



RENOVATION THERMIQUE DU BATI TRADITIONNEL NORMAND

Etude réalisée en Région Basse-Normandie

**Avec la participation de
professionnels hauts et bas-normands**

septembre 2013

PRESENTATION DE L'ETUDE P 4 A 6**PARTIE 1 DIAGNOSTIC ET PROBLEMATIQUES DANS LE BATI ANCIEN P 7 A 16**

Cette partie fait état du constat réalisé par le CETE dans le cadre de visite de rénovations identifiées par les partenaires. Sont également abordés, les remèdes à apporter avant toute intervention dans le cas de désordres constatés

I- EVOLUTION DE L'USAGE DU BATI P 8

II- L'HUMIDITE, PRINCIPALE SOURCE DE DESAGREMENT P 8

III- AUTRES SOURCES DE DESORDRE ET PRECONISATIONS P 15

PARTIE 2 VISION GLOBALE DE LA RENOVATION THERMIQUE DANS LE BATI ANCIEN P 17 A 30

Dans cette partie, est mise en avant la rénovation globale, notamment au travers des enjeux de la rénovation globale en s'appuyant sur l'explication des phénomènes physiques.

I- LE DIAGNOSTIC..... P 18

II- APPROCHE THERMIQUE P 20

PARTIE 3 SPECIFICITE DES TECHNIQUES CONSTRUCTIVES P 31 A 42

Cette partie abordera les spécificités des 3 principales techniques constructives existantes en Basse-Normandie et apportera des exemples concrets au travers d'études de cas.

I- SYSTEME CONSTRUCTIF PANS DE BOIS P 32

II- SYSTEME CONSTRUCTIF PIERRE ET BRIQUE P 35

III- SYSTEME CONSTRUCTIF TERRE CRUE..... P 39

PARTIE 4 DETAILS DE S INTERVENTIONS ENVISAGEES..... P 43 A 86

Cette partie constitue le volet analytique comportement des parois au regard de la migration de la vapeur d'eau, études de cas et constat en fonction des différents type de composition des parois et des techniques d'isolation.

I- ETAT DES LIEUX..... P 44

II- ISOLATION PAR L'EXTERIEUR P 46

III- CAS D'UNE ISLOTATION REPARTIE P 59

IV- ISOLATION PAR L'INTERIEUR..... P 67

ANNEXES P 87 A 94

GLOSSAIRE P 88

EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE MATERIAUX P 93

BIBLIOGRAPHIE..... P 94

PRESENTATION DE L'ETUDE

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le secteur de l'habitat est consommateur d'énergie. Il représente 33 % des consommations pour la Basse-Normandie et 16% pour la Haute-Normandie. Il induit une importante production de GES énergétique, 27 % pour la Basse-Normandie et 10 % pour la Haute Normandie. Les bâtiments existants et en particulier les bâtiments d'habitation, constituent un potentiel important d'actions visant à améliorer l'efficacité énergétique¹.

Le nombre de logements construits avant 1949 est estimé à 275 000 en Haute Normandie et 290 000 en Basse Normandie, soit plus de 30% du parc existant (données INSEE).

La rénovation thermique des bâtiments existants représente un enjeu majeur pour permettre de limiter les besoins énergétiques et de réduire les charges des ménages occupants. C'est pourquoi ce dossier relatif à la rénovation thermique du « Bâti Traditionnel Normand » a été initié. Elle doit permettre de concilier à la fois le maintien du patrimoine architectural, très riche en Normandie, et l'amélioration thermique des bâtiments antérieurs à 1948.

Cette étude a été engagée suite au constat réalisé : les solutions techniques les plus couramment mises en œuvre pour isoler un bâtiment ne présentent pas des résultats satisfaisants lorsqu'elles sont appliquées dans le bâti ancien. On peut par exemple, observer des problèmes d'humidité à la suite de travaux d'isolation inadaptés.

Les régions de Haute et Basse Normandie présentent une grande diversité de bâtiments traditionnels, tous construits avec des matériaux locaux. Les plus rencontrés se trouvent être les bâtiments en terre crue, pans de bois, en brique et en pierre. Ces constructions sont très capillaires et l'équilibre hydrique y est important. Afin de pouvoir les étudier, trois grandes catégories ont été établies, selon les caractéristiques thermiques et hydriques des matériaux.

- Le pan de bois se caractérise par une épaisseur de l'enveloppe très faible (12 cm) ainsi qu'une inertie relativement faible.
- Les constructions en pierre et brique se caractérisent par des épaisseurs plus importantes (25 à 50 cm), une inertie importante mais une forte conductivité.
- Les constructions en terre crue se caractérisent par une épaisseur très importante (de 50 à 100 cm) et une inertie très forte.

Cela conduira dans la suite de l'étude à proposer des préconisations à l'attention des professionnels en fonction des ces trois techniques constructives aux spécificités différentes.

DEMARCHE ET METHODE UTILISEE

En 2008, un accord de partenariat visant l'amélioration de la performance énergétique du bâti traditionnel normand des logements situés en Haute et Basse-Normandie a été signé entre les partenaires suivants : la Région Basse-Normandie ; la Région Haute-Normandie ; l'Etat (Directions Régionales de l'Équipement Haute et Basse-Normandie) ; la Délégation Régionale de l'ANAH de Haute et Basse-Normandie ; l'ADEME Haute et Basse-Normandie.

L'objectif de la convention était de fixer les modalités d'intervention des partenaires dans le cadre du projet qui vise à mettre en œuvre un plan d'actions pour promouvoir l'amélioration de l'efficacité énergétique des logements anciens normands. Il s'agit de proposer des solutions techniques compatibles avec des techniques constructives traditionnelles et antérieures à la reconstruction telles que la pierre, la terre, le torchis, les briques..., afin d'améliorer leurs performances énergétiques sans mettre en cause leur pérennité, leurs qualités architecturales et le confort d'usage.

En 2008 ce projet a recueilli un écho très favorable des acteurs Normands qui ont souhaités participer à cette étude. Ainsi lors des premières réunions de travail, les experts régionaux ont apporté des informations et leurs questionnements. Une liste de logements anciens a été établie pour réaliser des visites.

En 2009, le CETE a réalisé 42 visites sur les trois typologies constructives définies. Chaque visite a donné lieu à une étude des caractéristiques constructives, des procédés et matériaux utilisés pour l'isolation et le chauffage, en fonction des habitudes et besoins des occupants. Suite à cette première

¹ Source "Bilan des gaz à effets de serre" – SRCAE 2012.

étape, le CETE, missionné par l'Etat a produit un dossier qui comportait le recueil des désordres constatés lors de visite d'habitation ancienne. En 2010 et 2011 de nombreux acteurs régionaux intéressés par le dossier ont relancé les partenaires afin qu'il puisse être mené à terme.

En 2012 la Région Basse Normandie, l'ARPE, le CAUE 76 avec l'implication de deux stagiaires en licence professionnelle : « Efficacité Energétique dans le Bâtiment » à l'IUT de Saint Lô et avec l'accord des autres partenaires ont décidé de poursuivre ce dossier.

Une démarche participative a été proposée pour atteindre l'objectif en invitant les professionnels à participer aux groupes de travail.

REMERCIEMENTS

Ainsi le dossier dont la rédaction a été confiée à Elisabeth Poite et Bruno Dilassère avec l'appui de leurs maîtres de stage Annie Motte et Vincent Doussinault a fait l'objet d'une participation active des acteurs suivants :

Solveig Bernard, stagiaire chargée de mission "communication et développement durable, Région Basse-Normandie

François Carion, Maison de Pays

Michel Demont, Architecte

Bruno Dilassere, Stagiaire à l'ARPE en licence professionnelle à St Lô

Vincent Doussinault, Maître de stage de Bruno Dilassere et permanent à l'ARPE

Olivier Gosselin, Architecte CAUE 76

Dominique Jouin, Charpentier couvreur Coopérative d'Artisans MA2B

Nicolas Knapp, Architecte CAUE de l'Orne

Véronique Leroux, Maisons Paysannes de France Calvados

Benjamin Leroux, Batiethic

Gilles Levasseur, Entrepreneur charpente ancienne

Valérie Lopes, Architecte CAUE 76 et Espace Info Energie

Mickael Lubberda, CAPEB Haute Normandie

Jean Paul Montier, artisan Charpentier, SARL Champion-Montier

Annie Motte, Région Basse-Normandie, maître de stage d'Elisabeth Poite et référent à la Région pour ce dossier

Fabrice Le Nôtre, chargé de mission à la Fédération Française du Bâtiment Basse-Normandie

Gwenaëlle Petit-Cochin, Déléguée départementale Maisons Paysannes de France Calvados

Jean Luc Pithois, Membre de l'ARPE et bureau d'étude

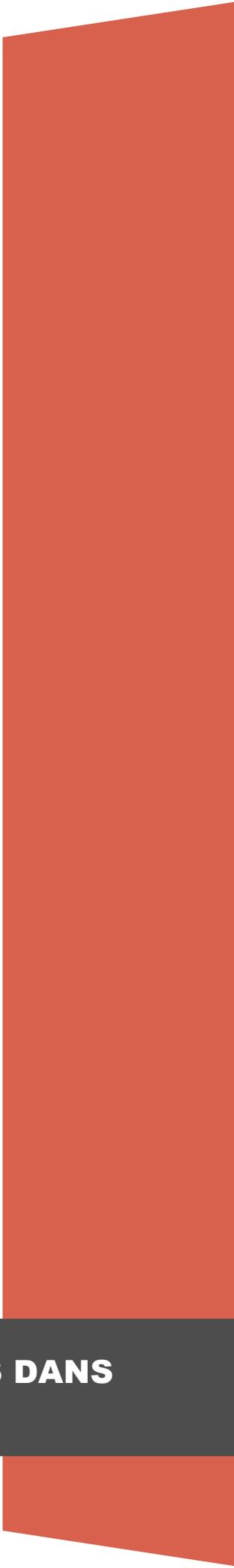
Elisabeth Poite, Stagiaire à la Région Basse Normandie en licence professionnelle à St Lô

Chantal Pontvianne, Déléguée départementale Maisons Paysannes de France Orne

Sophie Popot, Architecte Membre de l'ARPE

François Streiff, Architecte et spécialiste de la Terre au PNR du Marais du Bessin et du cotentin

Isabelle Valtier-Fouquet, Architecte CAUE 76



**PARTIE 1 > DIAGNOSTIC ET PROBLEMATIQUES DANS
LE BATI ANCIEN**

I - EVOLUTION DE L'USAGE DU BATI

Il existe actuellement une volonté forte de préservation du patrimoine bâti ancien d'avant 1948. La tendance étant plutôt à la réutilisation du bâti typique normand non destiné initialement à l'habitation, transformé pour cet usage.

Le bâti traditionnel normand ne fait pas l'objet d'une protection patrimoniale particulière. Il est cependant important d'avoir une approche qui permette d'évaluer la valeur esthétique et historique du bâti, l'état de conservation de ce bâti et les diverses évolutions du bâti depuis son origine.

Les usages dans ces bâtiments ont fortement évolués :

- bâtiment agricole transformé en habitation,
- mise en place de nouveaux systèmes de chauffage,
- température intérieure plus importante qu'à la construction du bâti,
- modification de la circulation de l'air,
- augmentation du nombre de salles d'eau et de leur utilisation,
- aménagement des combles ...

Ces modifications de l'utilisation du bâtiment peuvent influencer fortement sur sa pérennité et sur ses performances thermiques. Les souhaits des propriétaires rencontrés lors de l'étude du CETE, font valoir de nouveaux enjeux dans leurs travaux de transformation et d'amélioration relatifs :

- au coût des travaux et à la réduction de la facture énergétique,
- au confort d'usage,
- à la préservation du patrimoine et des techniques traditionnelles,
- aux qualités environnementales, à la pérennité et aux effets sur la santé des produits utilisés...

Ces différents paramètres seront considérés afin de préconiser une stratégie d'amélioration des performances énergétiques du bâti ancien.

Suite aux visites réalisées par le CETE un certain nombre de désordres ont été repérés, les plus importants sont souvent issus d'une mauvaise gestion de l'humidité. Ils sont liés d'une part à des facteurs extérieurs et d'autre part à des comportements inadaptés. Des actions correctives en découlent et sont à mettre en place avant d'envisager des travaux visant l'amélioration de la performance thermique.

II - L'HUMIDITE, PRINCIPALE SOURCE DE DESORDRES

La gestion de l'humidité dans le bâti ancien est un axe fondamental. En effet contrairement aux constructions nouvelles, où la stratégie adoptée est de se couper de tout risque d'humidité (matériaux étanches) les matériaux utilisés dans le bâti ancien sont généralement poreux et laissent migrer l'humidité.

Il est nécessaire de tenir compte de cette particularité lors de toute intervention et de maintenir les capacités du mur à réguler et évacuer l'humidité qu'il contient de manière naturelle (par évaporation principalement), tout en limitant les apports d'humidité (limiter les remontées capillaires, bon état des enduits, éviter les risques de condensation, ...).

II.1- LES SOURCES D'HUMIDITE

Les facteurs responsables de l'humidité sont variés et nombreux. Ils se décomposent en plusieurs causes : les apports dus à l'activité humaine, les apports dus aux intempéries, les remontées d'humidité par capillarité et la condensation de l'eau à l'intérieur ou sur le mur.

Cette partie aborde les désordres constatés et également les solutions qui peuvent être apportées.

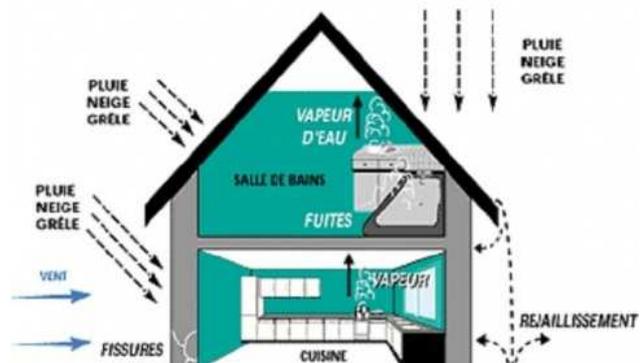
II.1.A - L'humidité dans les murs

La présence d'humidité à l'intérieur d'une paroi donnant sur l'extérieur peut provenir de causes diverses. L'excès d'humidité a des conséquences très néfastes pour les bâtiments anciens. Il existe des moyens techniques simples et efficaces pour lutter contre ces apports.

II.1.B - L'humidité due aux intempéries

Les causes de la mauvaise protection contre les intempéries peuvent être :

- une mauvaise étanchéité du parement (enduit défectueux, mauvaise étanchéité au droit des joints de menuiseries...)
- un égouttage défectueux de la toiture (gouttière qui fuit, débord de toit insuffisant, rejaillissement en pied de mur...)
- Présence d'éléments naturels (arbre, haie, ...)



II.1.C - L'humidité produite par l'activité humaine

L'homme produit de la vapeur d'eau par sa respiration et sa transpiration. Mais la part la plus importante de l'humidité ambiante est produite par les différents équipements que nous utilisons au quotidien. Les principaux lieux émetteurs sont la salle de bains et la cuisine où l'on utilise d'importantes quantités d'eau chaude ce qui libère de la vapeur d'eau.

Ci-dessous le tableau indique les pics d'humidité que l'on peut observer dans une journée. Le tableau illustre très clairement le rôle joué par les équipements utilisés et leur utilisation répartie dans le temps. Sachant cela, il est nécessaire de mettre en place un renouvellement d'air efficace et adapté à ces locaux dans le but de réduire les effets de ces pics d'humidité.

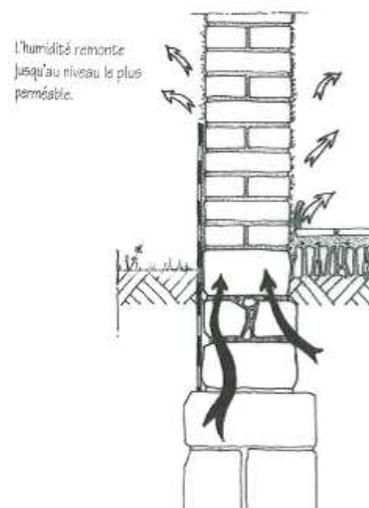
Nature des pièces	- horaires de la journée -												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24h
Cuisine						500		800			100	40	
Salle d'eau			60		700			60			400	60	
Séjour						40		40		80	100	80	
Chambre 1			80									80	
Chambre 2			40									40	
Chambre 3			40									40	

- Quantités données en grammes/heure -

II.1.D - L'humidité due aux remontées capillaires

Le phénomène des remontées capillaires est engendré par l'humidité provenant du sol qui en remontant dans les murs, les humidifie de leur base jusqu'à une hauteur variable. Les remontées capillaires peuvent également apparaître au niveau de la dalle.

Le réseau capillaire des matériaux fait que le mur se comporte comme une mèche. Les murs transformés en "éponges" absorbent l'eau souterraine ou l'humidité du sol. Ce phénomène est relativement facile à diagnostiquer, il se caractérise par des tâches d'humidité en pied de mur.



Les facteurs à l'origine des remontées capillaires sont :

- l'absence de barrière d'étanchéité au niveau des fondations,
- la porosité des systèmes constructifs traditionnels,
- la présence d'une nappe phréatique, de sols schisteux ou argileux mal drainés,
- le goudronnage et l'étanchéification des sols aggravant généralement leur survenue, car ils concentrent les remontées dans les murs. C'est un phénomène qui apparaît assez souvent après le cimentage d'une cave ou la pose d'un film polyane pour étanchéifier le sol.

→ Exemple d'une pathologie due aux remontées capillaires

Dans la maison visitée à Saint-Wandrille nous avons constaté des traces importantes d'humidité dues essentiellement à des remontées capillaires. Le phénomène a été amplifié par un trottoir situé en pied de mur. L'action prioritaire à entreprendre avant tout travaux d'amélioration est la suppression de cette pathologie par la pose d'un drain en pied de muret, qui nécessite de creuser ou casser le trottoir) en reprofilant le sol pour écarter le ruissellement de l'eau du mur.



Source CETE

II.1.E - La condensation au sein du mur

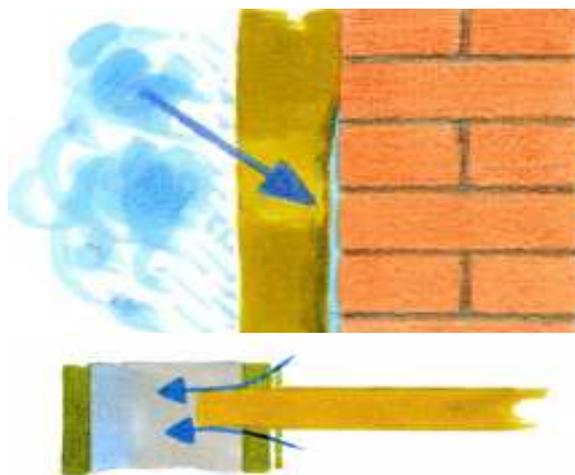
Le phénomène de condensation correspond au passage de la vapeur d'eau de l'état gazeux à l'état liquide. Cette condensation apparaît lorsque la vapeur d'eau est refroidie et atteint une température inférieure à son point de rosée. Dans les maisons, le phénomène le plus visible est la condensation superficielle au niveau des points froids, les fenêtres par exemple.

Mais il existe une condensation beaucoup moins visible, la condensation à l'intérieur du mur. Les différences de climat entre l'intérieur et l'extérieur entraînent des transferts de vapeur à travers l'enveloppe des bâtiments. En hiver, ces transferts se font globalement de l'intérieur (plus chaud et plus humide) vers l'extérieur. L'air chargé de vapeur d'eau se déplace dans les parois par diffusion au sein des matériaux. Si en un point de la paroi, la température de rosée est atteinte, l'air va se condenser et charger le mur en humidité.

