adhérence	1,35
Film	polymère à base de polyamide hydrorégulant	été : $> 0,2$
		hiver : 15 (E2)
Feuille	de polyéthylène armé micro-perforé	2,5 (E1)
	de polyéthylène ép. $0,2 \text{ mm}$	7,50 (E2)
	de polyéthylène ép. $0,4 \text{ mm}$	15 (E2)
	en alu armé	4,3 (E1)
	en alu plastifié sur 1 face	20 (E2)
	en alu plastifié sur 2 faces	100 (E3)
Bitume	armé voile de verre ép. $\pm 0,3 \text{ mm}$	30 (E3)
	armé aluminium	430 (E4)
	armé polyester APP (résines polypropyléniques)	120 (E3)
	armé polyester SBS (élastomère-caoutchouc)	750 (E4)

LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX PARE-VAPEUR

La nécessité d'un écran pare-vapeur et le type à utiliser dépendent de plusieurs facteurs, dont le climat extérieur et intérieur, les caractéristiques des matériaux composant la façade, leur comportement en présence d'humidité, etc.

On distingue quatre classes de climat intérieur en fonction de la pression de vapeur à l'intérieur des locaux (voir tableau de la p.10).

La performance d'étanchéité à la vapeur d'un écran pare-vapeur est représentée par sa valeur μd (épaisseur équivalente de diffusion) [m] où :

- μ est un coefficient sans dimension qui indique la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qu'oppose un matériau d'une épaisseur donnée, comparée à celle d'une couche d'air immobile de même épaisseur. Les valeurs μ sont étroitement liées à la nature des matériaux ;
- d est l'épaisseur du matériau exprimée en mètres.

La valeur μd qualifie la résistance qu'offre une couche de matériau à la diffusion de vapeur d'eau.

On distingue quatre classes de pare-vapeur reprises dans le tableau de la p.30, qui donne des informations relatives aux matériaux entrant dans la composition des pare-vapeur, ainsi qu'à leur épaisseur équivalente de diffusion μd .

LES SOUS-TOITURES

SOUS-TOITURES	ρ [daN/m ³]	λ_{int} [W/mK]	$\mu \cdot d$ [m]
Géotextile non tissé	910	0,22	0,02
Plaque en cellulose ou fibres-ciment (ép. 3 mm)	1.350	0,15	0,27
Panneaux de bois multipli - Multiplex (ép. $9,5 \text{ mm}$)	500	0,12	0,50
Feuille de polyéthylène microperforée	920	0,10	2,50
Feuille de bitume à lés ouverts (ép. 4 mm)	1.000	0,20	5,00

ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX

MATERIAUX DE CONSTRUCTION	ρ [daN/m ³]	λ_{int} [W/mK]	λ_{ext} [W/mK]	R_{utile} [m ² K/W]	μ (humide • sec)	$\mu \cdot d$ [m]
Brique de parement en terre cuite	1.800 • 1.900	0,71	1,40		9 • 14	
Brique pleine de terre cuite cellulaire	± 1.000	0,37	0,47		8	
Brique pleine de terre cuite cellulaire allégée	< 1.000	0,24	0,30		8	
Brique silico-calcaire	1.800 • 1.900	1,14	2,49		15 • 25	
Pierre naturelle (Petit Granit / Calcaire / Marbres)	± 2.700	2,91	3,50		∞	
Bloc de béton cellulaire autoclavés	500 • 600	0,20	0,32		6 • 10	
Bloc de béton d'argile expansée	900 • 1.000	0,38	0,50		5 • 6,5	
Bloc plein de béton lourd	> 1.800	1,30	1,70		13	
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 14 cm)	< 1.200			0,30		0,90
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 19 cm)	< 1.200			0,35		1,00
Blocs creux de béton d'argile expansée (Ep. 29 cm)	< 1.200			0,45		1,30
Blocs creux de béton lourd (Ep. 14 cm)	> 1.200			0,11		2,00
Blocs creux de béton lourd (Ep. 19 cm)	> 1.200			0,14		2,70
Blocs creux de béton lourd (Ep. 29 cm)	> 1.200			0,20		3,90
Blocs creux de béton lourd (Ep. 39 cm)	> 1.200			0,26		5,10
Mortier de ciment - Crépi de ciment	1.900	0,93	1,50		15 • 41	
Verre	2.500	1,00	1,00		∞	
Brique de verre (Ep. 8 / 10 cm)	2.500			0,15		∞
Bois feuillus durs et résineux	< 600	0,13	0,15		23 • 185	
Bois feuillus durs et résineux	> 600	0,18	0,20		37 • 370	
Panneau de fibres de bois liées au ciment	1.200	0,23			3,7 • 10	
Ardoise naturelle	< 2.700	2,10	2,10		> 600	
Ardoise ou plaque ondulée de fibres-ciment	1.400 • 1.900	0,35	0,50		37 • 150	
Ardoise de zinc-cuivre-titane (ép. 0,65 mm)	7.000		110			2
Tuile de béton	2.200			0,01		0,65
Tuile de terre cuite	1.600			0,01		0,27
Tuile métallique (ép. 0,65 mm)	7.000		110			2
Plaque en fibres de silicate	1.200	0,175			3.200	
Zinc	7.200	110	110		∞	
Feuilles de zinc-cuivre-titane (ép. 0,7 mm) à joints debout	7.000		110			40
Tôle de couverture en acier (ép. 0,63 mm)	7.800		50			50
Bitume polymère armé non tissé polyester	1.000	0,20	0,20		∞	
Bardeaux bitumés cloués	1.000		0,20		830	
Bardeaux bitumés soudés	1.000		0,20		4.150	
Membrane en PVC (ép. 1,5 mm)	1.400		0,20			30
Feutre bitumé	1.100	0,23	0,23		100 • 1.000	
Panneaux de bois multipli - Multiplex	500	0,14	0,15		40 • 100	
Plaque cellulose - fibres-ciment	1.450			0,02		0,22
Plancher brut préf. béton lourd (avec éléments creux) ép. 12 cm	1.500			0,11		2,70
Plancher brut préf. béton lourd (avec éléments creux) ép. 20 cm	1.500			0,15		3,30
Plancher brut préf. béton argile expansée (Ep. 12 à 15 cm)	1.100			0,20		0,60
Plancher brut préf. terre cuite en éléments creux (2) ép. 12 cm	1.100			0,13		2,20
Béton armé	2.400	1,70	2,20		13	
Béton lourd normal non armé	2.200	1,30	1,70		13	
Béton léger en chape	800 • 850	0,24	0,40		10	
Enduit de plâtre	1.300	0,52			6 • 10	
Plaque de plâtre enrobé (Ep. 9,5 / 12,5 mm)	1.300			0,05		0,05 • 0,11
Plâtre avec granulat léger	800 • 1.100	0,35			6 • 10	
Linoléum	1.200	0,19			1.800	
Tapis (textile)	200	0,06				2,50
Carreau de PVC	1.200	0,19			1.470	
Carreau de terre cuite	1.700	0,81	1,00		9 • 14	
Carreau de grès	1.000	1,20	1,30		150 • 300	

ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

LES MATÉRIAUX ISOLANTS

	ρ [daN/m ³]	Chaleur massique [J/kgK]	λ_{Uj} [W/mK]	λ_D [W/mK]	
				de	à
D'origine synthétique					
• les polystyrènes					
• extrudés (XPS)	25 • 55	1 450	0,045	0,029	0,039
• expansés (EPS) fabriqués en usine	15 • 30	1 450	0,050	0,030	0,043
• expansés (EPS) non fabriqués en usine	15 • 30	1 450	0,050	0,031	0,050
• les polyuréthanes (PUR) ou polyisocyanurate (PIR)					
• fabriqués en usine en panneaux revêtus	40	1 400	0,035	0,022	0,029
• non fabriqués en usine	30	1 400	0,055 (1)	0,025	0,040
• les mousses d'urée-formaldéhyde (UF)					
• fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,045	-	-
• non fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,075	0,039	0,039
• les mousses phénoliques (PF)					
• fabriquées en usine en panneaux revêtus	8 • 20	1 400	0,045 (2)	0,020	0,023
• non fabriquées en usine	8 • 20	1 400	0,065	-	-
• les polyesters	25	-	0,050	-	-
• les polyéthylènes extrudés (PET) en panneaux	??	-	0,050	-	-
D'origine minérale					
• les laines minérales (MW)					
• laine de verre fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	25 • 40	1 030	0,050	0,030	0,040
• laine de verre non fabriquée en usine	25	1 030	0,070	0,030	0,040
• laine de roche fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	40 • 90	1 030	0,050	0,030	0,040
• laine de roche non fabriquée en usine	40	1 030	0,070	0,030	0,040
• le verre cellulaire (CG) en panneaux	(100) 120 • 180	1 000	0,055	0,038	0,050
• la perlite expansée (EPB) fabriquée en usine, en panneaux	50 • 175	900	0,060	-	-
• la perlite expansée (EPB) non fabriquée en usine en granulats	50 • 175	-	0,080	-	-
• la vermiculite expansée fabriquée en usine, en panneaux	75 • 130	900	0,090	-	-
• la vermiculite expansée non fabriquée en usine en granulats	75 • 130	1 080	0,110	-	-
• les granulats d'argile expansé	??	1 000	0,150	-	-
D'origine végétale					
• les fibres de bois (FB) en panneaux	160 • 270	-	0,060	0,036	0,050
• la cellulose (CEL) fabriquée en usine, en panneaux	50 • 150	1 100	0,060	-	-
• la cellulose (CEL) en vrac (à projeter ou à insuffler)	35 • 50	1 100	0,080	0,038	0,041
• le liège (ICB) en panneaux	80 • 120	1 560	0,050	-	-
• le liège (ICB) en vrac / en granules pour bétons allégés	18	-	0,050	0,043	-
• le chanvre ou «laine» de chanvre	25 • 210	-	0,060	0,038	0,040
• le lin en panneaux agglomérés	400 • 500	-	0,060	0,038	0,040
• le lin en vrac, rouleaux, panneaux semi-rigides...	18 • 35	-	0,080	0,042	0,060
• la «laine» de coco fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	20 • 50	-	0,060	-	-
• la «laine» de coco non fabriquée en usine, en vrac	20 • 50	-	0,080	-	-
• la «laine» de coton fabriquée en usine, en panneaux ou rouleaux	20 • 30	-	0,060	0,039	-
• la «laine» de coton non fabriquée en usine, en vrac	20 • 30	-	0,080	-	-
• les roseaux (panneaux)	env. 100	-	0,060	-	-
D'origine animale					
• la laine de mouton	10 • 30	-	0,060	0,035	0,060
D'origine végétale ou animale					
• panneaux ou rouleaux d'isolant à base de fibres végétales ou animales, fabriqués en usine, autre que la cellulose (chanvre, lin, plume, paille, laine de moutons...)	50 • 150	1 100	0,060	0,038	0,040
• isolant à basse de fibres végétales ou animales non fabriqué en usine, autre que la cellulose (chanvre, lin, plume, paille, laine de moutons...)	-	1 100	0,080	0,043	0,060

ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES

μ (hum • sec)	Origine	Réaction au feu
150 • 300	-	Combustible
60	-	Combustible
60	-	Combustible
30	-	Combustible
30	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
1,5 • 3	-	Combustible
-	-	Combustible
-	-	Combustible
1,0 • 1,2	-	non combustible
1,0 • 1,2	-	non combustible
1,0 • 1,5	-	non combustible
1,0 • 1,5	-	non combustible
∞	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
5 • 7	-	non combustible
-	-	non combustible
3 • 4	défilage de chutes de bois résineux	difficilement combustible
1	journaux, chutes de papier blanc et d'imprimerie	auto-extinguible (agents ignifuges)
1 • 2		
5 • 30		difficilement combustible
20 • 22		
1 • 2	chênevotte du chanvre défilée en paillettes	difficilement combustible
1 • 2		difficilement inflammable
1 • 2		
1 • 2	le bourre entourant le péricare des noix de coco	ignifugée au sel de bore
1 • 2		
1 • 2	des fibres cadrées et ignifugées au sel de bore	pas de dégagement toxique
1 • 2		
1 • 1,5		
1 • 2	laine tondue + traitement insecticide et ignifuge	pas de dégagement toxique
-	-	-
-	-	-

LÉGENDE

- ρ [daN/m³] = densité
- λ_{U_i} [W/(m².K)] = valeurs par défaut de l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2], valeurs utilisées dans ce guide.
- λ_D [W/mK] = valeurs certifiées dans les agréments techniques
- λ_{doc} [W/mK] = valeurs non certifiées par un agrément technique mais reprises dans l'ouvrage [b]
- μ [-] = facteur de diffusion de la vapeur d'eau

Les valeurs λ utilisées dans cet ouvrage, dans le seul but d'illustrer la méthodologie proposée, sont celles qui étaient en vigueur au 1^{er} janvier 2017 (voir Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2]). Les trois Régions (wallonne, de Bruxelles-Capitale et flamande) ont développé une base de données produits (www.epdb.be) reprenant les données certaines pour les produits, à utiliser dans le cadre des calculs PEB.

Remarques :

(1) pour le matériau d'isolation PUR injecté ou projeté in situ, la résistance thermique de la couche d'isolation PUR doit être corrigée selon le point 7.3 de l'Annexe 3 de l'AGW du 15/12/16 [GW -16-2], en raison de la difficulté d'en déterminer l'épaisseur exacte.

(2) pour les panneaux d'isolation revêtus en mousse phénolique à cellules fermées, cette valeur est ramenée à 0,030 W/mK.

ANNEXE 2

L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES PLATES [IBN -13]

GÉNÉRALITÉS	136
LA LOCALISATION DU BÂTIMENT.....	137
CONSTRUCTIONS AVOISINANTES.....	138
BÂTIMENTS ET OBSTACLES RAPPROCHÉS.....	138
L'ANNEXE NATIONALE BELGE.....	138

GÉNÉRALITÉS

L'Eurocode 1 (ou NBN EN 1991-1-4) partie « Actions du vent » (avril 2005) [IBN -13] est consacrée à la détermination de l'action du vent à laquelle un bâtiment doit pouvoir résister au cours de sa durée de vie.

La sollicitation du vent caractéristique qu'il convient de considérer pour dimensionner une construction correspond à une action pouvant survenir en moyenne une fois tous les 50 ans (= période de retour).