Certains cas d'isolation par l'intérieur provoquent de la condensation interne lorsque le flux de vapeur d'eau rencontre la paroi froide du mur.

Ici, la vapeur d'eau se condense et devient eau liquide, derrière une laine minérale placée contre le mur en briques pleines. Cette condensation est d'autant plus dangereuse qu'elle est difficile à détecter. Lors d'une rénovation thermique, il s'agit de vérifier que la mise en œuvre de l'isolation ne causera pas de condensation interne. Ce point est abordé dans les parties 4, 5 et 6 qui traitent de l'isolation des murs.

La présence d'un pont thermique peut aussi provoquer la condensation de la vapeur d'eau au niveau des points froids. Ce problème est particulièrement grave pour les liaisons des poutres bois qui risquent de pourrir.



Source Athéba

Les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe engendrent des transferts de vapeur d'eau par convection. L'air qui transite emporte avec lui une grande quantité de vapeur. Des condensations internes sont alors possibles si, en un point de la paroi, cet air atteint la température de rosée. Les dégâts probables sont d'autant plus importants que la quantité de vapeur d'eau est concentrée en des points particuliers comme les ponts thermiques.

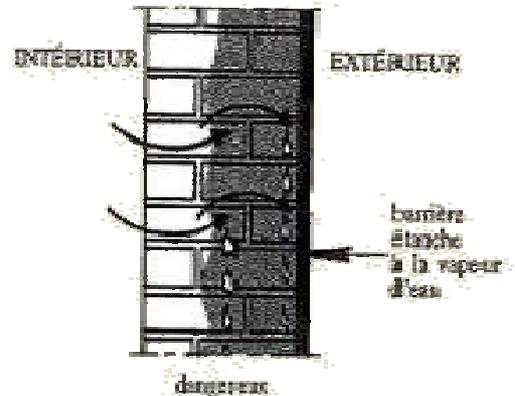
Les bâtis anciens ont la particularité d'être perméables à la vapeur d'eau. Leurs murs sont homogènes et la vapeur d'eau circule librement dans le mur. Les excès d'humidité peuvent être évacués par les parois intérieures ou extérieures.

II.1.F - L'imperméabilisation par l'extérieur ou par l'intérieur.

La conséquence de l'imperméabilisation d'un mur est la création d'une barrière vis à vis de l'humidité. La vapeur est bloquée par ces matériaux et se condense, engendrant la présence d'eau liquide à l'intérieur du mur.

Le cas le plus souvent rencontré est celui lié à la mise en œuvre d'un enduit ciment sur les façades, mais il peut aussi s'agir de revêtements plastifiés (peintures, crépis...) ou encore de vernis sur les pans de bois. Ces différents matériaux ont souvent été mis en œuvre dans le cadre de travaux de modernisation du bâti ancien. Les conséquences sont la création d'une barrière vis à vis de l'humidité qui se déplace de l'intérieur vers l'extérieur. La vapeur vient se stocker à proximité de ces matériaux et condense, engendrant la présence d'eau liquide sur la surface interne. Cette eau peut geler en période hivernale et provoquer des décollements d'enduits ou des revêtements. Une fragilisation du mur existant peut être constatée en particulier quand ils sont constitués en partie de terre (mur en terre crue, torchis, ...) jusqu'à l'écartement par le gel. Cette barrière étanche engendre des surconsommations liées au taux d'humidité :

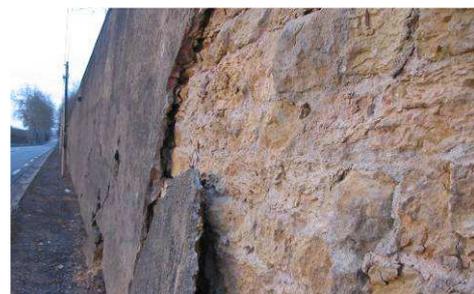
Cette surconsommation est due à la surchauffe nécessaire à l'évacuation de l'excès d'humidité. Un taux d'humidité relative élevé augmente la sensation d'inconfort et peut inciter l'utilisateur à augmenter la température de consigne.



II.1.G - Facteurs aggravants

Différents facteurs peuvent aggraver les pathologies dues à l'humidité mentionnées précédemment :

- un chauffage insuffisant dans les pièces principales ou ponctuellement interrompu,
- l'absence d'une ventilation suffisante,
- l'obstruction volontaire ou non (encrassement) des orifices d'entrée ou d'extraction d'air, l'arrêt volontaire ou non (panne) de la vmc,
- branchement d'une hotte aspirante sur une extraction modifiant la circulation de l'air,
- mise en œuvre, dans le cadre d'une rénovation, d'un revêtement d'imperméabilité de façade,
- remplacement de menuiseries extérieures sans mise en place d'un système de ventilation,
- mise en place d'un pare vapeur sur un mur encore humide empêchant ainsi toute évacuation des excès de vapeur d'eau,
- mauvaise mise en place d'un pare-vapeur empêchant ainsi toute évacuation des excès de vapeur d'eau vers l'intérieur, conséquences encore plus lourde si le mur est humide.
- modification de l'environnement, disparition de la végétation.



Décollement d'un enduit ciment

Source : www.ipb-lycee-neronde.com/unfly.com

II.2- LE ROLE DE L'EAU DANS LE DEVELOPPEMENT DES PATHOLOGIES

II.2.A - Dégradation mécanique de la structure

L'eau agit par voie chimique en participant à des réactions de dégradation des matériaux initiaux. Les risques pour la solidité de la structure sont très importants. Une destruction du mur existant est possible, en particulier quand ils sont constitués en partie de terre (mur en terre crue, torchis, joints en terre). De plus, lors des périodes hivernales, l'eau présente dans le mur peut geler et causer des fissurations et des décollements d'enduit du fait de son changement de volume.

II.2.B - Détérioration des enduits, parements

L'eau agit par voie physique en transportant les matériaux désagrégés. Les effets les plus spectaculaires sont dus aux remontées par capillarité ; elles transportent avec elles des sels qu'elles déposent sur les parements lors de l'évaporation des eaux. Les sels attaquent alors les parements. On constate la détérioration rapide des enduits en plâtre, des boiseries, des tentures et papiers peints ainsi que des peintures sur toute la hauteur des parties concernées.

II.2.C - Développement des bactéries, moisissures, champignons

L'eau agit indirectement en étant le vecteur de multiples bactéries et insectes qui participent, comme prédateurs, à la destruction des matériaux. La présence prolongée d'humidité à l'intérieur des parois et des pièces amène le développement de différents organismes qui provoquent des taches noires sur les murs et des allergies diverses chez les occupants. C'est en particulier le cas de microchampignons invisibles à l'œil nu, qui peuvent se développer sur les revêtements intérieurs dans les locaux trop humides. La mûre est un champignon qui se développe dans les lieux humides et sombres. On voit de plus en plus apparaître des cas de mûre.

Les éléments en bois, menuiseries et poutres sont soumis à un risque de pourriture important aux endroits où l'humidité est quasi stagnante.

Une trop forte hygrométrie à l'intérieur d'un logement engendre une surconsommation énergétique. Il est nécessaire de fournir plus d'énergie pour évaporer l'humidité et il faut atteindre des températures plus importantes pour obtenir la même sensation de confort.



Source CETE Normandie

→ Tableau récapitulatif

Certaines observations permettant de suspecter l'origine des problèmes. **Attention**, les phénomènes constatés peuvent découler de plusieurs causes qui parfois même se conjuguent et s'amplifient mutuellement. Le tableau ci-dessous aide à réaliser une première analyse.

Pathologies observées	Cause possibles
Condensation sur les murs	Mauvaise aération, mauvaise isolation (pas de frein vapeur, non respect d'une succession de matériaux laissant passer de plus en plus la vapeur d'eau)
Humidité relative élevée	Mauvaise aération, remontées capillaires, mauvais usage appareil domestique (gazinière, poêle à pétrole de type Zibro...)
Dégradation dans les angles	Condensation, humidité accidentelle
Sol transpirant	Condensation ou remontées capillaires
Taches sur la façade extérieure	Remontées capillaires, pluie battante, récupération eau pluviale défectueuse
Efflorescence aux étages	Pluie battante, humidité accidentelle
Efflorescence au niveau du sol	Remontées capillaire, mauvais drainage, récupération eau pluviale défectueuse

II.3- PRECONISATION POUR REMEDIER AUX DESORDRES LIES A L'HUMIDITE

Plusieurs interventions sont envisageables en fonction de l'importance du phénomène et des caractéristiques des sols. Le principe reste toujours de traiter le problème à la source. Il faut donc d'abord identifier d'où provient cette surabondance d'eau.

II.3.A - Lutter contre l'humidité due aux intempéries

Les différents cas constatés lors des visites sont les suivants :

- Une **mauvaise gestion des eaux pluviales** : le mauvais état des gouttières apporte beaucoup d'humidité en pied de mur et sur les façades. Il est nécessaire de les entretenir régulièrement.
- L'**exposition des façades** : mettre en œuvre une protection pour les façades les plus exposées : enduits, débord de toit plus important ou encore un bardage extérieur, sous réserve qu'ils ne dénaturent pas l'architecture du bâtiment.
- Des **ruissellements** : une gouttière qui dirigerait l'eau à bonne distance du pied du mur peut être suffisante. En l'absence de gouttière la construction d'un drain est fortement conseillée.

La réalisation de trottoir vise à imperméabiliser les pieds de murs. Cette solution est relativement risquée et nécessite une bonne identification de la provenance de l'eau. En effet, il faudra s'assurer au préalable que l'eau provienne bien du ruissellement et non pas du sol. Dans les cas observés, ces trottoirs avaient des conséquences néfastes en stockant l'eau en pied de mur et en provoquant des rejaillissements d'eau sur le mur.

II.3.B - Lutter contre l'humidité due aux remontées capillaires

Dans la plupart des cas, il faudra veiller à conserver une humidité minimum en raison de la nature du mur ancien. L'assèchement trop important du mur risque de fragiliser les parties en terre, les liens et notamment les joints.

La mise en œuvre d'un drain peut répondre à différents objectifs tels que l'évacuation du surplus d'eau en cas de forte pluie et/ou le drainage d'un sol humide.

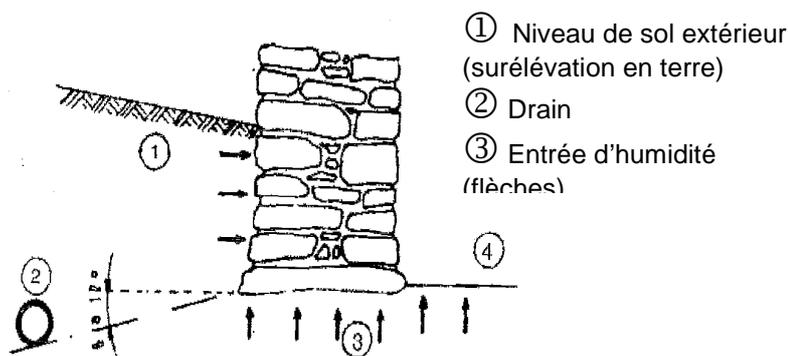


Exemple de maison à pan de bois à Perrier sur Andelle ne possédant pas de gouttière.

→ Les drains

Le drainage peut contribuer à réduire les remontées d'humidité dans le bâtiment. Toutefois, il ne peut être envisagé que s'il est possible d'évacuer d'une manière efficace les eaux collectées. Dans le cas contraire, il peut occasionner une accumulation d'eau sur les murs périphériques, ce qui serait pire que l'absence de drainage. Il est souvent souhaitable de drainer lorsque sur certains murs, le sol intérieur est en contrebas du sol extérieur (mur adossé). Une cour peut également être drainée, lorsque les eaux de pluie ne peuvent être évacuées rapidement. Toutefois, il est préférable de prévoir des modèles de terrains permettant de guider les eaux de pluie loin de la maison, chaque fois que cela est possible. Il doit être placé suffisamment près du mur à drainer, sans pour autant compromettre la solidité de celui-ci.

Ainsi, lors des visites nous avons souvent observé la nécessité de mettre en place des drains construits au pied du mur pour pallier à l'absence de



gouttières (voir schéma ci-dessous). L'absence de gouttières pouvant s'expliquer, dans le cas du bâti ancien, par des contraintes d'ordre patrimonial.

Pour être pleinement efficace, le drain doit être mis en œuvre en respectant **certaines règles** :

Un angle de 8° à 12°, maximum, doit être ménagé entre le dessous de la fondation et le "fil d'eau" du drain (c'est-à-dire la génératrice inférieure à l'intérieur du drain), afin de ne pas mettre en péril la stabilité du mur. Approximativement 8° en sol sableux et 12° en sol argileux (DTU 20-1)

Il doit également se trouver plus bas que le point le plus humide de la construction, donc généralement au pied, voire plus bas que les fondations, dans les maisons anciennes,

Il doit enfin avoir une pente suffisante vers l'exutoire, entre 3 et 10 mm/m (trop faible, elle laisse les particules fines se déposer dans le drain ; trop forte, elle favorise l'érosion du sol environnant)

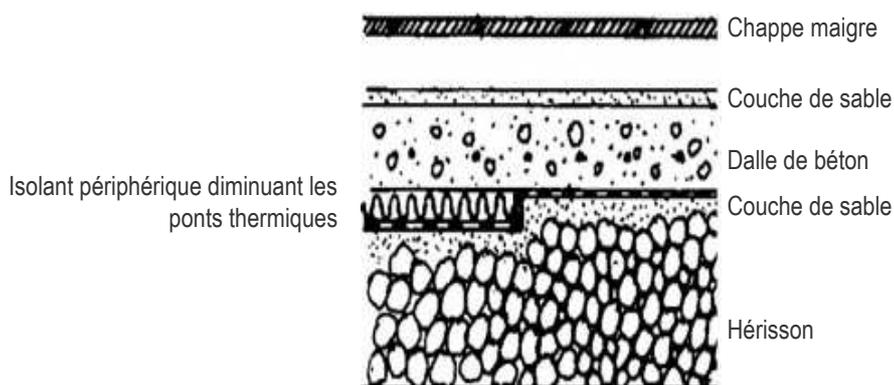
Il est souhaitable que le drain soit ventilé, afin d'assurer au maximum l'assèchement du terrain et d'éviter le développement de moisissures ou autres végétations qui participeraient à son obstruction. La ventilation est généralement assurée en point bas par la jonction au collecteur. Par contre, il faut prévoir une cheminée en point haut.

Attention, le drain ne doit pas être relié au réseau d'eau pluviale, car, par forte pluie, l'eau remonterait dans les drains, le transformant en réseau d'irrigation (une heure d'orage suffit à faire remonter l'eau, qui mettra plusieurs mois à se résorber). De même, son but est d'abaisser le taux d'humidité, et il faut éviter qu'il serve de collecteur pluvial. Prévoir un système indépendant permettant de récupérer les eaux de pluies².

→ Le hêrisson

Cette technique traditionnelle permet de réguler l'humidité du sol et des bases de la maçonnerie. Elle assure une évacuation permanente d'une grande partie de l'humidité vers l'extérieur, grâce à son drain d'air et à la structuration des pierres dont elle est composée. Elle permet d'éviter les remontées capillaires dans les murs, libère et aère les soubassements.

La solution consiste à décaisser le sol pour mettre en place un hêrisson, au dessus duquel est placé l'isolant et la dalle perspirante. Le hêrisson est constitué de cailloux propres de granulométries de plus en plus petites du bas vers le haut, il est aéré par un drain (ou des trous d'aération réguliers) relié à l'extérieur. Dans certains cas, le drain posé à l'extérieur peut être placé au niveau du hêrisson. Un hêrisson efficace varie entre 25 et 30 cm de hauteur. Un nouveau procédé existe depuis peu en remplacement des cailloux.



Le fait d'avoir un hêrisson permet de conférer une base saine à l'habitation. Le nouveau sol est ensuite conciliable avec l'installation d'un plancher chauffant (dans ce cas le hêrisson doit être ventilé) et n'exclut pas la création d'un drain en pied de mur, qui prévient la présence de zones d'humidités par remontées capillaires dans les murs.

La mise en œuvre d'un hêrisson diminuera l'inertie et les avantages thermiques d'un plancher sur terre plein. **Attention** toutefois, le hêrisson peut s'avérer inemployable notamment dans le cas où l'on risque de déchausser les pieds de murs pour le mettre en place. Il faut aussi également faire attention au niveau du hêrisson qui doit être placé à un niveau plus élevé que celui des nappes souterraines.

²Source : www.tiez-breiz.org, revue n°13 de l'association, Hervé EVEN

→ L'électro-osmose

Il existe également un procédé, qui consiste à dévier le flux capillaire par un courant de faible intensité. Il a ses adeptes mais, étant donné la nécessité de ceinturer le bâtiment par une bande de cuivre engravée dans une saignée, sa mise en pratique n'est pas toujours aisée. Ce procédé n'est pas permanent dans le temps et n'est adapté que dans le cas de maçonnerie homogène.

→ Les barrières horizontales étanches dans le mur

Dans la plupart des constructions anciennes, des barrières de protection contre les remontées capillaires étaient prévues. Cependant, dans les cas les plus difficiles (par exemple proximité de nappe phréatique, etc.), il est nécessaire de mettre en place une barrière horizontale étanche pour éviter totalement les remontées.

Ceci doit se faire en plusieurs opérations successives pour éviter des tassements. On peut utiliser les ardoises ou tout autre matériau stable et imperméable. Il est également possible d'injecter des résines à partir de forages rapprochés. C'est une solution plus facile de mise en œuvre mais pas forcément efficace, la maçonnerie devant être homogène. L'injection de résine n'est pas garantie dans le temps.

Les parties atteintes par le salpêtre doivent être totalement supprimées et remplacées par des matériaux de même nature. Le mur est ensuite hourdé à la chaux puis enduit. **Attention** à la nature du mur : certains doivent conserver une humidité minimum (par exemple la terre, le remplissage des pan de bois)

II.3.C - Lutter contre l'humidité due à la condensation

Pour les problèmes de condensation dans le mur à la suite de travaux l'ayant rendu étanche à la vapeur d'eau, il faudra, dans la plupart des cas, enlever le matériau imperméable et le remplacer par un enduit perspirant ou un matériau d'isolation capillaire.

La ventilation joue un rôle important pour éviter un surplus d'humidité dans l'air et des risques de condensation dans les pièces humides. Lors d'une isolation par l'intérieur, il faut veiller à ne pas créer de points froids, risques de condensation, ce point est traité dans la suite du présent dossier.

III - AUTRES SOURCES DE DESORDRE ET PRECONISATIONS

III.1- LES INFILTRATIONS D'AIR

Le bâti ancien s'il n'a subi aucune restauration présente la particularité d'avoir de nombreuses infiltrations d'air. Ces fuites d'air entraînent des pertes calorifiques. De plus, la vitesse de déplacement de l'air influe sur le confort en augmentant le phénomène de convection. L'inconfort créé par ces courants d'airs entraîne une augmentation de la température de chauffe.

Comme nous l'avons vu plus haut, ces défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe engendrent des transferts de vapeur d'eau par convection et des condensations internes sont alors possibles. Les dégâts probables sont d'autant plus importants que la quantité de vapeur d'eau est concentrée au niveau de ces défauts d'étanchéité.

Toutes ces infiltrations d'air augmentent, au final, fortement la consommation énergétique et risquent de créer des désordres dus à l'humidité.