Les différents facteurs déterminant l'action du vent sur un ouvrage sont :

- la localisation du bâtiment ;
- la hauteur de la construction ;
- la forme du bâtiment ;
- les dimensions et le type de l'élément étudié (façade, toiture...) ;
- la perméabilité à l'air des parois ;
- la zone étudiée de l'élément (coins de la toiture, centre de la toiture...).

L'action du vent doit être calculée pour chacune des directions de vent possible.

Seuls quelques facteurs seront détaillés ci-après. Les autres facteurs et détails nécessaires à la détermination de l'action du vent sont précisés dans cet Eurocode.

ANNEXE 2 : L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES PLATES

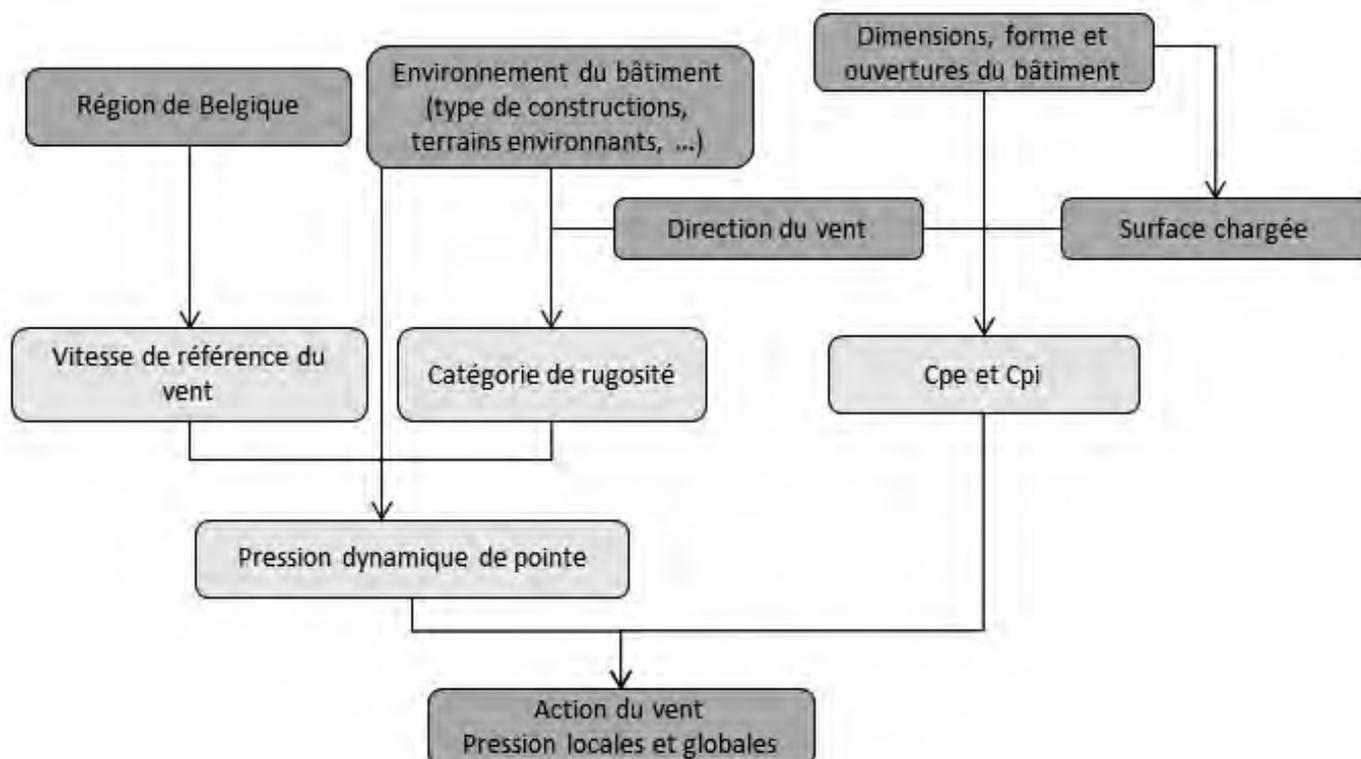


TABLEAU DES PARAMÈTRES PRÉDOMINANTS DE CALCUL DE L'ACTION DU VENT

LA LOCALISATION DU BÂTIMENT

Les conditions générales du terrain et de la région doivent être prises en compte, notamment via le coefficient de rugosité du terrain, le coefficient orographique et la vitesse de référence du vent.

Pour tenir compte de la **rugosité** du terrain, on répertorie cinq classes :

CATÉGORIE DE TERRAIN	
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer
I	Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles
II	Zone à végétation basse telle que de l'herbe, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur
III	Zone avec une couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus de 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, des forêts permanentes)
IV	Zone dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m

ANNEXE 2 : L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES PLATES

Le **coefficient de rugosité** tient compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la construction, due à :

- la hauteur au-dessus du niveau du sol ;
- la rugosité du terrain en amont de la construction dans la direction du vent considérée.

La détermination de la catégorie de rugosité d'une zone se fait en déterminant la catégorie la plus sévère dans un secteur angulaire de plus ou moins 15° autour de la direction de vent considérée sur une distance dépendant de la hauteur du bâtiment (min 300 m ; 800 m pour les bâtiments de 20 m de hauteur ; 2 km pour ceux de 40 m de hauteur...). Cette étape nécessite donc une connaissance précise de l'environnement de la construction sur des distances parfois élevées.

Il faut également tenir compte de l'**orographie** du terrain (collines, falaises, escarpements, ...) présente à proximité. L'orographie augmentant la vitesse du vent, il faut en tenir compte via le coefficient orographique.

CONSTRUCTIONS AVOISINANTES

Lorsque la construction doit se situer à proximité d'une autre construction dont la hauteur est au moins égale à deux fois la hauteur moyenne des constructions avoisinantes, elle pourrait alors être exposée (selon les caractéristiques de la construction) à des vitesses augmentées pour certaines directions de vent. Il convient de tenir compte de ce type de cas.

BÂTIMENTS ET OBSTACLES RAPPROCHÉS

L'effet de bâtiments et autres obstacles rapprochés peut être pris en compte.

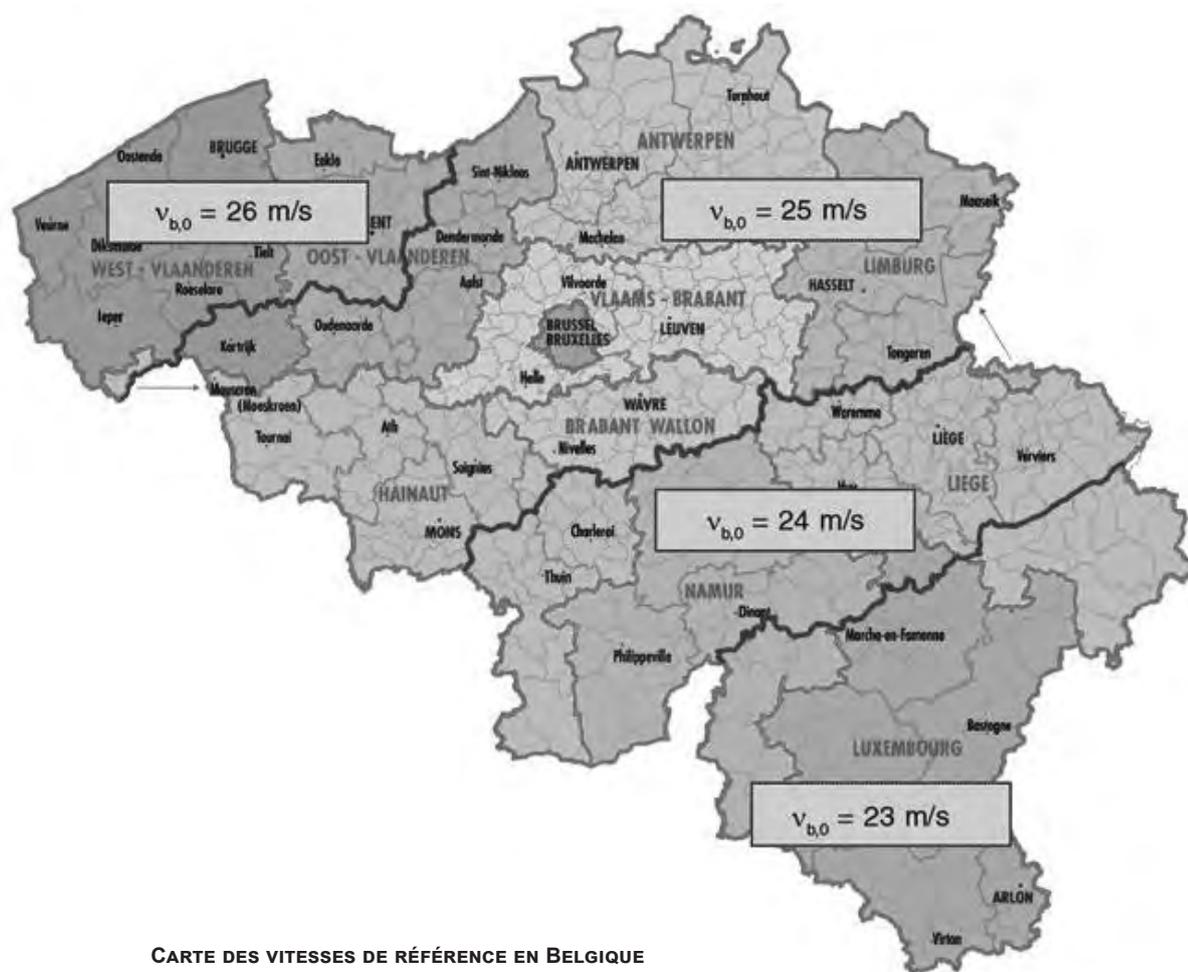
L'ANNEXE NATIONALE BELGE

L'Annexe Nationale Belge (ANB) liée à cette norme définit certains paramètres spécifiques à la Belgique tels que les vitesses de référence de vent par région, les coefficients de turbulence en fonction de la catégorie de rugosité de terrain, le coefficient intégrant l'orientation des vents principaux...

La **vitesse de référence de base du vent** se base sur des études statistiques récentes de l'IRM. Elle divise la Belgique en quatre zones au sein desquelles les vitesses de référence à considérer valent entre 23 m/s (Luxembourg) à 26 m/s (à la côte).

Attention : dans le calcul des déperditions thermiques d'un bâtiment, on ne prend pas en compte des vitesses de vent aussi élevées, mais plutôt une vitesse moyenne qui est considérée à une valeur de 4 m/s = 14,4 km/h.

ANNEXE 2 : L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES PLATES



CARTE DES VITESSES DE RÉFÉRENCE EN BELGIQUE
SOURCE : IGN BRUXELLES, 2001

ANNEXE 3

LE COMPORTEMENT AU FEU

DES TOITURES

LA RÉSISTANCE AU FEU DU COMPLEXE TOITURE	141
LES BÂTIMENTS BAS	141
LES BÂTIMENTS MOYENS	141
LES BÂTIMENTS ÉLEVÉS	141
LA RÉACTION AU FEU DES ÉLÉMENTS DE TOITURE	142
FEU PROVENANT DE L'INTÉRIEUR.....	143
FEU PROVENANT DE L'EXTÉRIEUR	143

Toutes les constructions, hormis les maisons unifamiliales, doivent répondre aux normes de base définies par l'Arrêté Royal du 12 juillet 2012 [GF -12]. Ce nouvel arrêté est d'application pour toute demande de permis de bâtir introduite après le 1^{er} décembre 2012.

CLASSIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCE AU FEU DES PRODUITS DE CONSTRUCTION, DES OUVRAGES DE CONSTRUCTION OU DE PARTIES DE CEUX-CI

L'Arrêté Royal du 13 juin 2007, art. 1, donne la définition suivante :
« La résistance au feu est l'aptitude d'un élément d'un ouvrage à conserver, pendant une durée déterminée, la capacité portante, l'étanchéité et/ou l'isolation thermique requises, spécifiées dans un essai normalisé de résistance au feu ».

L'ancienne classification belge de résistance au feu « R_f () » :*
 la résistance au feu d'un élément de construction, « R_f », représente le temps (exprimé en minutes) pendant lequel un élément de construction satisfait simultanément aux critères de stabilité, d'étanchéité aux flammes et d'isolation thermiques.

(*) Les anciennes classes R_f peuvent encore être utilisées pendant une période transitoire de 4 ans (jusqu'en juillet 2016).

La nouvelle classification européenne de résistance au feu ([GF -12] définit les 3 performances suivantes (selon la NBN EN 13501-2) :

- R : capacité portante ;
- E : étanchéité au feu ;
- I : isolation thermique.

Les classes sont exprimées comme suit :

- Pour les éléments porteurs :
 - o REI t : t étant la période durant laquelle tous les critères (capacité portante, étanchéité et isolation) sont satisfaits ;
 - o RE t : t étant la période durant laquelle les critères de capacité portante et d'étanchéité sont satisfaits ;
 - o R t : t étant la période durant laquelle le critère de capacité portante est satisfait.
- Pour les éléments non-porteurs :
 - o EI t : t étant la période durant laquelle les critères d'étanchéité et d'isolation sont satisfaits ;
 - o E t : t étant la période durant laquelle le critère d'étanchéité est satisfait.

La période « t » est exprimée en minutes. Par exemple, un poteau stable au feu durant une heure sera dénommé R60.

LA RÉSISTANCE AU FEU DU COMPLEXE TOITURE

REMARQUES

- La hauteur h d'un bâtiment est conventionnellement la distance entre le niveau fini du plancher du niveau le plus élevé et le niveau le plus bas des voies entourant le bâtiment et utilisables par les véhicules des services d'incendie ;
- E_i représente le niveau d'évacuation où une ou plusieurs sorties permettent de gagner l'extérieur. Dans les bâtiments à plusieurs niveaux d'évacuation, E_i est le plus bas de ces niveaux.