Les menuiseries des fenêtres ou des portes, lorsqu'elles vieillissent deviennent de moins



Manoir Cauchois à Saint Amoult particulièrement bien restauré : il conserve un intérêt patrimonial fort. Un enduit épais chaux-chanvre a été mis en place, améliorant le confort thermique et réduisant les infiltrations d'air.

Source CETE

en moins étanches. Dans certaines maisons visitées, le problème était devenu si important, que l'on pouvait ressentir des courants d'air.

Les cheminées à foyer ouvert sont très courantes dans les bâtiments visités. Il est très important de fermer le conduit de cheminée par une trappe lorsque cette dernière n'est pas utilisée. En effet le tirage thermique qui permet le bon fonctionnement de la cheminée engendre une extraction forcée de l'air. Cette sur-ventilation provoque des pertes de calories extrêmement importantes

Avec le temps, les ossatures en bois ont une forte tendance à se déformer et à casser la liaison avec le matériau de remplissage. Ce phénomène crée de nombreuses entrées d'air parasites. Ce phénomène est particulièrement sensible lorsque les matériaux de remplissage manquent de souplesse (remplissage brique, enduit ciment, ...). Il est nécessaire de revoir le matériau de remplissage ou de mettre en place des matériaux de rebouchage acceptant les déformations pour se prémunir de la création d'entrées d'air parasites par les déformations.

III.1.A - Ventilation

La ventilation dans le bâti ancien était souvent assurée de façon naturelle par des entrées d'air parasites ou par des entrées d'air dédiées.

Dans le cas où les entrées d'air sont occultées (du fait du changement des fenêtres, de la suppression des entrées d'air parasites, de l'occultation des bouches de ventilation ...) le renouvellement de l'air intérieur n'est plus suffisamment assuré. L'humidité contenue dans l'air n'est plus évacuée et le débit de renouvellement d'air nécessaire à la qualité de l'air n'est plus suffisant. On observe alors les pathologies dues à l'humidité.

Il conviendra lors d'une rénovation de prendre en compte les besoins en renouvellement d'air et de trouver les systèmes de ventilation adaptés.

III.1.B - Phénomène de paroi froide

La sensation de paroi froide est un facteur très important lorsque l'on aborde le thème du confort et de la consommation énergétique. En effet, la température ressentie est la moyenne de la température de l'air et de la température de surface des parois

Des murs, des sols ou des fenêtres mal isolés peuvent atteindre des températures de surface très faibles et produire un rayonnement désagréable qui pousse les occupants à augmenter les températures de consigne pour améliorer le ressenti de confort. Il en résulte une surconsommation énergétique. L'orientation des murs influence sur leur température et donc sur ce phénomène de paroi froide.

Au niveau des parois vitrées, cette sensation d'inconfort peut être évitée par la mise en place de fenêtres performantes (double vitrage, faible émissivité), qui limitent les déperditions. Ce rôle est un peu rempli par les rideaux épais ou les volets en bois intérieur. Jadis, les lambris en bois, les tentures, et tapisseries posés sur les parois contribuaient à lutter contre ce phénomène de parois froides.

Si une isolation du sol est techniquement impossible ou trop onéreuse, il est possible de limiter l'effet de paroi froide en choisissant des matériaux ayant une faible effusivité (tapis, parquets de bois...). Cette technique est également envisageable sur les murs, exemple : enduit sur mur de pierre.

III.2- CORRECTION THERMIQUE

Pour les murs en pierres apparentes à l'intérieur, on peut supprimer la sensation de paroi froide en mettant un enduit isolant de type chaux/chanvre sur 5 à 8 cm. Il ne s'agit alors pas d'isolation mais de correction thermique.

→ L'utilisation des volets

Les volets ne sont pas assez utilisés comme protection thermique alors qu'ils ne nécessitent aucun investissement quand ils existent.

La nuit, l'utilisation des volets est très intéressante pour limiter la perte de calories due au rayonnement de la pièce vers l'extérieur. Si ces volets sont pleins, ils améliorent aussi l'isolation en introduisant une lame d'air entre la fenêtre et le volet.



**PARTIE 2 > VISION GLOABLE DE LA RENOVATION
THERMIQUE DANS LE BATI ANCIEN**

I - LE DIAGNOSTIC

Avant d'aborder les parties consacrées à l'isolation des murs, il est important d'avoir un regard global de la rénovation thermique du bâtiment.

Il est important de bien connaître le comportement du bâti ancien, le préalable indispensable à toute intervention sur le bâti ancien est donc la réalisation d'un bon diagnostic de l'état des lieux. Rien de pire que la précipitation lorsque l'on décide de réaliser des travaux sur un bâti ancien. Comme il possède une nature complexe et vit en liaison étroite avec son environnement de très nombreux facteurs doivent être pris en compte avant toute décision, pour ne pas réaliser des interventions risquant de lui nuire.

La rénovation thermique concerne l'enveloppe mais aussi les équipements. Certaines interventions sont dépendantes les unes des autres et sont à planifier à l'avance. Il s'agit de mettre en place une stratégie adaptée.

La condition primordiale pour la réussite des travaux de rénovation est la pérennité du bâtiment. Les travaux ne doivent pas risquer de lui nuire. Il est important d'étudier avec précision les problèmes liés aux ponts thermiques, à l'étanchéité à l'air et à la perméabilité à la vapeur d'eau, d'autant plus que ces questions sont à la jonction entre différentes parties de l'enveloppe (mur-sol-poutres...)

I.1- CHAQUE CONSTRUCTION EST UNIQUE

Toute intervention doit s'appuyer sur une connaissance approfondie des valeurs patrimoniales, architecturales et techniques du bâtiment considéré. Le bâti ancien est le fruit d'une observation séculaire de la nature. Il est tout entier dépendant du sol qui le porte, de sa structure, de son environnement et de ses occupants. Connaître l'architecture de la maison est évidemment primordial pour le choix des interventions. La nature et la forme du toit, de la couverture, de la charpente, du grenier ou des combles sont déterminantes en effet, c'est par le haut que la perte thermique est la plus forte.

L'épaisseur des murs extérieurs, la nature des matériaux, les joints déterminent les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. Les murs intérieurs ou de refend contribuent aussi à l'équilibre thermique de la maison. Les matériaux utilisés (pierre, terre, bois, végétaux) déterminent les nombreuses caractéristiques constructives et thermiques de la maison. La destination initiale du bâtiment est aussi à prendre en compte. Les usages ont beaucoup évolué au cours du temps ainsi que les modes de vie des habitants.

Ces considérations nous interdisent de généraliser les préconisations. Chaque cas est particulier et les techniques de rénovation thermiques doivent être adaptées au bâtiment considéré.

I.2- RESOUDRE LES PATHOLOGIES AVANT D'INTERVENIR

Avant de s'engager dans des travaux, il est indispensable de réaliser un état des lieux du bâtiment pour relever les désordres existants et résoudre les pathologies qui sont à traiter en priorité. Par exemple, l'excès d'eau dans les parois est une pathologie fréquente bien que le bâti ancien ait été conçu de manière à éviter naturellement les problèmes dus à l'eau et à l'humidité.

L'observation des pathologies et les solutions pour y remédier ont été abordées dans la partie précédente « Diagnostics et problématiques dans le bâti ancien ».

I.2.A - Importance de l'aspect architectural

Les maisons et immeubles anciens de caractère, font partie de notre héritage commun, les maintenir en bon état en les respectant est un devoir. Les interventions pour améliorer leur isolation doivent tenir compte de leurs caractéristiques initiales.

Dans certain cas, la rénovation des façades ou des travaux d'extension peuvent redonner du caractère à une construction en améliorant l'image du bâtiment et en corrigeant les erreurs commises

au cours du temps. Il sera parfois nécessaire d'utiliser plusieurs techniques : par exemple, l'isolation par l'intérieur pour la façade noble et par l'extérieur pour les façades moins intéressantes.

A l'intérieur, on s'attachera à préserver la qualité des décors : moulures, corniches, encadrements de baies. Dans tous les cas, le premier critère de choix est de ne pas nuire au bâti.

Dans certains périmètres de protection, il est obligatoire de consulter l'architecte des bâtiments de France pour la validation du projet (suivant les travaux de rénovation prévus, il peut être nécessaire d'effectuer une déclaration de travaux voir de déposer un permis de construire³).

I.2.B - Le bâti ancien et l'humidité

Lors de la rénovation thermique, on veillera à préserver les qualités architecturales du bâti mais il faut aussi faire très attention aux mauvaises mises en œuvre qui peuvent entraîner des dégradations sur le long terme, d'autant plus néfastes qu'elles ne sont pas visibles !

Les bâtiments anciens sont constitués de matériaux sensibles à l'humidité, il est donc important que les travaux d'isolation ne créent pas de risques de condensation au sein du mur et de stagnation de l'humidité. Pour cela, il faut veiller à éviter de créer des conditions provoquant de la condensation au sein du mur. Il faut aussi que les murs gardent leurs caractères capillaires et perméables à la vapeur d'eau pour permettre l'évacuation d'éventuels excès d'eau.

La condensation se fait lors du transfert de la vapeur d'eau dans le mur. Les facteurs entrant en cause dans la condensation sont :

- les défauts d'étanchéité à l'air
- les ponts thermiques
- les défauts de perméabilité à la vapeur d'eau.

Ces 3 points, étanchéité à l'air, perméabilité à la vapeur d'eau et ponts thermiques, ont une importance primordiale pour la préservation du bâtiment. Ils sont à traiter avec soin. Les mises en œuvre sont différentes suivant les techniques et les matériaux d'isolation utilisés.

Le traitement de ces trois points est complexe. Les détails de mise en œuvre sont très importants, leurs traitements concernent différents corps de métier. De plus, il faut traiter les jonctions entre différents éléments du bâti : murs extérieurs, refends, planchers, encadrements de baies.

L'évolution du prix des énergies conduit à intervenir pour réduire les consommations énergétiques du bâtiment en tenant compte du bio-climatisme et de la réglementation.

I.2.C - Bâti ancien et bio-climatisme

L'architecture traditionnelle se préoccupait de « bio-climatisme » avant même l'invention du mot !

En effet, l'architecture traditionnelle s'inscrit très précisément dans un site, et c'est sans doute la raison principale pour laquelle on parle d'architecture « intégrée au paysage ». Les bâtiments suivent en général les courbes et dénivelés du terrain. On tenait compte autrefois de l'orientation des vents et du soleil, en mettant à profit les éléments présents sur la parcelle : relief, végétation, présence d'eau, roche... Autant de facteurs qu'il faut garder à l'esprit lors d'une intervention sur un bâtiment ancien pour en préserver les qualités.

Une rénovation thermique peut être l'occasion de mettre en valeur ces aspects de bio climatisme ou en faire apparaître de nouveaux.

Le bon sens permet de bénéficier des avantages du bio climatisme :

- Mettre les espaces tampons au nord ou du côté du vent dominant : garages, buanderies
- Privilégier les ouvertures au sud : baies vitrées, serre, ...
- Tirer partie de la végétation en utilisant des essences à feuilles caduques pour créer de l'ombre en été. L'isolation limite le bénéfice des apports solaires, cela conduit parfois à traiter différemment les parois en fonction de leur exposition.
- Conserver ou améliorer l'inertie du bâtiment⁴

³ Plus d'informations sur <http://vosdroits.service-public.fr>

⁴ Ce sujet fait l'objet d'éditions que vous pouvez retrouver dans la partie Bibliographie du présent document.

II - APPROCHE THERMIQUE

II.1- INERTIE ET DEPHASAGE

L'inertie thermique est une caractéristique primordiale dans l'appréciation de la thermique d'un bâtiment. Elle correspond à la capacité du bâtiment, par le biais des matériaux dont il est composé, d'emmagasiner de la chaleur qui sera restituée ultérieurement, ce qui a tendance à limiter les variations de la température (amortissement) et à décaler dans le temps les pics de température (déphasage).

L'inertie est une caractéristique physique qui dépend de la nature des matériaux, de leur épaisseur, de la présence et du positionnement d'un isolant. L'inertie d'un matériau est déterminée à partir de sa masse volumique (ou densité) en kg/m³ et sa chaleur massique (ou chaleur spécifique) exprimée en J/kg.K. La chaleur spécifique décrit la quantité de chaleur qu'un matériau est capable de stocker. Le bois a par exemple une chaleur spécifique très supérieure au béton ou à l'aluminium.

La capacité thermique d'une paroi est la quantité d'énergie stockée dans le mur. Par exemple, pour 1 m² de mur, la capacité thermique (J/m²K) s'exprime par :

Masse volumique (kg/m³) x chaleur massique (J/kgK) x épaisseur du matériau (m)

Plus un matériau est dense et plus sa chaleur spécifique est importante, plus le matériau apportera de l'inertie au bâtiment. La composition de chaque élément du bâtiment intervient dans l'inertie globale. Un tableau a été réalisé pour estimer l'inertie globale de la construction

Classe d'inertie quotidienne de la construction	Combinaisons possibles		
	Parois	Plancher bas	Plancher haut
Très lourde	Pierre Brique terre cuite Terre crue	Dalles de Pierre	Bois
		Bois sur hourdis ou sur voûte en briques	
		Bois sur hourdis ou sur voûte en briques	Bois sur hourdis ou sur voûte en briques
Lourde	Pierre Brique terre cuite Terre crue	Bois	Bois
	Bois et torchis	Bois sur hourdis ou sur voûte en briques	
Moyenne	Bois et torchis	Dalles de Pierre	Bois
		Bois	

Les parois qui apportent le plus d'inertie à un bâtiment sont les dalles sur terre plein et les murs maçonnés isolés par l'extérieur. En effet l'isolant placé en extérieur permet l'hiver de conserver les calories stockées dans la paroi. Inversement une isolation par l'intérieur limite le stockage de calories dans le mur. L'inertie peut jouer un rôle dans l'amélioration du confort d'été, c'est néanmoins un paramètre qui est difficile à quantifier, si le déphasage est trop important il peut avoir un effet contre productif. En effet, pouvoir échanger de grandes quantités de chaleur a peu d'intérêt si ces échanges sont trop rapides.

Le stockage de calories permet de réguler les évolutions de température jour/nuit, mais ils peuvent également avoir un impact à l'échelle des saisons.

Avantage d'une inertie élevée : Il est incontestable qu'une inertie élevée est souhaitable pour un habitat utilisé en mode continu, tant pour le confort d'été que pour limiter la consommation énergétique.

Inconvénient d'une inertie élevée : Dans un logement utilisé de manière discontinue (week-end, vacances), les parois à forte inertie mettront plus de temps à se réchauffer, contribuant à l'inconfort en raison du phénomène de parois froides.

II.2- REGLEMENTATION THERMIQUE SUR L'EXISTANT

Les objectifs de performance sur l'existant ont été fixés dans la loi grenelle 1 article 5 « L'Etat se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020. A cette fin, l'Etat se fixe comme objectif la rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013 »

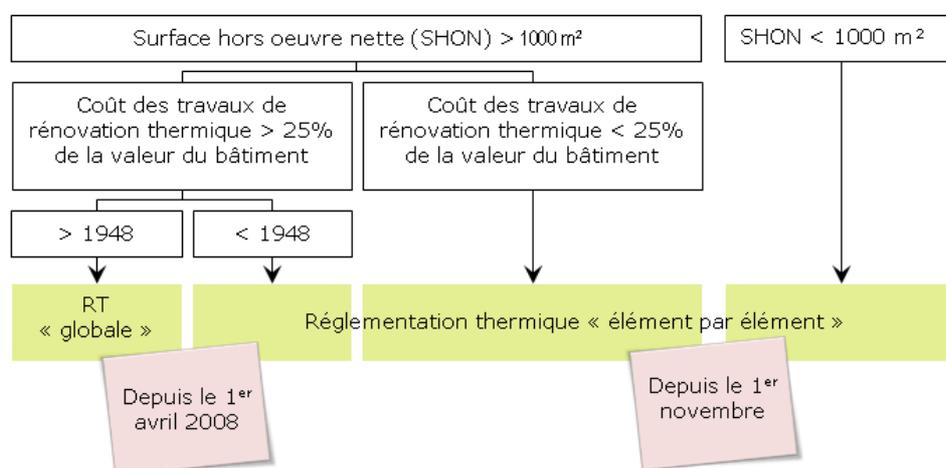
Pour atteindre ces objectifs une nouvelle réglementation thermique devrait paraître, elle devra tenir compte des spécificités du bâti ancien. En effet dans certains cas il est difficile d'atteindre les performances souhaitées en raison de configurations particulières (par exemple : nécessité de garder le caractère architecturale; petite surface habitable, limite de propriété...).

L'association Effinergie s'est donnée comme objectif de développer sur le marché de la construction neuve et rénovée, une véritable dynamique afin de générer des bâtiments confortables et performants d'un point de vue énergétique.

Cette association a établi un référentiel BBC Effinergie rénovation qui permet de fixer un objectif ambitieux pour la rénovation. Le présent dossier s'appuie donc sur ce niveau d'exigence.

Actuellement la Réglementation sur l'existant est peu exigeante, elle date de 2007. Suivant les bâtiments il s'agit d'appliquer la règle « éléments par éléments » ou bien une approche globale pour les bâtiments sup à 1000m².

Pour les rénovations de bâtiments d'avant 1948, la réglementation définit un objectif de performance « élément par élément » présenté dans les articles 2 à 44 de l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants⁵.



Les 8 points dont il faut tenir compte lors d'une rénovation thermique sont : l'isolation des parois opaques, l'isolation des parois vitrées, le chauffage, l'eau chaude sanitaire, le refroidissement, la ventilation mécanique, l'éclairage non résidentiel, les énergies renouvelables. Pour chaque élément susceptible d'être installé ou changé, la RT donne le critère de performance exigé pour le produit.

Les parois opaques concernées sont :

- murs composés des matériaux suivants : briques industrielles, blocs béton industriels ou assimilés, béton banché et bardages métalliques ;
- planchers bas composés des matériaux suivants : terre cuite ou béton.
- tous types de toitures.
-

⁵ Toutes les informations et les textes sont consultables : <http://www.rt-batiment.fr/batiments-existants>

- De fait, le bâti ancien (bâti datant d'avant 1948 au sens réglementaire), en raison d'un comportement thermique et hydrique spécifique, doit être apprécié différemment. Le Ministère de l'Ecologie et de l'Energie (MEDDDM) adopte un principe de précaution en écartant ce bâti de certains travaux qui pourraient nuire à sa pérennité.

Lorsque des travaux d'installation ou de remplacement de l'isolation thermique sont entrepris sur une paroi, ceux-ci doivent être réalisés de telle sorte que la paroi isolée doit avoir une résistance thermique totale, supérieure ou égale à la valeur minimale donnée dans le tableau suivant en fonction du type de paroi concernée.

→ Résistance thermique totale de la paroi après isolation (RT existant)

Type de paroi opaque	Mur extérieur toiture de pente >60°	Mur ou plancher bas donnant sur un local non chauffé	Plancher bas donnant sur l'extérieur ou sur un parking collectif	Comble perdu	Comble aménagé toiture de pente <60°	Toiture terrasse
Résistance thermique minimale R (m ² .K / W)	2,3*	2	3,3	4,4	4**	2,5

* : R = 2 possible, si la diminution de surface habitable est supérieure à 5 % en raison de l'épaisseur de l'isolant.

** : R = 3 possible si la diminution de surface habitable est supérieure à 5 %.

II.2.A - Le référentiel BBC rénovation Effinergie

Ce référentiel BBC Effinergie a été mis en place pour promouvoir la rénovation de bâtiments dont la consommation ne dépasse pas 80 kWhep par m² et par an. Cette valeur est modulée en fonction de la situation géographique.

Altitude géographique	Manche	Haute-Normandie, Calvados et Orne
0-400m	88 kWhep/m ² /an	104 kWhep/m ² /an
400-800m		114,4 kWhep/m ² /an

Pour atteindre cet objectif et rentabiliser les travaux en exploitant au mieux le gisement d'économies d'énergie, chaque élément du bâti doit être traité de la manière la plus performante possible et les premiers travaux engagés ne doivent pas nuire aux futures interventions. Contrairement à la réglementation thermique de l'existant, c'est la performance globale du bâtiment qui est prise en compte.

→ Effinergie BBC rénovation

Type de paroi opaque	Mur extérieur	Sol sur terre plein	Sol sur extérieur ou sur local non chauffé	Toiture	Toiture terrasse
Résistance thermique optimale R (m ² .K / W)	4 à 6	2 à 4	4 à 5,5	8 à 10	6 à 8

Valeurs conseillées permettant d'obtenir plus facilement le label BBC Effinergie rénovation. Il s'agit de la résistance totale de la paroi après isolation⁶. Une étude thermique est nécessaire ainsi qu'un test de perméabilité à l'air. La valeur mesurée des infiltrations doit être inférieure ou égale à celle prise en compte dans le calcul thermique.

⁶ Source : www.effinergie.org/

II.2.B - Le budget et le phasage des travaux

Les travaux de rénovation thermique pour atteindre le niveau le plus performant demande d'intervenir à la fois sur le bâti et sur les équipements. L'idéal est de réaliser l'ensemble des interventions en une fois le maître d'ouvrage doit alors prévoir un investissement financier important et il n'a pas toujours la possibilité de réaliser les travaux nécessaires en une seule fois. On établit alors des bouquets de travaux compatibles entre eux et étalés dans le temps. Le projet de rénovation est conçu dans sa globalité dès le départ pour évaluer chaque action et son interaction avec les autres travaux. A chaque phase, les meilleures performances sont retenues pour atteindre la performance finale escomptée.

Les interventions de rénovation doivent respecter un ordre précis :

- La **première étape** consiste à réduire les besoins en chauffage par une amélioration de l'enveloppe : isolation des toitures, murs, planchers, remplacement des ouvrants, étanchéité à l'air associée à la mise en place d'une ventilation efficace.
- La **deuxième étape** vise la mise en place d'équipements performants de puissance adaptée aux nouveaux besoins de chauffage.

Certaines actions d'isolation sont dépendantes et il est important d'en tenir compte dès le phasage des travaux. Par exemple, le remplacement de menuiseries doit s'accompagner d'une réflexion sur l'aération pour prévoir une ventilation adaptée. Lors d'une réfection de toiture, on peut envisager l'installation d'équipements solaires. La mise en place d'une isolation par l'extérieur nécessite de vérifier la performance des fenêtres, il est judicieux de profiter de ces travaux pour les changer si besoin. Il sera difficile de les modifier après l'isolation extérieure des murs. Enfin, la rénovation des planchers peut, quant à elle, s'accompagner de la mise en place d'un plancher chauffant.

La rénovation par étape pose de manière accrue la question du traitement des ponts thermiques et de l'étanchéité à l'air. En effet, ces aspects concernent tous les points de l'enveloppe qui ne sont pas traités tous en même temps. Il est donc important de bien anticiper leur liaison, notamment lors de la pose d'un frein vapeur. La toiture est un poste indépendant qui peut être cité à titre d'exemple.

Attention, ces postes, qui sont les plus déperditifs, peuvent être traités en premier si ceux-ci n'entravent pas les interventions suivantes.

II.3- ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR OU PAR L'EXTERIEUR

Lors d'une rénovation thermique, une des questions primordiales est de savoir quel type d'isolation sera choisie (intérieure extérieure ou répartie). Ce choix dépend de nombreux critères : nature du bâti initial, qualité architecturale, travaux en site occupé ou non, coût des travaux...

Le premier critère de choix sera bien sûr de ne pas nuire au bâti existant, on recherchera ensuite la meilleure efficacité énergétique.

Nous voyons dans le tableau suivant que, du point de vue thermique, l'isolation par l'extérieur présente de nombreux intérêts. Si les façades n'ont pas de forte qualité architecturale, il faut privilégier l'isolation par l'extérieur. Les éléments présentés ci-dessous constituent quelques uns des avantages offerts par l'isolation par l'extérieur.

	Isolation intérieure	Isolation extérieure	Isolation répartie
Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Façade extérieure préservée• Techniques maîtrisées• coût modéré	<ul style="list-style-type: none">• Inertie conservée*• Ponts thermiques diminués• Risques de condensation maîtrisés• Ne modifie pas la surface habitable• Travaux possibles en site occupé• Protection des murs ;	<ul style="list-style-type: none">• Risques de condensation maîtrisés• Ponts thermiques limités

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Inertie supprimée* • Risque d'accentuer les ponts thermiques • Risques de condensation • Réduit la surface habitable • Travaux difficiles en site occupé 	<ul style="list-style-type: none"> • Façade extérieure modifiée • Coût de mise en œuvre • Contraintes techniques (gestion des débords de toit et ouvertures, continuité de l'isolation) • Contraintes d'urbanisme : nécessite une autorisation de travaux, empiètement possible sur le domaine public 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût • Techniques envisageable seulement pour un nombre limité de projets (remplacement torchis par exemple)
---------------	--	---	---

*L'impact de l'inertie sur le confort dépend de l'utilisation qui sera faite du bâtiment.

Le placement de l'isolant du côté extérieur réduit très fortement les variations de température au sein de la maçonnerie. En effet, les températures du mur restent très proches de celles de l'intérieur. La maçonnerie est protégée des intempéries et des risques de gel, les risques de fissuration d'origine thermique de la maçonnerie sont donc supprimés. Par contre, l'enduit extérieur est soumis à d'importants écarts de température. Cet enduit doit donc être muni d'une armature pour réduire le risque de fissuration.

L'isolation extérieure permet de bénéficier de la capacité thermique de la paroi : l'inertie naturelle du mur est conservée et les risques de surchauffe en été sont limités. Les ponts thermiques de la dalle intermédiaire et des murs de refends sont supprimés. Il n'y a pas de pertes de surface intérieure ; les travaux peuvent se faire en « site occupé ».

Dans le cas de l'isolation par l'extérieur, il ne subsiste plus de condensation superficielle sur la face intérieure du mur compte tenu de la diminution des ponts thermique. Les risques de condensation interne à la paroi sont également supprimés pour autant que la migration de vapeur d'eau puisse se faire normalement de l'intérieur vers l'extérieur.

Lors de l'isolation par l'extérieur, on sera confronté au problème de gestion des ouvertures et des débords de toit. La continuité de l'isolation au niveau des retours de baies, de balcons, d'éléments architecturaux doit être **parfaitement** assurée.

Attention, il est essentiel lors de la mise en œuvre de l'isolation d'étudier la perméance de la paroi en fonction des caractéristiques des matériaux existants et de ceux mis en œuvre car il faut veiller à ce que la perméance des composants de la paroi soit croissante de l'intérieur vers l'extérieur.

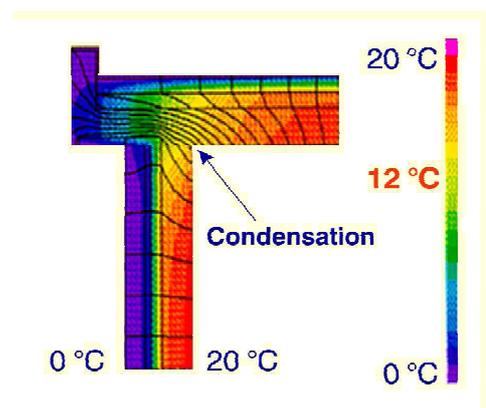
II.3.A - Les ponts thermiques

Les ponts thermiques se situent à la rencontre entre deux parois ou au niveau d'un percement ou d'une irrégularité de la paroi. Ils sont le siège de transferts thermiques spécifiques et occasionnent des déperditions thermiques plus importantes. Au-delà des déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent engendrer des risques de condensation en raison des points froids qu'ils représentent. Cette condensation peut créer des désordres irréversibles en particulier lors des liaisons des planchers bois.

L'influence relative d'un pont thermique est d'autant plus importante que la performance thermique des parois avoisinantes est élevée.

Les ponts thermiques peuvent être de plusieurs formes :

- **Linéaires** : lorsque la perte thermique se fait le long d'une jonction de deux éléments du bâtiment. Par exemple, c'est le cas d'un pied de mur non isolé alors que le reste du mur l'est.
- **Ponctuels** : lorsqu'un mur isolé est perforé par un élément avec une conductivité thermique élevée ou dans des angles de bâtiments. Par exemple, c'est le cas à la jonction entre deux murs et le sol, ou au niveau d'un ancrage qui traverse une paroi.
- Les ponts thermiques **induits par les techniques d'isolation** : Si l'isolation par l'extérieur permet de limiter les ponts thermiques, le fait d'isoler par l'intérieur peut, au contraire, en créer ou les renforcer. Les endroits sensibles tels que les jonctions entre les murs extérieurs et les murs de



Source IBGE Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement.

refend ou les planchers, ainsi que les encadrements de baies, doivent faire l'objet d'une attention particulière du point de vue des flux de chaleur, d'humidité et d'air.

Les ponts thermiques jouent un rôle primordial dans le résultat obtenu après les travaux d'isolation. Leur influence n'est pas assez prise en compte lors de la conception. On regarde souvent la valeur R de la résistance de l'isolant mis en place sans tenir compte des ponts thermiques qui réduisent considérablement l'efficacité de l'isolation et qui peuvent aussi créer des problèmes de condensation. Ainsi, les ponts thermiques intégrés sont liés à la mise en œuvre de l'isolant et de la structure de la paroi (poteaux, pannes...).

➔ Influence des « ponts thermiques intégrés » selon la mise en œuvre de l'isolation.

On constate que dans le cas le plus défavorable, la présence de ponts thermiques double la valeur du coefficient Up de transmission thermique de la paroi.

Description	ΔU_p W/m ² .K	Up W/m ² .K	% de déperdition affecté aux ponts thermiques
Profilé métallique verticale en U interruption de l'unique isolant	0,216	0,44	49%
Profilé métallique verticale en U interruption d'une couche sur 2	0,071	0,30	24%
Ossature bois verticale interruption de l'unique isolant	0,0501	0,28	18%
Ossature bois verticale interruption d'une couche sur 2	0,0334	0,26	13%
Isolation calée/chevillée	0,024	0,25	10%
Isolation appliquée sur une paroi	0	0,23	0%

* Calcul mené selon les règles Th-U avec une isolation rapportée de 16 cm d'épaisseur $R=4,2\text{m}^2\text{K/W}$. Valable en ITE et ITI Source : Effinergie

En rénovation, il arrive qu'il soit nécessaire de travailler certaines parties du bâtiment par l'extérieur et d'autres par l'intérieur, les points de liaison entre ces différentes parties sont à traiter avec soin.

Le traitement des ponts thermiques est d'autant plus difficile à traiter qu'ils sont à la frontière entre différents travaux qui ne seront pas forcément réalisés en même temps (par exemple, l'isolation des murs et l'isolation de plancher bas). De plus, ils font intervenir des corps de métiers différents (isolation des murs et pose de fenêtres). Des détails d'exécution doivent être réalisés pour assurer la collaboration des entreprises concernées.

D'une manière générale, pour limiter les ponts thermiques, il faut :

- Préférer les montants d'ossatures en bois,
- Eviter les ossatures traversantes, en les croisant ou en plaçant une couche continue d'isolant devant la structure,
- Utiliser des fixations peu conductrices.

II.4- ETANCHEITE A L'AIR

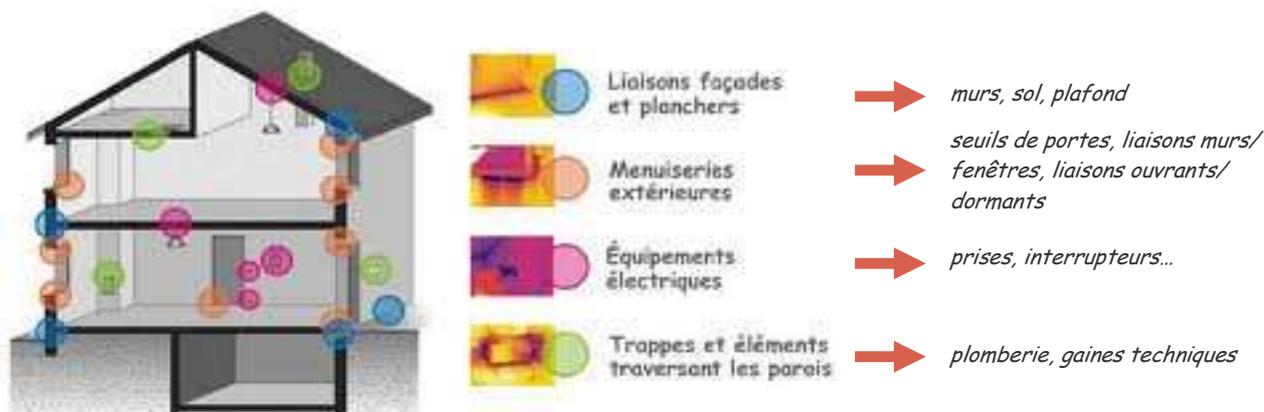
Les parois d'un bâtiment étant soumises à des différences de température et de pression, l'air cherche tous les points faibles pour traverser ces parois. L'air est un fluide comme l'eau, il passe par le moindre défaut d'étanchéité.

Le problème des infiltrations d'air est fondamental du point de vue de la performance énergétique des bâtiments et des risques de désordres. En effet, ces infiltrations d'air augmentent fortement la consommation et risquent de créer des désordres dus à l'humidité.

Les infiltrations entraînent des pertes de calories en hiver et une surchauffe en été. La vitesse de déplacement de l'air influe sur le confort en augmentant le phénomène de convection. Ces défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe engendrent aussi des transferts de vapeur d'eau par convection et

risquent de provoquer des condensations internes. Les dégâts sont d'autant plus importants que la quantité de vapeur d'eau est concentrée au niveau de ces défauts d'étanchéité.

Dans le cas d'un bâtiment sur lequel une rénovation va être effectuée, il est important de réaliser un diagnostic initial ne portant pas uniquement sur le bilan énergétique mais aussi sur le niveau d'étanchéité à l'air de l'enveloppe existante. Ceci aidera à élaborer la stratégie de rénovation. La localisation des fuites d'air peut être diverse mais il existe un certain nombre de points faibles (voir schéma ci-dessous).



Source CETE de l'Est.

L'étanchéité à l'air est assurée par les enduits dans les bâtiments anciens. Lors de la rénovation thermique, on réalisera souvent cette étanchéité :

- par une membrane pare-vapeur ou frein vapeur parfaitement continue dans le cas d'une isolation par l'intérieur,
- par les enduits extérieurs,
- par des panneaux de construction qui servent de pare vapeur (panneau bois OSB), une bande autocollante est nécessaire pour étanchéifier les joints entre panneaux.

La qualité de l'étanchéité à l'air d'une construction dépend en grande partie de la mise en œuvre des matériaux. Le suivi du chantier, la surveillance du chantier et le dialogue entre les différents corps de métier seront donc primordiaux.

Il faut surtout insister sur le fait que l'étanchéité à l'air est un paramètre énergétique qui ne peut être atteint que si tous les intervenants sont bien conscients de l'intérêt de celle-ci. En fait, on remarque que lorsque tous les intervenants ont envisagé la question de l'étanchéité à l'air dès la phase de programmation l'objectif est atteint plus facilement.

Par exemple un contrôle strict de la mise en œuvre du pare vapeur est indispensable. Un test d'étanchéité à l'air peut être effectué avant la pose des parements afin de pouvoir corriger les erreurs à moindre frais.

Les exigences en termes d'étanchéité à l'air n'excluent pas d'avoir une paroi perspirante, perméable à la vapeur d'eau. Bien que la paroi soit étanche à l'air, une migration de vapeur d'eau (par diffusion) a lieu entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, en fonction des caractéristiques des matériaux et des conditions de climat intérieur et extérieur.

Une enveloppe étanche à l'air et perspirante pourrait être comparée à une veste de sport : une couche isolante, une couche étanche à l'air pour se protéger du vent, et une matière permettant l'évacuation de la transpiration.

Pour autant, un système de ventilation reste indispensable même dans un bâtiment perspirant pour évacuer le CO₂, les polluants divers et la vapeur d'eau en excès.

II.5- LA VENTILATION

Nous avons vu qu'il était nécessaire d'assurer une ventilation suffisante pour la santé des occupants, la performance énergétique et la durabilité du bâti. Le renouvellement d'air permet d'évacuer les différents polluants intérieurs, le CO₂ et les excès de vapeur d'eau.

Le renouvellement de l'air intérieur peut générer des surconsommations. Une réhabilitation énergétique performante veillera d'une part à limiter au maximum les fuites parasites (étanchéité à l'air) et d'autre part, à adapter au mieux le renouvellement aux besoins. Les solutions techniques permettant un préchauffage de l'air entrant seront privilégiées.

Le bon fonctionnement d'un système de ventilation ne sera assuré que si les principales entrées d'air parasites ont été traitées (fuites au niveau des huisseries, cheminée ouverte...)

La réglementation en vigueur impose, dans le cas général, et en logement individuel, un renouvellement d'air variant entre 0,3 et 0,5 volume/heure. Il est possible de limiter ces débits lorsqu'il existe un assujettissement du système de ventilation aux besoins. Le renouvellement d'air peut être assuré de différentes manières.

II.5.A - La conservation d'une ventilation naturelle

Souvent difficile à maîtriser une ventilation naturelle permet un renouvellement d'air sans consommation d'énergie d'origine électrique. Le renouvellement est généralement assuré par des entrées et sorties d'air sur les façades opposées. La ventilation naturelle est fortement dépendante des conditions extérieures (vent, différence de température intérieur/extérieur...). Des systèmes d'entrée d'air couplés sur puits canadien en tirage naturel peuvent également fonctionner.

II.5.B - La mise en place d'une ventilation mécanique

→ Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux (VMC hygro-réglable) ou double flux

Si la Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) double flux est préférable d'un point de vue énergétique (récupération des calories de l'air extrait), sa mise en œuvre est souvent compliquée dans le bâti ancien du fait du réseau de gaines nécessaire (insufflation d'air dans les pièces de vie et extraction dans les pièces humides). Ce système sera souvent réservé aux rénovations lourdes.

La VMC simple flux permet un bon renouvellement d'air (extraction dans les pièces humides, entrées d'air dans les pièces de vie) mais est fortement consommatrice en énergie électrique (fonctionnement en continu et pas de récupération de calories), la VMC hygro B est un compromis intéressant. Les entrées et extraction d'air modules leur ouverture en fonction du taux d'humidité de la pièce. Le débit est donc adapté aux besoins

→ Ventilation Mécanique Répartie (VMR)

En rénovation, cette technique peut s'avérer intéressante car elle ne nécessite pas l'installation de gaines souvent compliquées à installer dans le bâti ancien. La VMR est constituée d'aérateurs individuels installés dans les pièces humides, les entrées d'air se font comme pour la VMC au niveau des fenêtres des pièces de vie.

Les ventilateurs peuvent être permanents ou bien intermittents (temporisés à certaines heures : couplage avec éclairage...).