Si les façades vitrées du bâtiment dominant des constructions faisant ou non partie de ce bâtiment :

1. Soit les toitures de ces constructions satisfont aux conditions suivantes :

Distance horizontale à partir des façades, a	Exigences en matière de résistance au feu	
	Bâtiments moyens BM	Bâtiments élevés BE
$a < 1$ m	EI 60	EI 120
1 m $< a < 5$ m	E 60	E 120

Les lanterneaux, aérateurs, exutoires de fumée ou ouvertures éventuels qui n'ont pas la résistance au feu requise, placés dans le toit sur une distance de 5 mètres, satisfont aux conditions suivantes :

- Leur superficie totale n'est pas plus grande que 100 cm².
- Lorsque leur superficie totale dépasse 100 cm², ces ouvertures sont séparées des ouvertures dans les façades par un élément de construction qui satisfait aux conditions suivantes :

Distance horizontale à partir des façades, a	Exigences en matière de résistance au feu	
	Bâtiments moyens BM	Bâtiments élevés BE
$a < 1$ m	EI 60	EI 120
1 m $< a < 5$ m	E 60	E 120

2. Soit les façades du bâtiment satisfont aux conditions suivantes :

Hauteur mesurée à partir de la toiture, b	Exigences en matière de résistance au feu	
	Bâtiments moyens BM	Bâtiments élevés BE
$b < 3$ m	EI 60 (i ← O)	EI 120 (i ← O)
3 m $< b < 8$ m	E 60 (i ← O)	E 120 (i ← O)

Si des fenêtres, aérateurs, exutoires de fumées ou ouvertures qui n'ont pas la résistance au feu requise sont aménagés dans la façade sur une hauteur de 8 m, il est satisfait aux conditions suivantes :

- Leur superficie totale n'est pas plus grande que 100 cm².
- Lorsque leur superficie totale dépasse 100 cm², ces ouvertures sont séparées des ouvertures dans la toiture par un élément de construction satisfaisant aux conditions suivantes :

Distance horizontale à partir des façades, a	Exigences en matière de résistance au feu	
	Bâtiments moyens BM	Bâtiments élevés BE
$a < 1$ m	EI 60	EI 120
1 m $< a < 5$ m	E 60	E 120

Les valeurs de la résistance au feu à prévoir pour les toitures dépendent de la hauteur h du bâtiment.

LES BÂTIMENTS BAS BB (*)

(*) Les bâtiments industriels, les maisons unifamiliales et les bâtiments ayant au maximum deux niveaux et une superficie totale inférieure ou égale à 100 m² sont exclus du champ d'application de l'Annexe 2.

Les bâtiments bas ont une hauteur h inférieure à 10 m. Les normes de base (Annexe 2 de l'Arrêté [GF -12]) prévoient les dispositions suivantes :

- Au-dessus de E_i , les éléments structuraux du toit présentent R30. Cette prescription n'est pas d'application pour la toiture si elle est séparée du reste du bâtiment par un élément de construction EI30.
- En-dessous de E_i , y compris le plancher de E_i , pas d'application.

LES BÂTIMENTS MOYENS BM (*)

Les bâtiments moyens ont une hauteur h comprise entre 10 m et 25 m.

Les normes de base (Annexe 3 de l'Arrêté [GF -12]) stipulent les prescriptions suivantes :

- Au-dessus de E_i , les éléments structuraux présentent R60 (**).
- En-dessous de E_i , y compris le plancher de E_i , les éléments structuraux présentent R120.

Les bâtiments moyens ont des toitures plates ou à versants. Ces toitures présentent R60. Il peut y avoir des fenêtres dans les toitures à versants, mais à certaines conditions (voir [GF -12]).

(*) Les bâtiments industriels, les maisons unifamiliales et les bâtiments ayant au maximum deux niveaux et une superficie totale inférieure ou égale à 100 m² sont exclus du champ d'application de l'Annexe 2.

(**) Cette exigence n'est pas d'application si le plancher sous toiture présente REI 60 et si l'accès éventuel à l'espace sous toiture, qui doit être vide, se fait par des portes ou trappes présentant EI₁₃₀

LES BÂTIMENTS ÉLEVÉS BE (*)

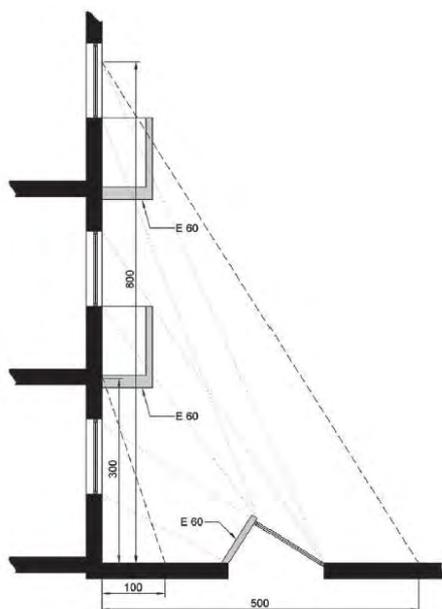
(*) Les bâtiments industriels sont exclus du champ d'application de l'Annexe 4 de l'Arrêté.

Les bâtiments élevés ont une hauteur h supérieure à 25 m. Les normes de base (Annexe 4 de l'Arrêté [GF -12]) prévoient les dispositions suivantes :

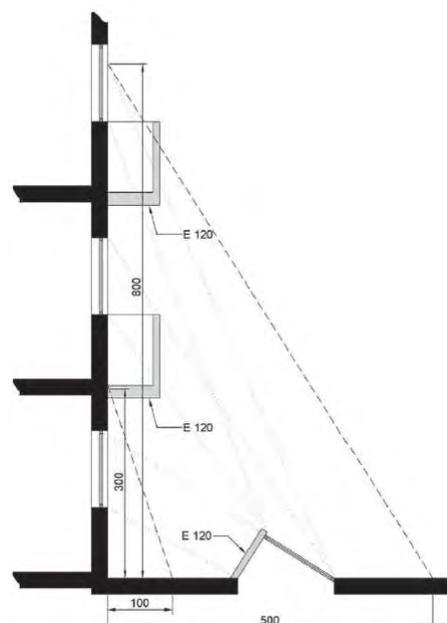
Les toitures présentent R120. De préférence, seules les toitures plates ou à faible pente (angle de pente ne dépassant pas 10°), sont admises.

Cette exigence n'est pas d'application si le plancher sous toiture présente REI120 et si l'accès à l'espace sous toiture, qui doit être vide, se fait par des portes ou trappes présentant EI160.

ANNEXE 3 : LE COMPORTEMENT AU FEU DES TOITURES



BÂTIMENTS MOYENS



BÂTIMENTS ÉLEVÉS

(VIENT DE L'AR [GF -09], PAGES 58503 ET 58525 – PLANCHES 3 .1 ET 4.1)

LA RÉACTION AU FEU DES ÉLÉMENTS DE TOITURE

L'Annexe 1 des normes de base reprises dans l'Arrêté Royal du 12 juillet 2012 [GF -12] donne la définition suivante :

“Réaction au feu d'un matériau de construction : ensemble des propriétés de ce matériau de construction considérées en relation avec la naissance et le développement d'un incendie”.

Les normes de base (Annexe 5 de l'Arrêté [GF -12]) définissent les exigences en matière de réaction au feu et de performance vis-à-vis d'un feu extérieur, pour les bâtiments bas, moyens et élevés.

Toitures du bâtiment :

Les produits pour les revêtements de toitures présentent les caractéristiques de la classe BROOF (t1) ou sont des revêtements de toiture visés au point 3bis3 de l'Annexe 1re de l'arrêté royal [49 – « *Système de classification des performances des revêtements de toitures exposées à un feu extérieur* »].

Classe	Critères de classification
B _{roof} (t1)	L'ensemble des conditions suivantes doivent être satisfaites : <ul style="list-style-type: none"> - propagation extérieure et intérieure du feu vers le haut < 0,700 m - propagation extérieure et intérieure du feu vers le bas < 0,600 m - longueur maximale brûlée extérieure et intérieure < 0,800 m - aucun matériau enflammé (gouttelettes ou débris) ne doit tomber depuis le côté exposé - aucune particule enflammée/incandescente ne doit pénétrer la structure de la toiture - aucune brèche isolée > $2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ - total de toutes les brèches < $4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ - la propagation latérale du feu n'atteint pas les bords de la zone de mesure - pas de combustion interne sans flamme - le rayon maximal de la propagation du feu sur des toitures « horizontales », externe et interne < 0,200 m

ENV 1187:2002 essai 1

ANNEXE 3 : LE COMPORTEMENT AU FEU DES TOITURES

Toitures des constructions annexes :

Si les façades vitrées d'un bâtiment dominant des constructions, incluses ou non dans ce bâtiment, des avancées de toiture, des auvents, des ouvrages en encorbellement ou d'autres adjonctions, les matériaux superficiels de la couverture des toitures de ces ouvrages présentent la réaction au feu définie ci-dessus pour les toitures du bâtiment sur une distance, à compter du pied de ces façades :

- de 8 au moins pour les bâtiments élevés ;
- de 6 m au moins pour les bâtiments moyens et bas.

FEU PROVENANT DE L'INTÉRIEUR

Dans le cas d'un feu provenant de l'intérieur, c'est avant tout la résistance au feu du support de toiture qui est déterminante.

Dans le cas d'une épaisse chape de béton, l'inflammabilité éventuelle des matériaux de toiture n'exerce que peu d'influence sur l'évolution de l'incendie, sauf au droit des percements de toiture.

En présence d'un support de toiture en bois et en métal, l'inflammabilité de l'écran pare-vapeur, de l'isolation et de leurs adhésifs joue un rôle important. Il est préconisé, dans ces cas, d'utiliser des matériaux ignifuges pour réaliser la finition du plafond.

FEU PROVENANT DE L'EXTÉRIEUR [GF -12]

La performance d'un revêtement de toiture exposé à un feu extérieur est attestée :

- 1° par les informations accompagnant le marquage CE ;
- 2° à défaut de marquage CE :
 - a) par un rapport de classement établi par un laboratoire ou un organisme de certification d'un Etat membre de l'Union européenne ou d'un autre pays (voir conditions dans l'AR [GF -12]) ;
 - b) par les informations accompagnant un agrément BENOR et/ou ATG, ou une appréciation équivalente acceptée dans un autre Etat membre de l'Union européenne ou d'un autre pays (voir conditions dans l'AR [GF -12]).

Certains revêtements de toiture peuvent être considérés comme répondant à l'ensemble des exigences pour la caractéristique de performance vis-à-vis d'un incendie extérieur sans qu'il soit besoin de procéder à des essais. Le Ministre de l'Intérieur détermine la liste de ces revêtements de toiture.

ANNEXE 4

LE SYSTÈME DE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATC [CSTC-00]

GÉNÉRALITÉS.....	144
TABLEAU REPRENANT LE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATC.....	145

GÉNÉRALITÉS

Le codage défini par l'UEATC se compose de deux lettres majuscules, complétées ou non d'une ou de plusieurs minuscules.

La première majuscule indique le mode de fixation de l'ensemble de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance, avec une couche de protection lourde ;
- T : en adhérence totale ;
- P : en semi-indépendance (adhérence partielle) ;
- M : fixation mécanique.

La deuxième majuscule renvoie à la technique de fixation de la première couche (sous-couche ou couche unique) de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance ;
- B : collage au bitume chaud ;
- S : soudage ;
- C : collage à froid ;
- V : fixation par vis ;
- N : fixation par clous.

La lettre minuscule indique la technique utilisée pour fixer la deuxième couche de l'étanchéité (généralement la couche finale) sur la sous-couche :

- s : soudage ;
- c : collage à froid.

ANNEXE 4 : LE SYSTÈME DE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATC

TABLEAU REPRENANT LE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATC

FIXATION	ETANCHEITE MONOCOUCHE		ETANCHEITE MULTICOUCHE	
L En indépendance	LL	L = couche unique : en indépendance L = mode de fixation : en indépendance	LLc	c = couche finale collée à froid
				L = sous-couche : en indépendance
				L = mode de fixation : en indépendance
			LLs	s = couche finale soudée
				L = sous-couche : en indépendance
				L = mode de fixation : en indépendance
T En adhérence totale	TC	C = couche unique collée à froid T = mode de fixation : en adhérence totale	TBs	s = couche finale soudée
				B = sous-couche collée à l'aide de bitume
				T = mode de fixation : en adhérence totale
	TS	S = couche unique soudée T = mode de fixation : en adhérence totale	TSs	s = couche finale soudée
				S = sous-couche soudée
				T = mode de fixation : en adhérence totale
			TCc	c = couche finale collée à froid
				C = sous-couche collée à froid
				T = mode de fixation : en adhérence totale
	TCs	s = couche finale soudée		
		C = sous-couche collée à froid		
		T = mode de fixation : en adhérence totale		
P En semi-indépendance	PBs	s = couche finale soudée B = sous-couche (VP 45/30) collée avec une couche bitumineuse P = mode de fixation : en semi-indépendance	PBBs	s = couche finale soudée
				B = couche intermédiaire collée à l'aide de bitume
				B = sous-couche (VP 45/30) collée à l'aide de bitume
				P = mode de fixation : en semi-indépendance
	PLs	s = couche finale soudée L = sous-couche (VP 40/15) P = mode de fixation : en semi-indépendance	PSs	s = couche finale soudée
				S = sous-couche soudée avec plots ou bandes P = mode de fixation : en semi-indépendance
	PS	S = monocouche soudée (APP/SBS) avec plots ou bandes P = mode de fixation : en semi-indépendance	PCs	s = couche finale soudée
				C = sous-couche collée à froid par bandes P = mode de fixation : en semi-indépendance
PC	C = monocouche collée à froid par bandes P = mode de fixation : en semi-indépendance	PCc	c = couche finale collée à froid	
			C = sous-couche collée à froid par bandes P = mode de fixation : en semi-indépendance	
M Fixation mécanique	MV	V = couche unique fixée par vis dans les recouvrements M = mode de fixation : fixation mécanique	MV ^(*)	s = couche finale soudée
				V = sous-couche fixée par vis
				M = mode de fixation : fixation mécanique
			MN ^(*)	s = couche finale soudée
				N = sous-couche fixée par clous
				M = mode de fixation : fixation mécanique
			MVc ^(*)	c = couche finale et recouvrements collés à froid
				V = sous-couche fixée par vis
				M = mode de fixation : fixation mécanique
			MNc ^(*)	c = couche finale et recouvrements collés à froid
				N = sous-couche fixée par clous
				M = mode de fixation : fixation mécanique
<p><small>(*) D'après la définition que donnent l'UEATc et l'UBATc d'une étanchéité monocouche, ces étanchéités fixées mécaniquement sont monocouches. Cependant, nous les considérons ici comme étant multicouches. Bien que les sous-couches soient perforées, ces systèmes offrent en effet une plus grande sécurité contre l'infiltration d'eau que les étanchéités monocouches, à condition que les recouvrements soient étanches.</small></p>				