II.5.C - Stratégies à adopter pour la ventilation dans le bâti ancien

Afin de limiter les consommations liées au renouvellement d'air plusieurs stratégies peuvent être adoptées néanmoins, le bâti ancien présente peu de caractéristiques particulières qui nécessitent un traitement spécifique :

- **Tempérer l'air entrant** : soit par des prises d'air situées dans des espaces tampons, soit en préchauffant l'air à l'aide d'un puits Canadien, soit par des systèmes de ventilation double flux lorsque cela est possible.
- **Séparer les espaces** habités des principales zones générant des polluants : la ventilation de ces volumes sera gérée indépendamment de celle du reste de la maison.
- **Adapter le débit aux besoins** : suivant l'occupation de la maison la régulation des débits (VMC hygro-réglable) peut permettre de réduire les consommations liées au renouvellement d'air.
- **Isoler la toiture** : point particulièrement important à traiter puisque c'est la paroi la plus déperditive.

II.6- ISOLATION DE LA TOITURE

L'isolation des toitures est un point particulièrement important à traiter puisque c'est la paroi la plus déperditive. Néanmoins le bâti ancien présente peu de caractéristiques particulières nécessitant un traitement spécifique.

II.6.A - Cas des combles perdus

Il s'agit de la technique la plus facile de mise en œuvre et la plus efficace, elle est également sans risque pour la charpente. L'isolation peut se faire soit par des isolants en vrac déversés ou bien insufflés, soit par des panneaux ou rouleaux.

On veillera à disposer sur le plancher ou les solives un frein vapeur afin d'éviter tout risque de condensation à l'intérieur de l'isolant. Cette précaution est d'autant plus importante si les combles sont rendus praticables par la pose de panneaux de bois au dessus de l'isolant.

Une isolation en vrac sera plus efficace qu'une isolation en panneau ou en rouleau car elle évite les ponts thermiques et permet de remplir des espaces difficilement accessibles. Il faut néanmoins veiller à ce que la densité du matériau soit suffisamment importante pour éviter les risques de tassement.

L'ordre de grandeur de l'épaisseur à mettre en œuvre est de 32 cm, pour un objectif de R de 8 m²K/W et un isolant dont le $\lambda=0,04$ W/mK.

II.6.B - Cas des combles aménagés

→ Isolation par l'intérieur

Cette technique est la plus répandue malgré sa difficulté de mise en œuvre. En effet, il faut toujours veiller à conserver une lame d'air ventilée entre l'isolant et la toiture.

Les épaisseurs nécessaires pour une bonne isolation (cf ci-dessus) sont rarement compatibles avec l'isolation sous rampant. L'isolation entre chevron (généralement 10 à 12 cm) n'est pas suffisante, il faut donc venir isoler en sur épaisseur grâce à un contre-chevonnage.

L'enfermement de la charpente à l'intérieur de l'isolant sans possibilité de visualiser son état de conservation peut être risqué. Il faudra donc veiller avant tous travaux à vérifier au préalable la qualité sanitaire des bois de charpente (moisissures, insectes xylophages). De même il faudra s'assurer que la mise en place de l'isolant prévient tout risque de condensation, pour cela il faudra s'assurer de la continuité du frein-vapeur côté intérieur.

→ Isolation par l'extérieur de la couverture

Cette technique sera à privilégier notamment pour les cas où une réfection de la couverture est nécessaire, dans la limite des contraintes architecturales du bâtiment. En effet, cette technique d'isolation est la plus performante lorsque les combles sont aménagés. Les coûts de mise en œuvre restent néanmoins élevés et l'aspect extérieur du bâti peut être modifié.

L'isolation par l'extérieur de la toiture permet une isolation sans ponts thermiques, évite tout risque de condensation au niveau de la charpente, permet de conserver les volumes habitables.

L'écran de sous toiture : il est conseillé de disposer entre les chevrons et la couverture un écran de sous toiture, ce film permettra de protéger l'isolant et les bois de charpente contre les infiltrations d'eau ou de neige accidentelles, il permet également de limiter les entrées de poussières, de réduire les phénomènes de pression/dépression sur la toiture.

Cet écran peut également contribuer à l'étanchéité à l'air de la toiture. Dans ce cas il faudra choisir un écran de type HPV (Haute perméabilité à la Vapeur d'eau), cette membrane laisse migrer la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur, il est alors possible de poser l'isolant à son contact. Il faudra toujours laisser entre la couverture et l'écran de sous toiture une lame d'air ventilée d'au moins 2 cm.

II.7- LA PERFORMANCE DES OUVRANTS

Les ouvrants des bâtis anciens sont généralement source d'inconfort phonique et thermique. Elles sont un marqueur fort de l'identité architecturale d'un bâti. Le choix du matériau revêt alors un caractère d'importance au niveau architectural et patrimonial.

Les déperditions sont dues à la transmission thermique au niveau du vitrage mais aussi aux infiltrations d'air entre le dormant et l'ouvrant et parfois entre le mur et le dormant.

La réhabilitation thermique d'un bâtiment devra corriger les défauts observés sur les ouvrants tout en préservant la qualité architecturale du bâti.

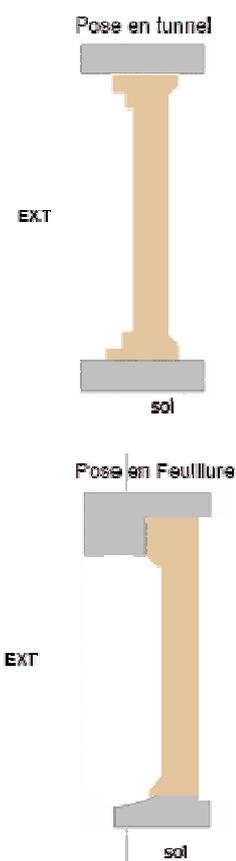
Plusieurs techniques sont envisageables en rénovation comme l'illustrent les schémas de droite : la pose en tunnel ou bien en feuillure. La différence de traitement des jonctions en cas d'isolation extérieure et intérieure sont traités dans le chapitre V « Détail des interventions envisageables ».

Remplacement de la menuiserie : technique la plus courante, la qualité du résultat dépendra du niveau de performance de la fenêtre (double ou triple vitrage, nature du matériau, vitrage faible émissivité...) mais aussi et surtout de la pose des huisseries. Il faudra porter une attention particulière à l'étanchéité de la nouvelle menuiserie, la qualité de pose pourra être vérifiée lors d'un test d'étanchéité à l'air.

Attention, le remplacement ou la rénovation des ouvrants doit être compatible au système de ventilation prévu. Par exemple dans le cas d'une VMC simple flux il faudra prévoir une entrée d'air sur les ouvrants situés dans les pièces de vie.

Le survitrage peut être une solution envisageable lorsque les menuiseries sont en bon état. Cette technique consiste à rapporter un second vitrage sur les ouvrants d'une fenêtre existante. Elle peut être difficile à mettre en œuvre dans le cas de petits carreaux. L'isolation de la partie vitrée est renforcée mais la technique ne corrige pas les défauts éventuels d'étanchéité à l'air entre l'ouvrant et le dormant.

Les doubles fenêtres, cette technique consiste à poser une seconde fenêtre généralement côté intérieur de la paroi. Cette technique peut être utilisée dans le cas de mur très épais, ou lorsque l'on ne peut changer la menuiserie. Les performances obtenues peuvent être supérieures à celle du remplacement par une menuiserie double vitrage. La technique est néanmoins contraignante à l'usage.



II.8- LES SYSTEMES DE PRODUCTION ET DE DIFFUSION

II.8.A - Système de production de chaleur observé lors des visites

De nombreux systèmes de chauffage ayant de très mauvais rendements ont pu être observés. Les chaudières sont souvent surdimensionnées et génèrent des surconsommations⁸.

Les anciennes chaudières peuvent elles aussi, avoir des rendements très faibles liés à leurs technologies et à leur manque d'isolation (les fumées sont rejetées à des températures d'environ 300°C). Le positionnement des chaudières à l'extérieur des espaces chauffés ou encore à l'extérieur d'espaces tampons occasionne également une perte de rendement globale du système de chauffage.

Les cheminées à feu ouvert ont des rendements extrêmement faibles de l'ordre de 10 à 15 % alors que les inserts et les poêles peuvent atteindre des rendements de 80 %. Lorsque ces cheminées à feu ouvert sont utilisées comme chauffage principal ou comme chauffage d'appoint, on peut considérer qu'il s'agit d'un gâchis d'énergie. De plus si le bois utilisé est humide le rendement de

⁸ Dans le cas des émetteurs, le surdimensionnement peut être une bonne chose puisqu'il permettra de fonctionner à basse température.

combustion est fortement diminué. Certains propriétaires ont accès à du bois à moindre coût, ce qui ne les encourage pas à optimiser leurs consommations.

Les chauffages à pétrole lampant, systèmes de chauffage produisant de l'humidité lors de la combustion, sont souvent utilisés par les personnes les plus précaires. Ils sont sources d'inconfort, de dégradation de l'habitat et de surconsommation.

II.8.B - Système de diffusion de chaleur

Nous observons généralement un surdimensionnement des puissances installées. Il peut être encore accru à l'occasion de travaux de rénovation thermique. Ce surdimensionnement peut être favorable, puisqu'il permettra de fonctionner à basse température.

Les robinets thermostatiques et régulateurs sont peu utilisés et leurs fonctionnements sont mal compris par les utilisateurs. Il est important de régler les robinets thermostatiques et les régulateurs en fonction de l'occupation des pièces, d'être vigilant au couplage de différents systèmes de régulation qui peuvent fonctionner de façon incohérente. La programmation doit être revue lors de chaque changement de rythme du foyer (arrivée d'un bébé, travail des personnes du foyer à l'extérieur, présence d'une personne âgée en permanence dans l'habitation...). Dans le cas d'une régulation par sonde extérieure, à l'occasion de travaux de rénovation thermique il est important de veiller à la modification de la courbe de chauffe de la chaudière.

On distingue deux grandes familles d'émetteurs, ceux fonctionnant par :

- **rayonnement** : Ces émetteurs fonctionnent principalement par rayonnement infra-rouge ils ne chauffent pas l'air environnant mais les corps (individus, sols, murs objets) environnant.

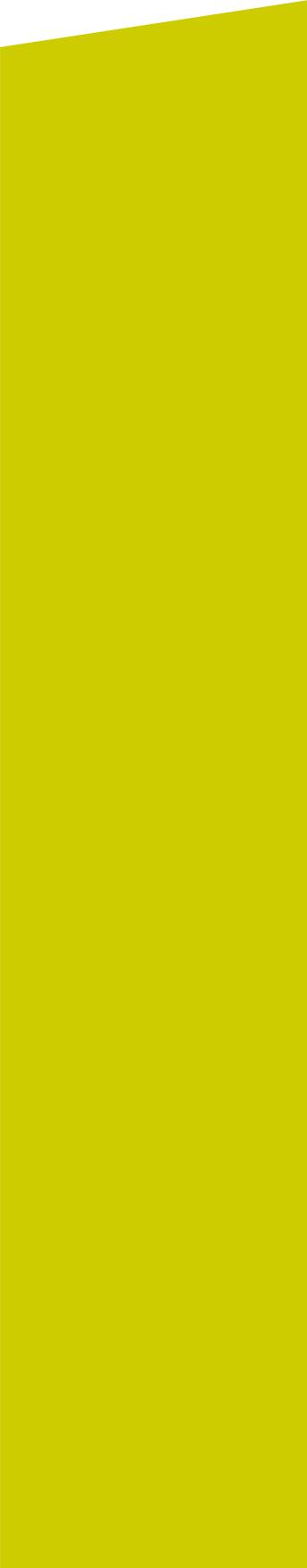
Il existe des émetteurs rayonnant ayant une forte inertie (plancher ou murs chauffants...) et des émetteurs rayonnant à faible inertie (panneaux rayonnant électrique ou gaz...).

- **convection** (convecteurs électriques,...) : Ces émetteurs chauffent l'air environnant, l'échange se fait au moment où l'air passe dans l'élément chauffant. Il s'agit donc de faciliter la circulation de l'air. Cette circulation peut être naturelle ou forcée. Les convecteurs électriques du fait qu'ils fonctionnent principalement par convection peuvent générer de l'inconfort du fait des mouvements d'air qu'ils génèrent et donc de la surconsommation.

Les différents émetteurs ne fonctionnent jamais complètement seulement sur un seul mode de diffusion de la chaleur, souvent une partie de leur puissance est dissipée par convection et une partie par rayonnement.

Le choix des émetteurs doit être fait en fonction du mode d'utilisation de l'habitation :

- Pour une **occupation irrégulière** : on favorisera les émetteurs à faible inertie par rayonnement (panneau rayonnant), notamment lorsque le bâtiment présente une forte inertie.
- Pour une **occupation régulière** : on peut favoriser les émetteurs rayonnant à forte inertie (murs ou planchers chauffant).



**PARTIE 3 > SPECIFICITES ET TECHNIQUES
CONSTRUCTIVES**



I - SYSTEME CONSTRUCTIF PANS DE BOIS

I.1- CARACTERISTIQUES DU SYSTEME CONSTRUCTIF « PANS DE BOIS »

I.1.A - Intérêt patrimonial

Ces maisons à pans de bois sont très anciennes puisqu'on en retrouve des exemples dans l'Antiquité. L'ossature bois et le remplissage constituent le système constructif couramment appelé le colombage. Dès la fin du Moyen Age, on sait édifier en colombage des maisons à plusieurs étages.

Le pan de bois associé au torchis constitue probablement l'un des plus célèbres clichés de la Normandie. Ce type de bâti étant une caractéristique forte de l'architecture Normande et principalement dans le pays d'Auge, il doit être conservé et mis en valeur au maximum afin de préserver l'identité des territoires. La valorisation de ce patrimoine présente de nombreux intérêts économiques.

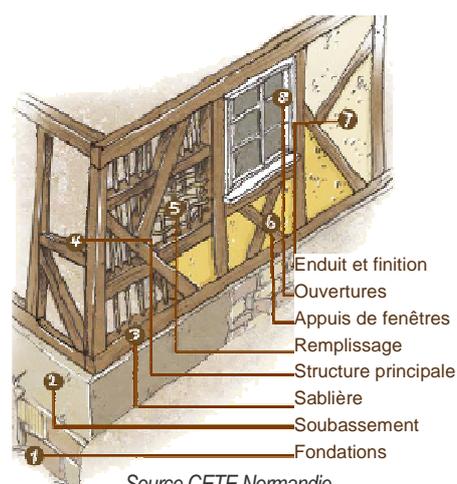


I.1.B - La structure du mur à pans de bois

La construction à pans de bois est un assemblage de poteaux et poutres, disposés à intervalles plus ou moins réguliers. Les pièces maîtresses (poteaux et sablières) délimitent les principaux panneaux du colombage, entre lesquels vient s'inscrire l'ossature secondaire, composée de colombes et d'écharpes.

Ces bâtiments sont constitués d'une ossature bois et d'un matériau de remplissage. L'épaisseur du mur correspond généralement à l'épaisseur des montants de bois plus l'épaisseur de l'enduit éventuel. L'épaisseur des colombages et des montants bois est très variable.

Il existe différentes sortes de remplissage d'origine : le torchis, la brique ou la pierre.

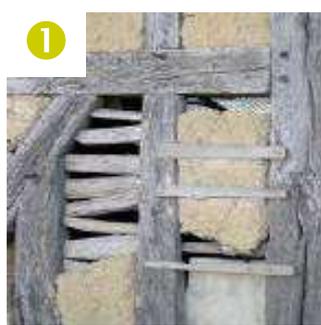


Source CETE Normandie

① Le torchis avec une structure d'accroche : lattis, clayonnage. Le torchis est un mélange de paille et de terre. Un enduit à la chaux recouvre le torchis.

② La pierre est quelquefois utilisée pour le remplissage

③ La brique jointoyée avec un mortier à la terre. A partir du XVIIème, les briques cuites au feu de bois dans les fours de campagnes se substituent parfois au remplissage en torchis. Longues, épaisses et rarement bien calibrées, elles sont posées à plat, obliquement ou debout. Elles peuvent être recouvertes d'un enduit.



Il existe deux grands types de techniques : colombes couvertes et colombes découvertes :

- Le **pan de bois à colombes couvertes** : les bois sont couverts par le torchis sur la face extérieure ou sur les deux faces du mur, suivant l'épaisseur de ceux-ci, ne laissant de visible que le dessin de l'ossature principale.
- Le **pan de bois à colombes découvertes** : les bois sont laissés apparents sur la totalité des faces extérieures, le torchis ne les recouvre qu'à l'intérieur. Le pan de bois est parfois aussi visible de l'intérieur.

I.1.C - La protection des façades

Le bois craint l'humidité et le torchis se dégrade vite sous l'effet de la pluie et du gel. Pour protéger les façades exposées et permettre aux matériaux de perspirer, on a recours à plusieurs types de protections des façades qui doivent laisser circuler la vapeur d'eau sous peine d'occasionner des pathologies. On peut retrouver différentes protections de façades sur un même bâtiment en fonction de l'exposition de la paroi :

- les débords de toiture,
- l'enduit à la chaux,
- le badigeon à la chaux,
- l'**essentage** : technique qui consiste à recouvrir les parois extérieures d'une maison avec des matériaux de couverture, par exemple des ardoises ou des tavillons (petites planches de châtaignier d'une trentaine de cm de longueur et amincis vers l'extrémité). ce système d'accroche laisse circuler l'air sans que la pluie ne s'infiltré,
- le **bardage** : réalisé à partir de planches de châtaigner posées à l'horizontale avec un recouvrement pour faciliter l'écoulement de l'eau.

La chaux est l'irremplaçable alliée du pan de bois. Elle lui fait bénéficier de ses qualités inégalées : naturellement poreuse, la chaux est régulatrice de l'humidité des parois et des variations hygrométriques des bois des colombages, fongicide, elle interdit le développement des champignons.

Il peut se révéler néfaste de laisser apparente la structure à pans de bois si cette structure n'y était pas destinée. Le remplissage, si les bois restent apparents à l'extérieur, doit être d'assez bonne qualité pour assurer le rôle de pare pluie.

I.1.D - Les soubassements

Les pans de bois sont très sensibles à l'humidité. C'est pourquoi ils sont souvent séparés du sol par un solin maçonné.

Les soubassements en pierre sont essentiels et jouent un rôle très important pour lutter contre l'humidité.

Ils se composent généralement de pierres d'assises qui supportent directement les poteaux de la structure et qui sont complétées par une maçonnerie jusqu'à la sablière.

Ils permettent de limiter les remontées capillaires dans les bois et le torchis et protègent des projections d'eau en pied de mur. Ils s'élèvent jusqu'à environ 80cm au dessus du sol.



Crédit photo CETE Normandie

I.2- CARACTERISTIQUES THERMIQUES : AVANTAGES / INCONVENIENTS

I.2.A - Resistance thermique

Les valeurs théoriques de la résistance thermique d'un mur à pans de bois sont difficiles à évaluer. Elles dépendent de la nature de son remplissage, de la qualité de sa mise en œuvre et de son état de conservation.

Le torchis présente une qualité d'isolation moyenne, sa conductivité thermique est assez faible. Toutefois, cette conductivité thermique n'a pas une valeur fixe. Elle dépend de la composition du torchis (répartition entre la quantité de terre et de paille). Plus il y a de paille dans le torchis, plus celui-ci est allégé, plus sa conductivité thermique est faible et donc sa résistance thermique forte. La brique et la pierre ont, à l'inverse, des conductivités thermiques élevées, soit une résistance thermique faible.

Dans le tableau ci-dessous, la résistance thermique d'un mur à pan de bois est pondérée en fonction du remplissage et de son épaisseur. Les murs à pans de bois sont peu épais, les épaisseurs de colombes varient de 7 à 15 cm. On observe au final, une résistance thermique peu performante surtout pour le remplissage en pierre et brique.