SOMMAIRE	2
PREFACE	4
ENJEUX.....	5
INTRODUCTION.....	5
LE CONFORT ET L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (U.R.E.).....	6
LE BILAN THERMIQUE DE L'HOMME DANS SON ENVIRONNEMENT	6
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST AUGMENTER LE CONFORT	6
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST ÉCONOMISER L'ÉNERGIE	7
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST RÉDUIRE LES DÉPENSES DU MAÎTRE D'OUVRAGE	7
ISOLER THERMIQUEMENT, C'EST PROTÉGER L'ENVIRONNEMENT.....	8
LES DONNÉES CLIMATIQUES, LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE COMPORTEMENT	
AU FEU.....	9
LES DONNÉES CLIMATIQUES	9
<i>Les précipitations.....</i>	9
<i>Le vent.....</i>	9
<i>Les températures.....</i>	10
<i>Le climat intérieur.....</i>	10
LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE	10
LE COMPORTEMENT AU FEU	11
LES FONCTIONS DE L'ENVELOPPE.....	13
LES PERFORMANCES DEMANDÉES AUX PAROIS EXTÉRIEURES OPAQUES D'UN BÂTIMENT	13
FONCTIONS PRINCIPALES.....	13
LE CONTRÔLE DU CLIMAT	14
<i>Climat local et architecture.....</i>	14
<i>Notion de "peau respirante".....</i>	14
<i>La chaleur.....</i>	15
LE CONTRÔLE DE L'ENVIRONNEMENT	18
<i>Le bruit.....</i>	18
<i>Sécurité à l'effraction.....</i>	18
<i>Sécurité au feu.....</i>	19
LA FONCTION STRUCTURALE.....	19
LA FONCTION VISUELLE	19
LES TECHNOLOGIES COMMUNES AUX TOITURES PLATES ET INCLINÉES.....	20
L'ISOLATION THERMIQUE.....	21
INTRODUCTION	21
LES TYPES D'ISOLANTS THERMIQUES.....	23
CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE.....	23
<i>Coefficient de transmission thermique U d'une paroi opaque (cas habituel).....</i>	23
<i>Valeur U d'un élément de construction d'épaisseur variable.....</i>	24
<i>Correction pour les fixations mécaniques perforant la couche d'isolation.....</i>	24
<i>Éléments de construction constituées de couches homogènes et non homogènes.....</i>	25
<i>Cas de la toiture plate inversée.....</i>	25
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	25
BUT DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	25
CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	26
<i>Détermination du volume à étanchéfier.....</i>	26
<i>Construction bois.....</i>	26
<i>Passages de conduites.....</i>	26

TYPES D'ÉCRAN À L'AIR	27
VALEURS TYPES	27
<i>Taux de renouvellement d'air n_{50}</i>	27
<i>perméabilité à l'air de l'enveloppe v_{50}</i>	27
COMMENT MESURER L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR ?	28
RÉLGEMENTATION	28
LE PARE-VAPEUR.....	28
LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR.....	28
LES TYPES DE PARE-VAPEUR.....	29
LA FINITION INTERIEURE	31
LES COUPLES GALVANIQUES	31
LA TECHNOLOGIE PARTICULIERE DE LA TOITURE INCLINEE	33
ÉVOLUTION HISTORIQUE DU RÔLE DE LA TOITURE INCLINÉE	33
LES CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES TOITURES INCLINÉES.....	35
LA STRUCTURE	35
LA COUVERTURE	35
L'ISOLATION THERMIQUE ET LE PARE-VAPEUR ÉVENTUEL.....	36
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	38
LES PERFORMANCES DE LA TOITURE INCLINEE	39
CONTRÔLE DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT.....	39
LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA TOITURE INCLINEE	42
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	43
CHOIX DE LA PEAU EXTÉRIEURE.....	43
CHOIX DE LA ZONE DE COUVERTURE ET DU SYSTÈME DE TOITURE.....	43
<i>Couverture en écailles (ardoises, bois, tuiles, Zn, Cu, bardeaux bitumés cloués...)</i>	46
<i>Plaques autoportantes (fibres-ciment, acier, aluminium, zinc, PVC, P...) ventilées en sous-face</i>	48
<i>Feuilles métalliques (zinc, cuivre, acier inoxydable, Pb) ventilées en sous-face</i>	50
<i>Panneaux composites - Tôles ou plaques ondulées, membranes, etc. non ventilées en sous-face</i>	51
CHOIX DE LA ZONE ISOLANTE.....	53
CHOIX DES ZONES D'ÉQUIPEMENT ET DE FINITION INTÉRIEURE.....	53
CHOIX DÉTAILLÉ DE LA STRUCTURE	53
CHRONOLOGIE DE LA POSE.....	53
<i>Prédimensionnement de l'épaisseur d'isolation et du pare-vapeur complémentaire éventuel</i>	54
<i>Système A</i>	56
<i>Système B</i>	60
<i>Système C</i>	61
<i>Système D</i>	62
OBJECTIFS POURSUIVIS ET MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU DÉTAIL	65
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE	66
LE CHOIX DE PEaux EXTÉRIEURES DE TOITURES.....	67
CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : BÂTIMENT PRINCIPAL.....	68
LE CHOIX DE PEaux EXTÉRIEURES DE TOITURES.....	74
<i>Réflexions préliminaires dans le cas particulier de la piscine</i>	74
<i>Choix du système de toiture</i>	75
<i>Choix de l'épaisseur d'isolation</i>	76
<i>Choix de la finition intérieure</i>	76
<i>Réflexion sur le pare-vapeur complémentaire</i>	77

<i>Conclusions</i>	77
CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE : COUVERTURE DU RESTAURANT.....	78
<i>Choix du système de toiture</i>	78
<i>Choix de l'épaisseur d'isolation</i>	78
<i>Finition intérieure</i>	79
<i>Conclusion</i>	79
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET	80
IDENTIFICATION ET CONCEPTION DES NOEUDS	80
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DU PROJET.....	85
LES TYPOLOGIES DES TOITURES PLATES.....	86
HISTORIQUE.....	87
LES PERFORMANCES DES TOITURES PLATES.....	88
LA TOITURE CHAUDE.....	90
DESCRIPTION	90
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	90
LA TOITURE INVERSÉE.....	91
DESCRIPTION	91
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	91
LA TOITURE COMBINÉE OU TOITURE "DUO"	92
DESCRIPTION	92
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	92
LA TOITURE VERTE	93
GÉNÉRALITÉS.....	93
LES TYPES DE TOITURE VERTE	93
<i>La toiture-jardin</i>	93
<i>La toiture-jardin légère</i>	93
<i>La toiture végétalisée</i>	93
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	94
LES PARTICULARITÉS DE L'ÉTANCHÉITÉ DE LA TOITURE VERTE	95
LA CONCEPTION ET LA COMPOSITION DE LA TOITURE VERTE	96
<i>La protection mécanique de l'étanchéité</i>	96
<i>Le drainage et la filtration</i>	96
<i>La rétention d'eau</i>	97
<i>L'enracinement des plantes</i>	97
<i>La végétation</i>	97
<i>Détermination des performances thermiques d'une toiture verte</i>	97
LES TYPOLOGIES DE TOITURE À DÉCONSEILLER	98
LA TOITURE FROIDE	98
<i>Inconvénients</i>	98
LES AUTRES COMPOSITIONS DE TOITURE	98
<i>Isolation sous le plancher de la toiture</i>	99
<i>Béton de pente sur l'isolation</i>	99
LES TECHNOLOGIES DES TOITURES PLATES	100
LE SUPPORT DU COMPLEXE ISOLANT - ÉTANCHÉITÉ	101
LA PENTE.....	101
LES FORMES DE PENTE.....	102
L'ÉLÉMENT PORTANT	103
<i>Les dalles monolithiques ou les éléments préfabriqués rendus monolithiques</i>	103

Les éléments préfabriqués sans couche de compression	103
Les planchers en bois ou dérivés	103
Les tôles profilées métalliques	103
Les panneaux de toiture composites avec isolation thermique intégrée	104
LE PARE-VAPEUR.....	105
LES FONCTIONS DU PARE-VAPEUR.....	105
LES TYPES DE PARE-VAPEUR.....	105
LA POSE DU PARE-VAPEUR	107
L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR.....	108
L'ISOLATION THERMIQUE.....	108
LES PERFORMANCES PRINCIPALES DES MATÉRIAUX ISOLANTS.....	108
<i>Les sollicitations mécaniques externes</i>	108
<i>La compatibilité avec le support</i>	109
<i>La compatibilité avec la composition de toiture</i>	109
<i>Le comportement au feu</i>	109
<i>Le comportement en présence d'humidité</i>	109
LA POSE DE L'ISOLANT THERMIQUE.....	110
<i>Le collage au bitume chaud</i>	110
<i>La pose à la colle bitumineuse à froid</i>	110
<i>La pose à la colle synthétique à froid</i>	110
<i>La fixation mécanique</i>	111
L'ÉTANCHÉITÉ DE TOITURE.....	113
LES MEMBRANES BITUMINEUSES	113
<i>La couche supérieure</i>	113
<i>La (les) sous-couche(s) éventuelle(s)</i>	113
<i>Les méthodes de pose</i>	113
LES MEMBRANES SYNTHÉTIQUES	114
LES FEUILLES MÉTALLIQUES	114
L'ASPHALTE COULÉ.....	114
LES PROTECTIONS.....	116
LES PROTECTIONS LÉGÈRES	116
LES PROTECTIONS LOURDES.....	116
LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION DES TOITURES PLATES.....	118
LES CHOIX DE L'AUTEUR DE PROJET	118
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'ESQUISSE	120
LE PARTI ARCHITECTURAL	121
LES CHOIX DES SYSTÈMES DE TOITURE	122
ILLUSTRATION PAR UN EXEMPLE : AU STADE DE L'AVANT-PROJET	123
EXEMPLE D'ÉTUDE DE DÉTAILS.....	123
<i>Détail 1 : rive contre toiture inclinée en Zn-Cu-Ti à joints debouts</i>	123
<i>Détail 2 : jonction toiture-terrasse accessibles et baie d'accès</i>	124
<i>Détail 3 : jonction toiture - mur creux devenant mur intérieur sous la toiture</i>	124
<i>Détail 4 : rives acrotères (rive latérale libre) et récolte des eaux de pluie (chêneau)</i>	125
BIBLIOGRAPHIE.....	126
ANNEXE 1 : DONNÉES HYGROTHERMIQUES	129
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE AUX SURFACES ET RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR	129
RÉSISTANCES THERMIQUES D'ÉCHANGE	129

RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE COUCHE D'AIR.....	130
COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE U DES FENÊTRES.....	130
LES PARE-VAPEUR	132
LES SOUS-TOITURES	132
DONNÉES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.....	133
LES MATÉRIAUX ISOLANTS.....	134
ANNEXE 2 : L'ACTION DU VENT SUR LES TOITURES.....	136
GÉNÉRALITÉS.....	136
LA LOCALISATION DU BÂTIMENT	137
CONSTRUCTIONS AVOISINANTES	138
BÂTIMENTS ET OBSTACLES RAPPROCHÉS	138
L'ANNEXE NATIONALE BELGE	138
ANNEXE 3 : LE COMPORTEMENT AU FEU DES TOITURES.....	140
LA RÉSISTANCE AU FEU DU COMPLEXE TOITURE.....	141
LES BÂTIMENTS BAS	141
LES BÂTIMENTS MOYENS	141
LES BÂTIMENTS ÉLEVÉS	141
LA RÉACTION AU FEU DES ÉLÉMENTS DE TOITURE.....	142
FEU PROVENANT DE L'INTÉRIEUR.....	143
FEU PROVENANT DE L'EXTÉRIEUR	143
ANNEXE 4 : LE SYSTÈME DE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATc ..	144
GÉNÉRALITÉS.....	144
TABLEAU REPRENANT LE CODAGE DES ÉTANCHÉITÉS BITUMINEUSES PAR L'UEATc.....	145
TABLE DES MATIERES	146

L'isolation thermique des toitures

Tout en étant accessible à tous, ce Guide pratique pour architectes « L'isolation thermique des toitures » est destiné plus particulièrement aux concepteurs, et poursuit l'objectif de les aider à faire les choix les plus adaptés aux projets de bâtiments qu'ils développent, et cela dès les phases préliminaires de leur conception.

Il s'attache à la toiture, part importante des déperditions énergétiques, dont la conception doit combiner de nombreux paramètres (comportement au feu, acoustique, sécurité, esthétique, thermique, structure) qui sont répartis en catégories : contrôle du climat, contrôle de l'environnement et fonction structurale.

Il détaille les fonctions assurées par les zones qui composent la toiture et leurs matériaux spécifiques participant à son comportement hygrothermique, y compris les nœuds constructifs et le transfert de vapeur d'eau et il aborde les avantages et inconvénients des différents types de toitures plates et inclinées, les compositions qu'il est préférable d'éviter, et les recommandations utiles à rappeler au cahier spécial des charges.

Il rappelle les notions fondamentales de physique du bâtiment à l'aide de définitions, descriptions et tableaux faciles à comprendre, et par une mise en application dans un exemple concret, illustré de nombreux détails techniques.

En plus des aspects liés à la performance thermique, ce guide aborde également les questions de l'étanchéité à l'air, à l'eau, de la diffusion de vapeur d'eau..., notions tout aussi essentielles pour garantir une construction durable.

Dans leur carrière professionnelle, Jean-Marie Hauglustaine et Francy Simon fusionnent les facettes de l'architecte auteur de projet, du chercheur scientifique et du professeur de techniques de construction conduisant à une excellente performance énergétique et environnementale des bâtiments, tant nouveaux que rénovés.

Jean-Marie Hauglustaine est aujourd'hui chargé de cours au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, en Faculté des Sciences de l'Université de Liège. Son équipe de recherche EnergySuD développe des outils livresques (guides pratiques) et informatiques pour aider les concepteurs à intégrer le souci énergétique et environnemental dans le processus de conception de leurs projets. Elle est également impliquée dans l'accompagnement scientifique de la transposition, en Wallonie, des Directives PEB.

Francy Simon est professeur émérite de l'Université Catholique de Louvain, et continue à appliquer les principes qu'il a enseignés, dans ses projets d'architecture.