Matériaux	Torchis		Brique	
Conductivité thermique moyenne (W/mK)	0.4		0.96	
Conductivité thermique moyenne du pan de bois (W/mK)	Bois/torchis 0.33 à 0.34		Bois/Brique 0.75 à 0.76	
Résistance thermique (m ² K/W)	e=0.12m	e=0.15m	e=0.12m	e=0.15m
	R=0.36	R=0.45	R=0.16	R=0.15

I.2.B - Perméabilité à l'air

Les murs à pans de bois non entretenus ont l'inconvénient d'avoir une mauvaise étanchéité à l'air. Les deux causes de ces défauts d'étanchéité à l'air sont les suivantes :

- les ruptures de liaisons entre l'ossature et le remplissage. Il faut s'assurer du bon état du remplissage, de sa mise en place et qu'il n'y ait pas de carence de matériaux.
- les enduits mal entretenus. En effet, même en bon état, le torchis n'est pas étanche à l'air. Ce sont les enduits intérieurs ou extérieurs qui assurent cette étanchéité. Ces enduits doivent être étanches à l'air et perméables à la vapeur d'eau.

I.2.C - Perméabilité à la vapeur d'eau

Les éléments qui constituent le pan de bois sont perméables à la vapeur d'eau. Ce sont de bons régulateurs hygroscopiques.

Ces murs sont perspirants, l'excès d'humidité peut s'évacuer naturellement du mur par l'intérieur ou l'extérieur. Il est important de préserver cette qualité lors de la réhabilitation thermique.

I.2.D - L'inertie et déphase

Du fait de la faible épaisseur du mur pan de bois, la capacité thermique du mur est faible. L'inertie de ces bâtiments sera donc plus fortement liée à l'inertie apportée par la dalle sur terre plein. L'effusivité du torchis est très faible ce qui apporte une sensation de confort (pas de sensation de paroi froide)

Seule une simulation thermique dynamique permet de mesurer le déphasage en fonction de la composition et de l'exposition de chacune des parois.

Matériaux	Pan de bois remplissage torchis
Densité (Kg/m ³)	1200
Diffusivité a (m ² /s)x10 ⁻⁶	0,22
Effusivité (J/Km ² √s)	740
Capacité thermique (KJ/m ² .K)	218
Inertie	forte
Phénomène de paroi froide	important

I.2.E - Les ponts thermiques

Les valeurs de ponts thermiques sont relativement faibles dans ce type d'habitat. Les jonctions plancher-mur et plafond mur sont faites par des liaisons bois et le bois est peu conducteur.

Pont thermique de liaison	Béton/béton	Bois/bois
Ψ (W/mK)	0.99	0.1

Source JP Oliva

On constate que les ponts thermiques sont 10 fois moins importants pour des liaisons en bois que pour des liaisons bétons.

II - SYSTEME CONSTRUCTIF PIERRE ET BRIQUE

Les maçonneries normandes ont une grande richesse esthétique en raison des multiples combinaisons des techniques de mise en œuvre et des nombreux matériaux utilisés. Sur un même bâtiment, des techniques riches et variées associées à différents matériaux permet de réaliser des motifs décoratifs.

II.1- LA PIERRE

Les pierres utilisées sont d'origine locale d'où une forte variabilité de leurs caractéristiques en fonction de leur nature. Par exemple, le granit et la pierre calcaire ont des caractéristiques mécaniques et thermiques très différentes. Différentes pierres peuvent être associées telles que la pierre et la brique (voir photo ci-dessous, à droite). Les soubassements des maisons peuvent être constitués à partir de grès (voir photo du milieu).



Source CAUE 76



Source CETE Normandie



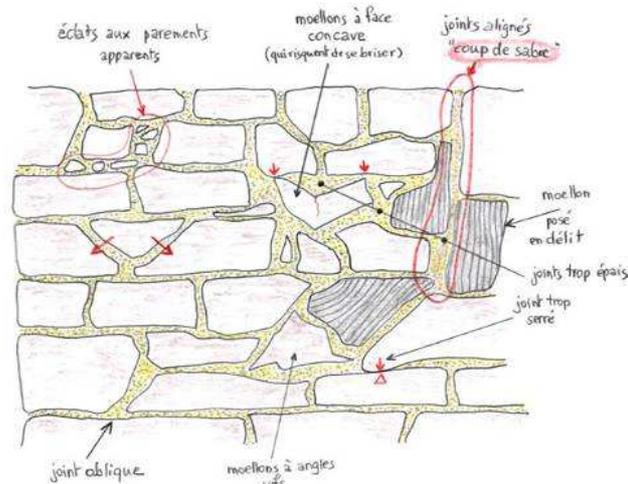
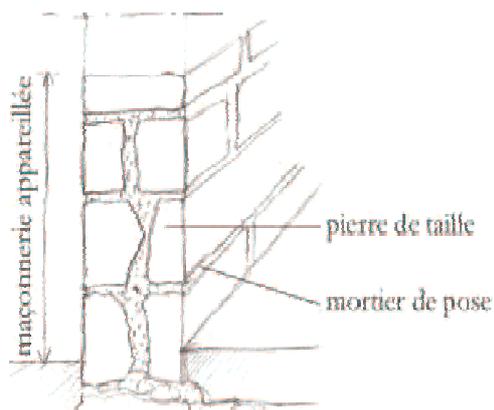
II.1.A - Deux typologies de murs en pierres

→ Les murs en pierres de taille

Les pierres de taille utilisées en Normandie sont le calcaire (pierre de Caen), le granite, le grès et le schiste même si ce dernier est le moins répandu.

Dans les murs en maçonnerie appareillée, on peut observer, comme sur le schéma en coupe à gauche, un remplissage entre les parements de pierre. Ce remplissage est constitué de cailloux "tout venant", de morceaux de tuiles, de gravats ou de terre. Des briques moulées anciennes ou des moellons de silex assemblés au mortier peuvent aussi servir au remplissage du mur.

Dans ces structures maçonnées, voir schéma de droite, les joints jouent un rôle important. Page suivante, on peut observer un mauvais exemple de joint aligné en « coup de sabre », exemple à ne pas reproduire.



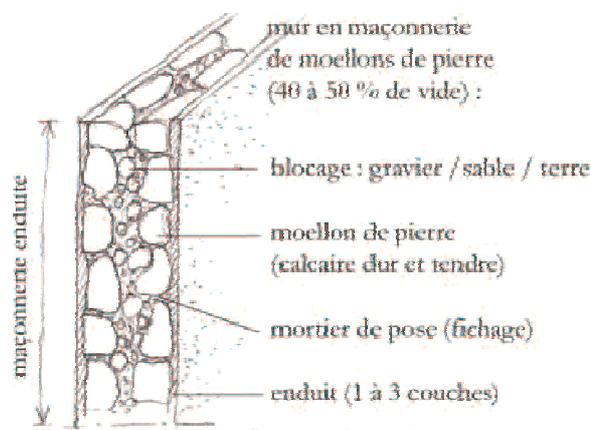
Source Tiezbreiz

→ Les murs en pierres brutes ou partiellement taillées

Les pierres sont utilisées sous forme de moellons, petits blocs, plaquettes. On peut trouver en Normandie du schiste, du granite, du grès, du calcaire ou de petits moellons de silex

Sur le schéma ci-contre, les moellons de pierre sont protégés par une maçonnerie enduite.

Le plus souvent, cet empilement de pierre ou de brique est consolidé par un mortier. A l'origine un mortier était à base de terre, il a été petit à petit remplacé par de la chaux. Perméable à la vapeur, imperméable à l'eau, onctueuse et élastique, elle est facile à mettre en œuvre.



Source Tiezbreiz

II.1.B - Spécificité des murs de pierres : les enduits

Les enduits traditionnels des murs en pierre ou en brique ont toute leur importance. Ce sont en effet, des régulateurs hydriques et thermiques qui assurent la pérennité du mur. De plus, ces enduits assurent l'étanchéité à l'air.

Ils permettent à la vapeur d'eau de sortir sans laisser la pluie entrer, laissant ainsi le mur perspirer et évitant les moisissures. Ils protègent les pierres ou les briques du gel et des attaques acides et contribuent aussi à l'étanchéité à l'air. Ces enduits sont à base de chaux. Au final, ces murs ont une épaisseur de 40 à 60 cm.

II.2- LA BRIQUE

Les constructions en briques ont repris les mêmes règles d'assemblage que celles en maçonnerie de pierre. Le calibrage régulier de la brique a toutefois permis de réduire l'épaisseur des murs qui ne dépasse généralement pas 25 cm.

L'association de la brique et de la pierre de taille s'est répandue au XIXème siècle, avec le développement des tuileries. Les murs en briques sont réalisés par superposition en quinconce et collage par mortier.



Crédit photo Parc Naturel du Perche

On peut trouver des constructions entièrement en brique ou alors des briques combinées à d'autres matériaux. La brique habille fréquemment les encadrements de baies, mais on la trouve aussi en parement de façade. Elle est souvent utilisée en décoration : frises, bandeaux, figures géométriques... et les concepteurs ont su jouer de ses différents coloris qui vont du noir cendré au rouge orangé avec parfois des effets flammés.



On trouve également des maçonneries mixtes qui regroupent sur un même bâtiment différents types de briques. Le silex, associé à la brique, est largement utilisé dans les maçonneries. On en tire parfois un parti décoratif en laissant affleurer ses cassures brillantes.



L'épaisseur et l'aspect des briques sont variables selon l'époque de construction du bâtiment. A la brique manuelle succède peu à peu, à partir du XIXe siècle, la brique mécanique. Enfin, la brique et la pierre pouvaient être utilisées pour le remplissage de murs à pan de bois.

Crédit photos Parc Naturel du Perche

II.3- CARACTERISTIQUES THERMIQUES

II.3.A - Résistance thermique

En fonction de la nature de la pierre ou de la brique, les caractéristiques thermiques sont variables, notamment en fonction de leur épaisseur et de leur densité généralement proportionnelle à la résistance à la compression. Les plus fortes densités sont également synonymes d'un faible coefficient d'isolation ainsi qu'une moindre perméance.

- Pour une pierre poreuse (densité 1.6) = 0.55 W/mK
- Pour une pierre non poreuse (densité 2.8 à 3.1) = 3.5 W/mK

« Coefficient K des parois des bâtiments anciens ». Source : CSTB/ANAH

Matériaux		Granite	Grès	Calcaire extra dur	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Conductivité thermique λ (W/mK)		2.4	1.6	2	1.9	0.92	0.8
Résistance thermique R (m ² k/W)	40cm	0,17	0,25	0.2	0.21	0,43	0,5
	60cm	0,25	0,38	0,3	0,32	0.65	0.75

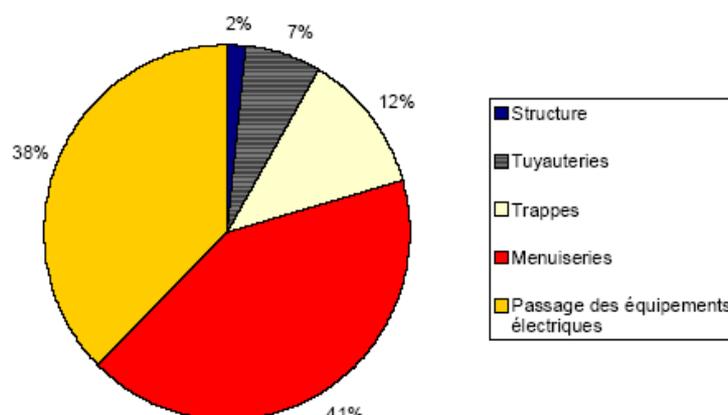
En résumé, plus un mur est hétérogène et composé de matériaux tendres, avec une part généreuse de mortier en parement et en cœur, et plus le mur est capillaire.

II.3.B - Perméabilité à l'air

Les maçonneries sans enduits sont moins étanches à l'air en raison de la porosité des matériaux et des joints mal bouchés.

La barrière d'étanchéité à l'air est généralement constituée par l'enduit extérieur ou intérieur. Pour être efficace, cet enduit doit être en bon état et ne pas présenter de fissurations.

Les infiltrations d'air se font également au niveau des jonctions avec les menuiseries et du passage des gaines et tuyauteries.



Source : CETE sud Ouest

II.3.C - Perméabilité à la vapeur d'eau

Dans le tableau suivant, des écarts très importants de perméabilité à la vapeur d'eau suivant le type de pierre utilisée sont observables. Ces valeurs sont à pondérer avec le mortier utilisé car celui-ci sert de joint de capillarité et permet ainsi la migration de l'eau.

Matériaux	Granite	Grès	Calcaire extra dur	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Résistance à la vapeur d'eau μ (sans unité)	10000	20 à 40	200 à 250	800 à 1000	25 à 40	10 à 16

Source : CSTB

On observe de très grande disparité entre les différentes pierres. Le granite est très imperméable à la vapeur tandis que les joints sont très perméables et capillaires. Un traitement différencié des murs en granite est indispensable.

A l'inverse, pierres tendres et briques sont poreuses : l'eau pénètre plus facilement dans le mur par capillarité. Les briques plus récentes sont cuites à des températures élevées, ce qui les rend moins poreuses. Les grès et pierres calcaires sont perméables à la vapeur d'eau et ils sont capillaires. Il faudra les traiter en veillant à ne pas bloquer la circulation de l'eau.

Les granites sont quasiment imperméables à l'eau. Leur coefficient de résistance à la vapeur d'eau est de l'ordre de 10 000 μ ce qui rend l'isolation par l'intérieur problématique. D'après les calculs, la condensation apparaît dès les premiers centimètres d'isolant. La pose d'un pare vapeur ne permet pas de contrer ce phénomène : les joints et le remplissage jouent un rôle très important dans la migration de l'eau car ils sont très perméables à la vapeur d'eau et capillaires en contrant le caractère imperméable du granite (il est toutefois difficile d'évaluer l'importance de leur rôle).

La nature des briques a évolué dans le temps. Les plus anciennes sont très capillaires. Avec le début de l'industrialisation, elles ont été chauffées de plus en plus fort et sont devenues de ce fait de moins en moins perméables et capillaires. Les briques sont capables de stocker l'humidité introduite dans le mur par infiltration ou par condensation. L'humidité présente dans le mur s'évapore par les faces intérieures et extérieures et ne crée pas en général de désordre tant que les enduits des deux faces restent perméables à la vapeur d'eau.

En général, un bâtiment pierre ou brique vierge de tous travaux a la capacité de réguler seul l'hygrométrie ambiante en raison de sa bonne perméabilité à la vapeur d'eau. C'est ce phénomène qui assure la longévité du mur.

Il ne faut donc pas chercher à rendre étanche le mur (ciment, peintures plastiques...): l'humidité remontant du sol s'y trouverait prisonnière et créerait à moyen terme (20 à 30 ans) des désordres importants.

II.3.D - Inertie et déphasage

Les différents indicateurs, présentés ci-dessous, permettent de nous renseigner sur l'inertie du mur :

- une forte capacité thermique permet de stocker une quantité importante de chaleur dans le mur.
- la forte diffusivité favorise le déplacement du flux de chaleur et donc une perte rapide des calories stockées.
- l'effusivité des matériaux nous renseigne sur la sensation de paroi froide, plus l'effusivité est faible moins le matériau génère de sensation de paroi froide.

Exemple de la capacité thermique de différentes pierres pour des murs de 60 cm d'épaisseur (sauf pour la brique 30cm)

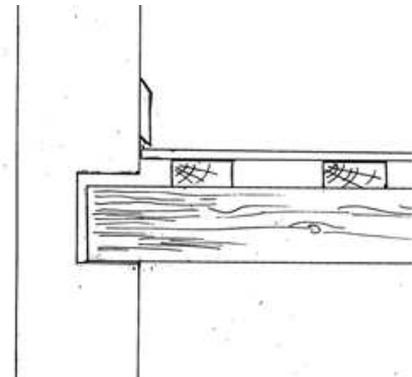
Matériaux	Granit	Grès	Schiste	Calcaire tendre	Brique pleine
Densité (Kg/m ³)	2600	2600	2400	1600	1850
Diffusivité $a(m^2/s) \times 10^{-6}$	1.1	0.8	0.9	0.6	0.6
Effusivité (J/Km ² √s)	2698	2445	2298	2060	1265

Capacité thermique (KJ/m ² .K)	1560	1560	1440	960	555
Inertie	forte	forte	forte	modérée	modérée
Phénomène de paroi froide	important	important	important	modéré	modéré

II.3.E - Ponts thermiques

Dans le bâti ancien, les repos des abouts de poutres, en bois ou en fer, sont généralement réalisés en aménageant des espaces libres (niches) autour de ces pièces de structure ; ceci afin d'éviter le pourrissement du bois ou la rouille du fer au contact des maçonneries.

D'un point de vue thermique, cette discontinuité des structures limite considérablement les échanges par conduction entre le plancher et la façade. Si, de plus, la sous face du plancher est recouverte d'un enduit de plâtre, un caisson d'air très faiblement ventilé est constitué. Ce dernier limite alors les échanges thermiques par convection, au niveau de la liaison plancher – façade.

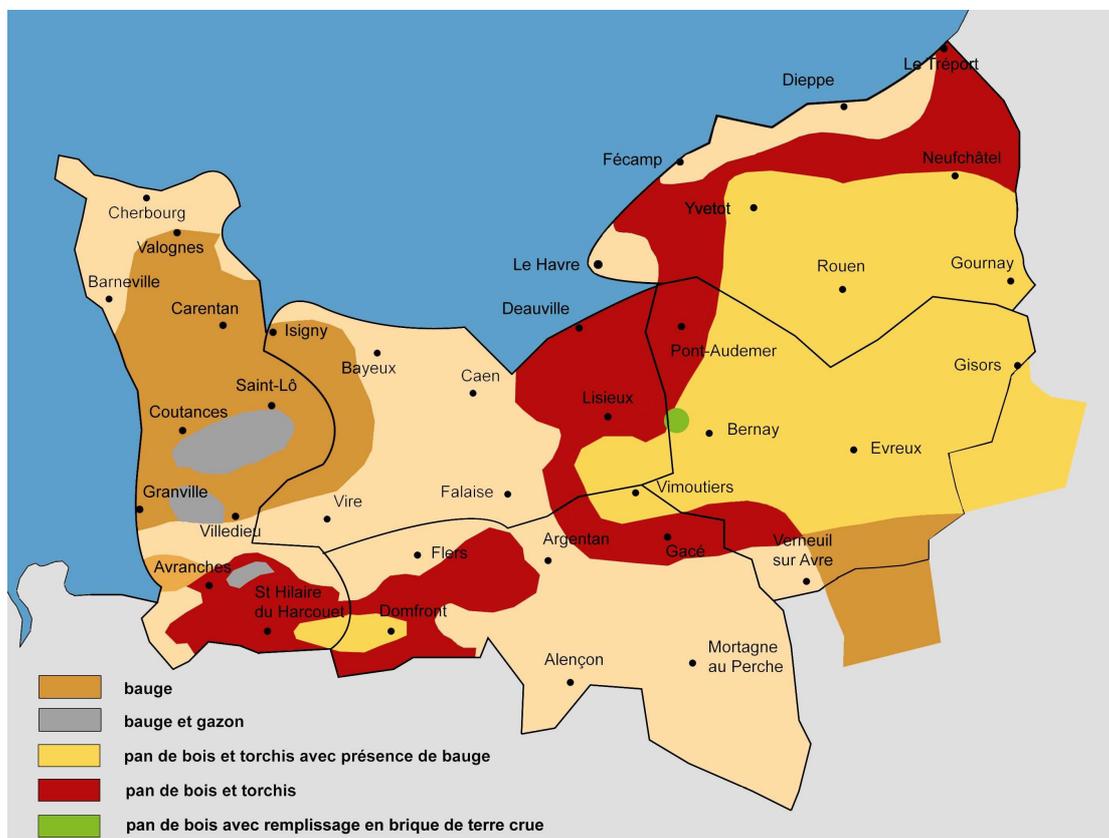


Coupe About de poutre - Source : maison paysanne

III - SYSTEME CONSTRUCTIF DE LA TERRE CRUE

III.1- LA CONSTRUCTION EN TERRE EN NORMANDIE

Il existe différentes techniques pour construire en terre : le pisé, la bauge, l'adobe, le gazon.... La construction en bauge est majoritaire (en nombre d'habitation hors torchis) en Normandie. La terre est aussi utilisée dans les pans de bois pour réaliser le torchis.



Source Parc Naturel Régional du Marais du Cotentin et du Bessin

III.1.A - Les murs en bauge

La bauge, également appelée « masse », est un mélange de terre, de fibres végétales et d'eau. Ce mélange plastique est mis à la fourche, sans coffrage, pour édifier des murs massifs et porteurs. Plusieurs levées successives sont réalisées.

La terre utilisée est extraite directement sur site.

III.1.B - La technique du gazon.

Cette technique est une variante entre le bloc découpé et la bauge. Elle est surtout observée dans le Sud Manche.

Le gazon est aussi un mélange de terre et de paille mais on assemble des blocs pré-séchés sans utilisation de mortier.

III.1.C - Les soubassements

Un soubassement protège le mélange terre-paille des remontées d'eau par capillarité et des rejaillissements d'eau pouvant survenir en pied de mur.

Le soubassement est traditionnellement réalisé en pierres hordées au mortier de terre ou de chaux. Il mesure entre 60 et 80 cm de largeur, en allant jusqu'à 1 m pour les constructions les plus anciennes.

Sa hauteur peut varier de 40 cm à la hauteur d'un étage complet. L'épaisseur du mur très conséquente à la base, est ensuite diminuée au fur et à mesure que le mur monte, afin d'assurer sa stabilité (dispositif nommé « fruit du mur »).

Ces murs en terre étant associés à d'autres matériaux tels que la pierre pour les soubassements, cette mixité est à prendre en compte dans les réflexions menées sur la rénovation des bâtiments en terre crue.

III.1.D - Les enduits

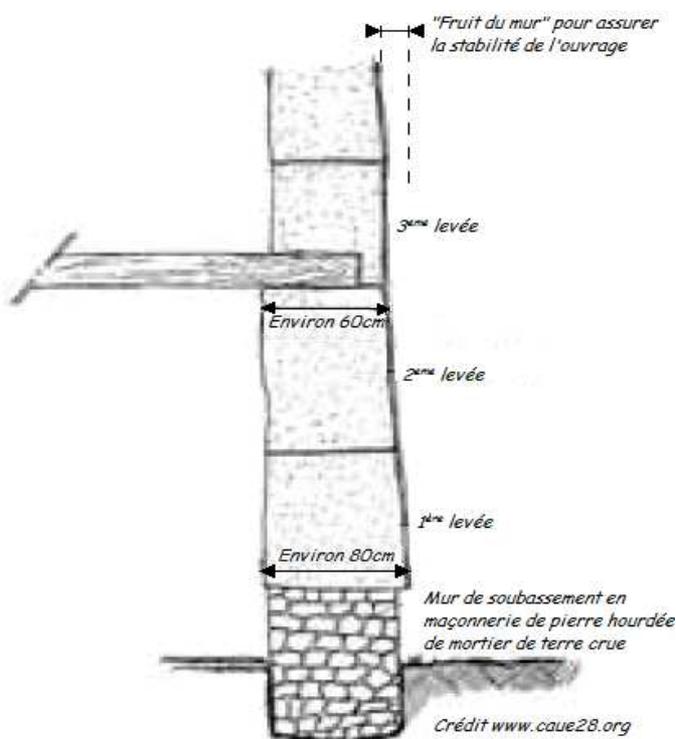
Autrefois les murs en bauge n'étaient pas enduits sauf dans le Bessin où ils étaient enduits à la chaux. Le remplacement des couvertures en chaume par des couvertures en ardoises a fortement diminué la largeur des débords de toit. Les murs ne sont alors plus protégés contre les pluies battantes et il est alors nécessaire de les protéger par un enduit extérieur à la chaux.



Crédit photo CAUE Normandie



Crédit photo PNR du Marais du Cotentin et du Bessin



III.2- CARACTERISTIQUES THERMIQUES

III.2.A - Résistance thermique

D'après une étude ASCNI « Analyse des systèmes constructifs non industrialisés » réalisée par le CSTB, les murs en pisé ont une conductivité thermique de 0.4 à 0.5 W/mK pour une densité moyenne comprise entre 1700 et 2000 Kg/m³.

La bauge a des caractéristiques semblables à celle du pisé. Cependant, la bauge a plus de fibres, sa densité est plus basse. Sa conductivité est donc plus basse et proche de celle du torchis. Nous prendrons dans cette étude un λ de 0,41 W/mK. Le tableau suivant donne la valeur de la résistance thermique, R (m²K/W), en fonction de l'épaisseur du mur.

	40cm	50cm	60cm
λ (0,41)	R=0,97	R=1,21	R=1.46

III.2.B - Perméabilité à l'air

A condition d'être en bon état et sans fissure, les murs en terre crue sont étanches à l'air. Attention, des infiltrations d'air se font essentiellement au niveau des jonctions avec les menuiseries, du passage des gaines et tuyauteries.

III.2.C - Perméabilité à la vapeur d'eau, hygrométrie

L'argile a la capacité de capter l'humidité et de la faire circuler au sein du mur. Le mur en terre est perspirant. Pour les murs en terre crue, le facteur de résistance à la vapeur d'eau, μ est de 6 à 9.

La terre crue est un bon régulateur hygrométrique, elle a la particularité de pouvoir réguler le degré d'humidité interne du bâtiment de manière naturelle. En hiver, elle stocke le surplus d'humidité, ce surplus est ensuite évacué en été. Elle contribue ainsi au lissage des pics d'humidité et permet également d'éviter les périodes à air trop sec.

En été, la terre crue participe au rafraîchissement naturel de l'habitation grâce à l'évaporation de l'eau contenue dans le mur. En effet, l'évaporation de l'eau dans le mur, passage de l'état liquide à l'état gazeux, consomme des calories et refroidit le mur en été (énergie enthalpique ou chaleur latente de changement d'état).

En hiver, la condensation de l'eau dans le mur, passage de l'état gazeux à l'état liquide, dégage de l'énergie et réchauffe le mur.

Les murs en terre doivent conserver une certaine humidité afin de conserver la cohésion

III.2.D - L'inertie et déphasage

Capacité thermique d'un mur en bauge de 80cm d'épaisseur

Matériaux	Terre crue (bauge)
Densité (Kg/m ³)	2000
Diffusivité a (m ² /s)x10 ⁻⁶	0,33
Effusivité (J/Km ² √s)	1010
Capacité thermique (KJ/m ² .K)	2420
Inertie	forte
Phénomène de paroi froide	important

La forte capacité thermique de la terre liée à la forte épaisseur des murs en bauge génère une capacité de stockage thermique très importante de ce type de mur. La faible vitesse du transfert thermique (diffusivité) augmente encore l'inertie des murs en bauge. La terre a une effusivité thermique plus faible que la pierre, la sensation de paroi froide est moindre.

L'inertie du mur en terre crue rend les transferts de chaleur extrêmement lents et décale ainsi les écarts de températures dans le temps. Cette inertie permet aussi d'atténuer les écarts de températures.

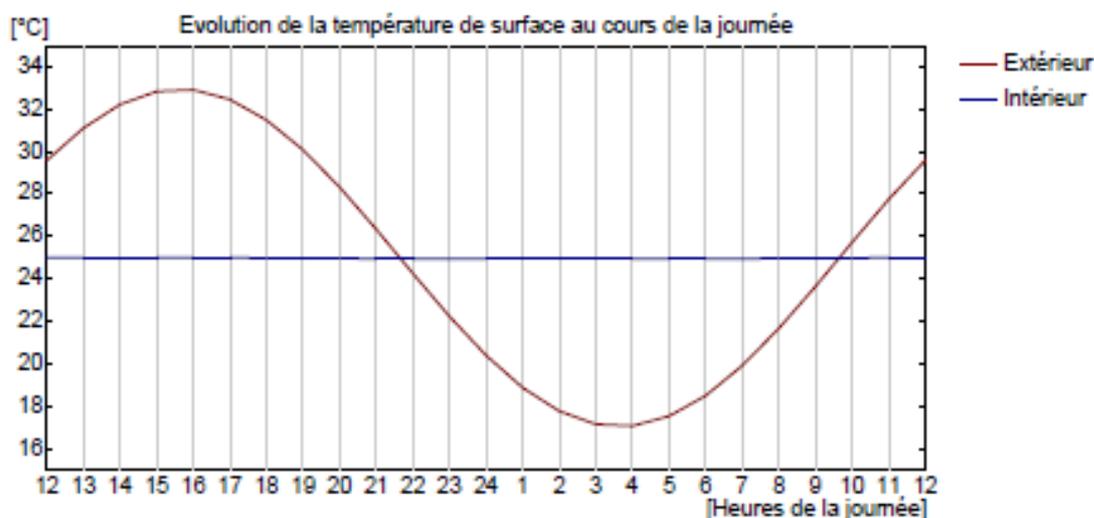
Ainsi, le confort thermique de la terre est supérieur à celui des autres matériaux. La masse du mur va compenser partiellement son moindre caractère isolant. Cette masse stocke une quantité importante de chaleur, avant de la réémettre en partie vers l'intérieur du bâtiment.

En hiver, lorsque le mur est chaud, il restitue lentement ses calories avec un décalage d'une dizaine d'heures. Si le mur en terre est exposé au sud ou à l'ouest, il peut restituer une partie du rayonnement solaire emmagasiné durant les périodes ensoleillées. Les murs en terre crue font alors office de capteur d'énergie solaire. La forte inertie de ces murs induit une montée en température lente et il peut y avoir un phénomène de paroi froide tant que ces murs n'ont pas atteint la température ambiante.

En été, les murs conservent la fraîcheur de la nuit et évitent les phénomènes de surchauffe.

L'étude réalisée avec le logiciel *Uwert*, voir diagramme ci-dessous, permet de regarder le comportement de la paroi durant la saison chaude. Il s'agit ici d'un mur en bauge de 40cm avec un enduit intérieur à la chaux de 4cm. On observe que l'amplitude de température est complètement amortie et que la température du mur est stabilisée à 25°C !

Attention, l'utilisation des matériaux très isolants à l'intérieur limite le facteur inertie du fait du ralentissement du flux thermique.



Dans le cas d'une paroi homogène ayant une capacité thermique forte le graphe ci-dessus représente la régulation idéale apportée par l'inertie. Actuellement l'inertie et la régulation hydrique de l'eau ne sont pas correctement prises en compte dans les moteurs de calculs thermiques réglementaires et sont donc très peu valorisées.

III.2.E - Ponts thermiques

Il y a assez peu de ponts thermiques en raison de la faible conductivité de la terre, surtout si les planchers en bois ont été conservés.

**PARTIE 4 > DETAIL DES INTERVENTIONS
ENVISAGEABLES**

Dans ce chapitre sont présentées les différentes techniques d'isolation des parois opaques étayées par des études de cas permettant de voir le comportement de la paroi vis-à-vis de la migration de la vapeur d'eau. Des points relatifs à la mise en œuvre et au traitement de points singuliers seront également détaillés.

Cette étude ne traite pas spécifiquement du traitement de la perméabilité à l'air, ni des équipements, ni de l'isolation des parois autre que les murs qui seront à prendre en considération dans le cadre de la rénovation globale.

I - ÉTAT DES LIEUX

Pour aborder la rénovation thermique du mur ancien, il faut adapter l'intervention aux particularités du mur et aux contraintes architecturales. Il faut s'assurer que ce bâtiment soit en bon état. En premier lieu, sa structure doit être saine et sans problème de stabilité.

Les pathologies dues à l'humidité sont à résoudre et à traiter avec soin. Si des interventions sont venues perturber la libre circulation de l'humidité (comme par exemple des enduits ciments), il est nécessaire de supprimer ce qui fait barrage.

Les pathologies le plus souvent observées et leurs solutions sont présentées dans la partie 2 du présent document.

I.1- HUMIDITE DANS LE MUR

Les murs sont constitués de matériaux plus ou moins sensibles à l'humidité, il est donc important que les travaux d'isolation ne créent pas de risques de condensation au sein du mur et de stagnation de l'humidité. Pour cela, il faut veiller à éviter de créer des conditions provoquant de la condensation au sein du mur. Il faut aussi que les murs gardent leurs caractères capillaires et perméables à la vapeur d'eau pour permettre l'évacuation d'éventuels excès d'eau.

I.2- ETRE EFFICACE

Les murs anciens étant peu isolants, il est nécessaire d'ajouter une isolation supplémentaire. Dans le coût de l'isolation thermique du mur, la part la plus importante est la mise en œuvre complète des systèmes et non le coût du matériau isolant. Il est donc judicieux d'optimiser dès le départ l'objectif et de chercher à atteindre la meilleure valeur de résistance thermique.

I.3- ISOLATION PAR L'INTERIEUR OU PAR L'EXTERIEUR

La question qui se pose ensuite : doit-on réaliser l'isolation thermique par l'intérieur ou l'extérieur ?

Pour y répondre, il faut tenir compte des avantages et inconvénients exposés dans la partie 3 de ce document.

Le respect de la valeur architecturale et patrimoniale sera primordial. Si le mur à isoler ne présente pas de qualité esthétique, on pourra envisager une isolation par l'extérieur. En effet, l'isolation par l'extérieur présente de nombreux avantages thermiques par rapport à celle par l'intérieur :

L'isolation par l'extérieur rend les températures plus stables et homogènes au sein du mur. La maçonnerie est protégée des intempéries et des risques de gel. L'inertie naturelle du mur est conservée à l'intérieur ; le confort d'été est meilleur. Les ponts thermiques de la dalle intermédiaire et des murs de refends sont supprimés. Il n'y a pas de pertes de surface intérieure et les travaux peuvent se faire en « site occupé ». Enfin, l'isolation par l'extérieur, en général, ne crée pas de risque de condensation interne et ne nécessite pas la pose d'un pare-vapeur. Lors de l'isolation par l'extérieur, on sera confronté aux problèmes de gestion des ouvertures, de débord de toit et de traitement des pieds de murs.

A l'inverse, l'isolation par l'intérieur si elle n'impacte pas le caractère architecturale et donc l'aspect visuel extérieur, impose une plus grande rigueur dans sa mise en œuvre.

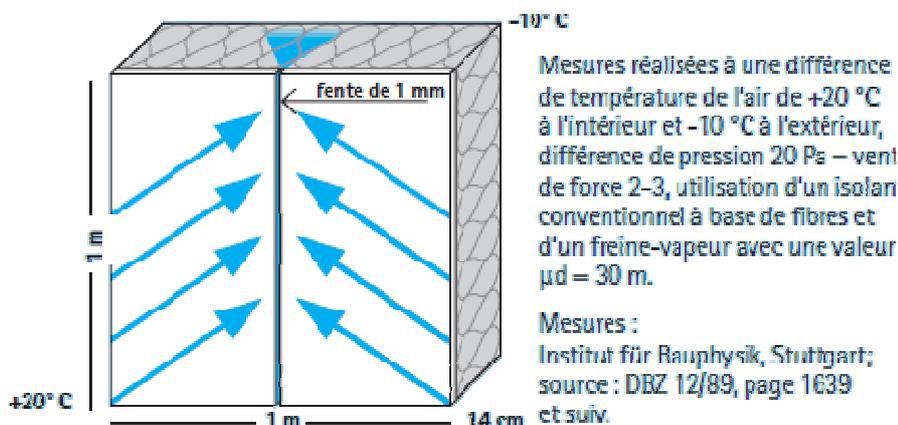
L'isolation par l'intérieur impose des variations de températures plus importantes dans la maçonnerie, celle-ci est donc plus exposée au choc thermique (risque de gel) et peut conduire à des désordres tels que des fissures. L'inertie naturelle du mur n'est pas valorisée et ne joue donc pas le rôle de régulateur thermique. Il faut, alors, traiter soigneusement les ponts thermiques de la dalle de sol, de la dalle intermédiaire, des murs de refends et de la jonction avec les ouvertures. Il y a également une réduction de la surface habitable et les travaux vont impacter la vie au quotidien des occupants.

L'isolation par l'intérieur peut être facteur de risque de condensation dans le mur. Il faudra étudier avec précision la migration de la vapeur d'eau en fonction de la composition de la paroi et déterminer les risques de condensation interne.

I.4- ETANCHEITE A L'AIR

La bonne réalisation de l'étanchéité à l'air est aussi une condition primordiale pour atteindre les performances énergétiques requises.

Le schéma ci-dessous montre l'influence d'un défaut d'étanchéité : ici, une fente de 1 mm.



Source JP Oliva

Sur une surface d'isolation de 1 m² et d'une épaisseur de 14 cm, une fente d'une largeur de 1 mm dans le film d'étanchéité, due au mauvais jointoiement, entraîne 4,8 fois plus de déperdition de chaleur que l'ensemble de la surface isolante.

L'étanchéité à l'air ne sera pas réalisée de la même façon si on isole par l'intérieur ou par l'extérieur.

→ Isolation par l'intérieur

Dans le cas de l'isolation par l'intérieur, l'étanchéité est le plus souvent réalisée par un film d'étanchéité. Ce film doit être posé avec soin, sans discontinuité sur toute la surface et en veillant aux jonctions. Il est posé du côté chaud du mur. Lorsque cette étanchéité à l'air est assurée par un frein vapeur, les techniques d'exécutions sont à mettre en place avec soin et rigueur puisque dans ce cas le frein vapeur répond à deux objectifs. D'une part, réduire l'infiltration d'air en provenance de l'extérieur du logement et d'autre part, limiter la migration de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur du logement pour éviter une condensation dans la masse du mur. Le principe est d'empêcher l'humidité contenue dans l'air chaud d'atteindre la paroi froide entraînant des risques de condensation.

→ Isolation par l'extérieur

Dans le cas de l'isolation par l'extérieur, cette étanchéité à l'air doit se réaliser sans pour autant empêcher la diffusion de la vapeur d'eau à travers les parois. L'étanchéité est réalisée par :

- un enduit d'étanchéité posé sur la face extérieure du mur,
- le pare-pluie et la continuité de l'isolant,
- isolant posé par l'extérieur (ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur).

II - ISOLATION PAR L'EXTERIEUR

Cette technique d'isolation « ITE » consiste généralement à appliquer une couche d'isolation thermique et à poser un revêtement assurant à la fois la finition et la protection contre les sollicitations climatiques et mécaniques. La mise en œuvre doit respecter 2 principes :

- conserver la perspirance du mur, cela permet d'assurer l'évacuation éventuelle de l'humidité présente dans le mur (remontée capillaire...);
- respecter les contraintes techniques et d'urbanisme (débord de toit, emprise sur espace public...).

On peut réaliser l'isolation avec différents types de matériaux : panneaux isolants souples ou rigides minéraux, des matériaux bio-sourcés, briques minérales isolantes, enduits épais isolants. Ce choix sera fonction des objectifs recherchés par exemple : besoin d'assurer une évaporation lors de remontée capillaire.

Les étapes :

1 Préparation du support

Le support doit être propre et dépoussiérée. Il doit être sec. Toute partie qui ne serait pas stable doit être décapée. En effet, l'utilisation de panneaux isolants rigides requiert une finition plane du mur afin que l'adhérence soit continue et empêche la formation de mouvements d'air derrière la couche isolante. Un gobetis à base de chaux permet de redresser les différences de niveaux.

2 Pose des panneaux

Les panneaux sont collés ou fixés mécaniquement au support. Si ce panneau n'est pas étanche à l'eau (eau de pluie), on lui ajoutera un pare-pluie HPV (Haute Perméabilité à la vapeur d'eau).

3 Aspect extérieur

La finition du mur est effectuée soit par un enduit soit par un bardage. Le revêtement peut prendre différentes formes en fonction de la technique choisie et de l'aspect esthétique recherché.

II.1- CONTINUITÉ ENTRE LE MUR ET L'ISOLANT

Il est toujours nécessaire d'assurer une bonne continuité entre le mur et l'isolant extérieur ceci afin d'éviter tout risque de rupture de capillarité. Pour cela il sera parfois nécessaire de redresser le mur à l'aide d'un mortier léger isolant. Les isolants rapportés à l'extérieur peuvent être soit collés, soit fixés à l'aide de cheville, soit insérés dans une ossature secondaire.

II.2- LE PAREMENT EXTERIEUR

Le parement extérieur doit être conçu et exécuté de façon à garantir une parfaite et durable étanchéité à l'eau et une perméabilité à la vapeur d'eau. Les deux principales techniques utilisées pour le parement sont : L'enduit et le bardage ventilé sur pare pluie

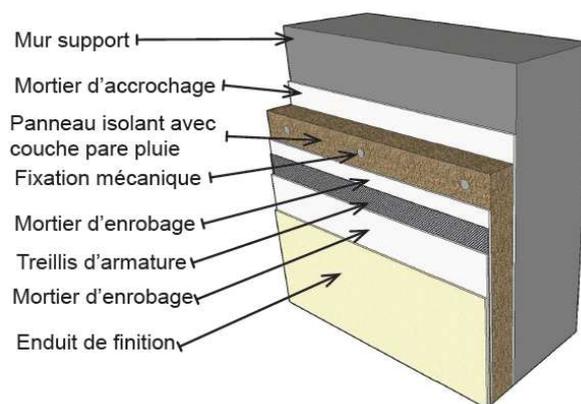
II.2.A - L'enduit extérieur

Les enduits extérieurs remplissent les fonctions suivantes :

- **Protection contre les pénétrations d'eau** : ils remplissent cette fonction lorsqu'ils sont appliqués conformément aux recommandations et qu'ils ne présentent pas de fissuration importante,
- **Perméabilité à la vapeur d'eau** : ils doivent être perméables à la vapeur d'eau afin de permettre le séchage de la maçonnerie et l'évacuation de l'humidité. Ils activent la fonction capillaire du mur,
- **Résistance mécanique** : ils doivent pouvoir résister à des chocs modérés, adhérer suffisamment au support, disposer d'une cohésion adéquate et résister à la fissuration,
- **Étanchéité à l'air** : à condition de ne pas avoir de fissuration,
- **Décoration** : grande variété de compositions, de teintes et d'états de surface.

Les matériaux recommandés sont à base de chaux ou de terre. Attention aux mélanges qui contiennent du ciment : si un enduit contient du ciment les propriétés hygroscopiques de la chaux sont largement détériorées. Les chaux NHL-Z sont à éviter dans le bâti ancien, elles rendent les murs imperméables et bloquent de ce fait la migration de l'eau au sein du mur.

L'enduit doit être parfaitement adhérent avec le mur. Etant donné la position de l'isolant et la faible inertie de l'enduit extérieur, cet enduit peut être soumis à des écarts de température allant jusqu'à plus de 20°C. L'enduit est donc muni d'une armature pour réduire le risque de fissuration.



Isolation par l'extérieur. Source ADEME

→ Les différents type de chaux

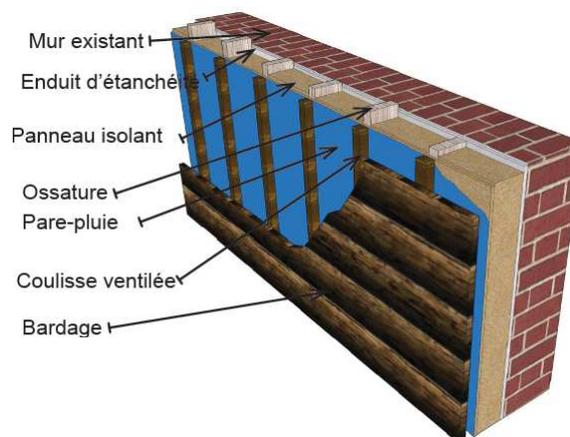
Il existe différents types de chaux aux propriétés physiques différentes:

- **Chaux aériennes (CL70 à CL90)**: ces chaux font leur prise avec le gaz carbonique contenu dans l'air. Les enduits à la chaux aérienne ont une faible résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.
- **Chaux hydrauliques naturelles (NHL2/3,5/5)**: ces chaux font leur prise avec l'air mais également avec l'eau. Plus le chiffre est élevé plus les chaux contiennent d'argile et plus elles se rapprochent d'un ciment et donc plus leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau est grande.
- **Mortier batard**: ce mortier consiste en un mélange de chaux et de ciment en différentes proportions. L'adjonction de ciment augmente l'hydraulicité de la chaux et donc sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

II.2.B - Le bardage

L'isolant doit être protégé par un pare pluie HPV (Haute Perméabilité à la Vapeur d'eau). Le mur est protégé des intempéries. Il n'y a pas de risque de condensation interne pour autant que la migration de vapeur puisse se faire de l'intérieur vers l'extérieur. Le pare pluie est perméable à la vapeur d'eau tout en étant imperméable à la pluie battante.

L'enduit d'étanchéité assure l'étanchéité à l'air mais doit être perméable à la vapeur d'eau. Une lame d'air ventilée est mise en place entre l'isolant et le bardage extérieur. Il faut prévoir une circulation d'air au niveau des tasseaux.



Source ADEME

II.3- ETUDE DE CAS

A travers l'étude théorique de différentes solutions d'isolation, il sera vérifié d'une part la valeur de la résistance thermique et d'autre part l'existence, ou non, d'un risque de condensation (point de rosée) et donc la faisabilité de la rénovation thermique.



PRESENTATION DE LA METHODE

→ Outil utilisé pour les études de cas : logiciel "Uparois"

Les études de cas ont été réalisées avec le logiciel Uparois. Ce logiciel permet d'étudier la condensation au sein d'une paroi. Il utilise la méthode de Glaser. Il calcule la quantité d'eau accumulée durant les mois d'hiver et calcule l'eau évaporée durant les mois d'été. Ce logiciel mentionne les valeurs λ , μ , ρ , C , il donne également la possibilité de changer ces valeurs ou d'entrer de nouveaux matériaux. Ce logiciel est libre d'accès sur <http://www.uparoi.net>

→ Les paramètres utilisés

λ La conductivité (ou conductibilité) thermique caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Elle s'exprime par le coefficient λ (lambda). Plus λ est grand, plus le matériau est conducteur, plus le λ est petit, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique des matériaux s'exprime en $[W/m \cdot K]$.

R La résistance thermique du matériau est égale à son épaisseur divisé par la conductivité et s'exprime $[m^2K/W]$.

μ ou Mu Grandeur sans unité, symbolisé μ , elle indique dans quelle mesure un matériau (pris sous son aspect « matière » : le béton, le bois...) s'oppose à la migration de la vapeur d'eau. Il est établi par convention que l'étalon pour exprimer la progression de la vapeur d'eau est l'air immobile ($\mu_{air} = 1$)

C Capacité thermique massique ou chaleur massique, c'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré centigrade ($^{\circ}C$) ou kelvin ($^{\circ}K$), un kilogramme de matériau donné. Symbolisée « C », elle s'exprime en $[J/kg \cdot K]$. Plus « C » est grand, plus le matériau, pour un poids donné, peut stocker de chaleur.

Sd épaisseur de lame d'air équivalente en mètre $Sd (m) = \mu \times e$ (épaisseur en m), cette valeur est une des caractéristiques des membranes d'étanchéité.

P La densité du matériau exprimée en kg/m^3

→ Données de départ

- Conditions intérieur : **20°C, 50% humidité**
- Conditions extérieur : **-7°C, 80% humidité**

→ Résultat de l'étude

- Calcul de la valeur **$U=1/R$**
- Etude "condensation en statique" ou étude de Glaser : le **graphique généré** montre que la température de condensation (courbe bleue) est la température à laquelle la vapeur d'eau condense pour former de l'eau liquide (changement de phase gazeuse à phase liquide). Si la température (courbe noire) est supérieure à cette température de condensation il n'apparaît pas d'eau liquide. Si les deux courbes viennent à se toucher, il se forme en ce point de la condensation. C'est le point de rosée. Le logiciel tient aussi compte de la possibilité de séchage au cours de la saison chaude.
- Le **déphasage** : le logiciel permet de calculer le déphasage généré par la paroi. Ces données n'ont pas été prises en compte dans les études de cas, car le déphasage doit s'apprécier au vue de l'ensemble des parois de la pièce. Cette information doit être prise en compte de manière globale notamment pour préserver le confort d'été. Dans le cas de l'isolation des combles, le déphasage apporté par les matériaux d'isolation doit être de nature à éviter les surchauffes en se rapprochant d'un déphasage de 12 heures.
- Il est préférable d'utiliser un logiciel de simulation thermique dynamique pour apprécier cette donnée.

→ Limite de la méthode de Glaser

Le modèle de calcul ne prend pas en compte :

- les propriétés hygroscopiques (matériaux qui permettent de stocker en leurs seins une certaine quantité d'humidité) des matériaux utilisés. Les propriétés hygroscopiques favorisent le transport par capillarité des éventuels condensats,
- la capacité d'inertie des matériaux, permettant un stockage de la chaleur et d'établir un équilibre thermique entre intérieur et extérieur.

La prise en compte de ces facteurs conduirait à d'une part minorer les risques liés au point de rosée et d'autre part améliorer la performance des parois à forte inertie.



ETUDE DE CAS N°1 : PAN DE BOIS ISOLE PAR L'EXTERIEUR

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Avant isolation, le pan de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}=0,66 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, cette valeur est insuffisante pour assurer une isolation efficace.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)
Ri*			0,13	0,13
BA13	0,013	0,25	0,05	0,18
bois/torchis	0,15	0,34	0,44	0,62
Re			0,04	0,66
Extérieur	0,163			0,66

*Ri résistance thermique superficielle de la paroi intérieure et Re résistance thermique superficielle de la paroi extérieure

→ Caractéristiques de la paroi après isolation

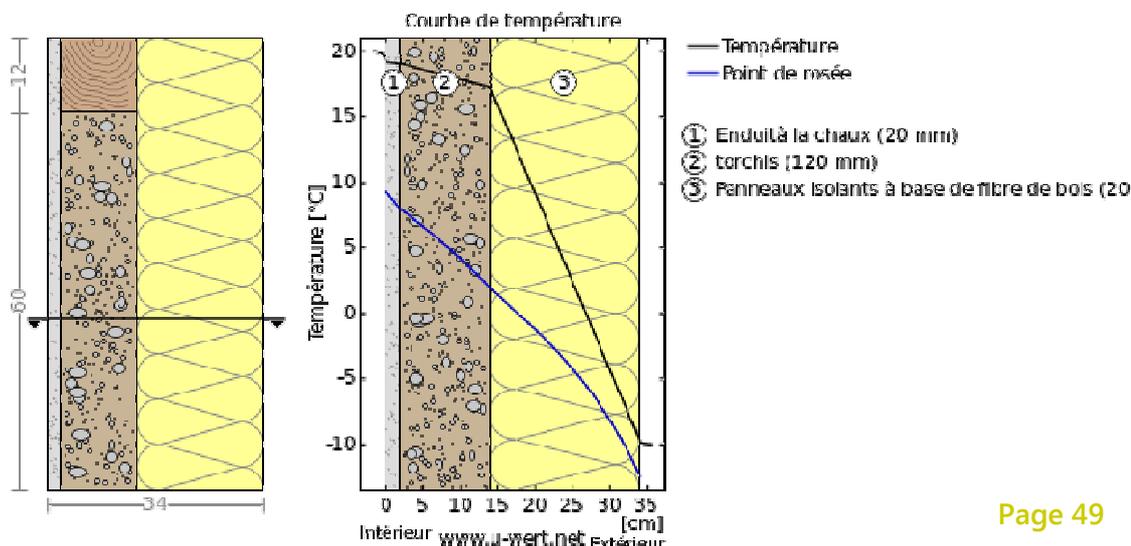
Isolation par l'extérieur avec des panneaux de fibres de bois de 20cm faisant office de pare pluie. Enduit intérieur à la chaux, bardage bois à l'extérieur. Après isolation, le pan de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}= 4,98 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda (W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	mu
Ri			0,13		
Enduit chaux	0,02	0,87	0,023		10
Pan de bois/torchis	0,15	0,4	0,3		6
Panneaux fibres bois	0,2	0,045	4,44		5
Re			0,04		
Extérieur				4,98	

Le diagramme de Glaser, ci-dessous, montre qu'il n'y a pas de condensation dans le mur. Dans ce cas la performance thermique du mur est satisfaisante, il n'y a pas de risque de condensation, la perméabilité à l'air est assurée par un enduit à la chaux intérieur et la continuité des panneaux de fibre de bois. On conserve l'inertie du torchis côté intérieur, ce qui améliore le confort thermique.

La capacité calorifique du torchis est de 908 KJ par m³, si l'épaisseur du torchis est de 12 cm la capacité calorifique d'1m² de paroi est de 108 KJ.

Attention ! Au revêtement extérieur, s'il s'agit d'un enduit il faudra vérifier qu'un point de condensation ne se positionne pas entre l'enduit et l'isolant. Dans ce cas, préférer une finition par bardage.





ETUDE DE CAS N°2 : MUR DE TYPE PAN DE BOIS DE 12CM AVEC REMPLACEMENT DU TORCHIS ET PANNEAU LAINE DE ROCHE EXTERIEUR.

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Avant isolation, le pan de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}=0,66 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, cette valeur est insuffisante pour assurer une isolation efficace.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)
Ri			0,13	0,13
BA13	0,013	0,25	0,05	0,18
bois/torchis	0,15	0,34	0,44	0,62
Re			0,04	0,66
Extérieur	0,163			0,66

*Ri résistance thermique superficielle de la paroi intérieure et Re résistance thermique superficielle de la paroi extérieure

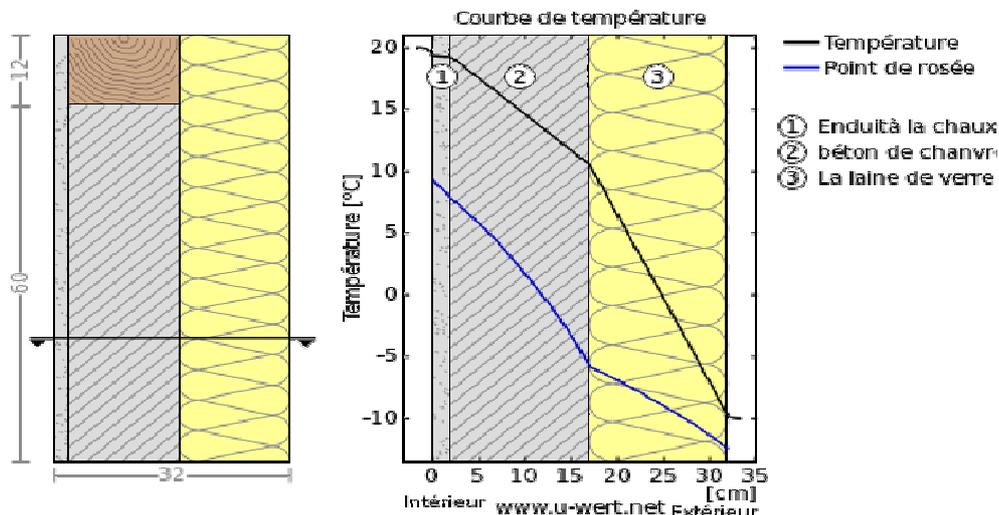
→ Caractéristiques de la paroi après isolation

Isolation avec un mortier léger posé entre le pan de bois et également à l'intérieur de 12cm puis ajout d'une isolation en panneau de fibre de roche par l'extérieur de 15cm. Enduit intérieur à la chaux, bardage bois à l'extérieur.

Isolation par l'extérieur avec 15cm de panneau laine de roche $\lambda=0.040\text{W/mK}$ et $\mu=3$. Après isolation, la paroi a une résistance thermique totale $R_{tot}= 5,123 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	mu
Ri			0,13	0.13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,023		10
Mortier léger	0,12	0,09	01,33		10
Pan de bois/mortier léger	0,12	0,34			6
Panneaux de fibres de roche	0,15	0,04	3,75		5
Re			0,04		
Extérieur				5,123	

Le diagramme de Glaser montre qu'il n'y a pas de condensation dans le mur. Dans ce cas la performance thermique du mur est satisfaisante, il n'y a pas de risque de condensation, la perméabilité à l'air est assurée par un enduit à la chaux intérieur et la continuité des panneaux de fibre de bois et le mortier léger. On conserve l'inertie du torchis coté intérieur ce qui améliore le confort thermique.





ETUDE DE CAS : MUR EN PIERRE CALCAIRE ISOLE PAR L'EXTERIEUR AVEC FIBRE DE BOIS

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 0,51 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,96 \text{ W/m}^2\text{K}$

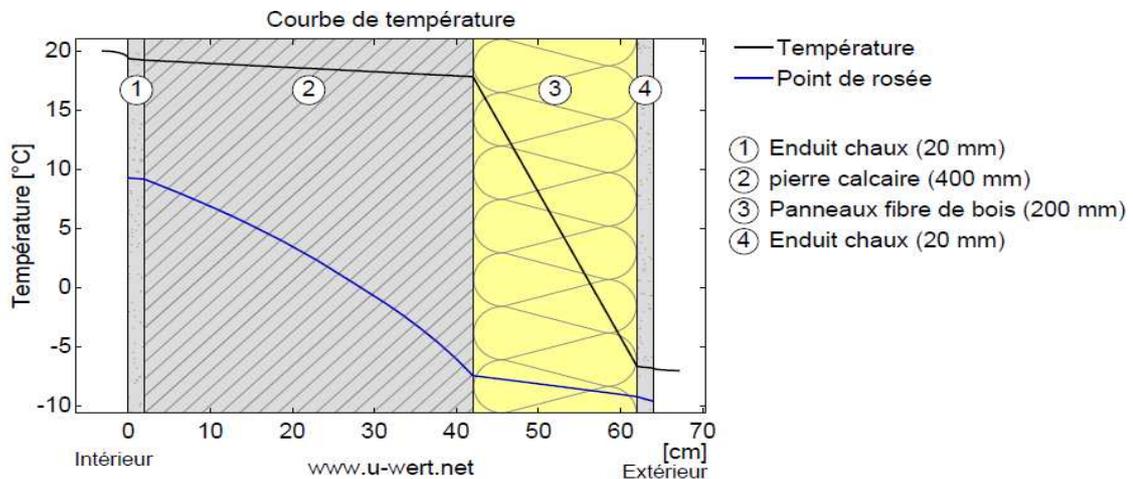
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29	0,44	45
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,47	10
Re			0,04	0,51	
Extérieur				0,51	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation par panneau de fibre de bois

L'isolation par l'extérieur est constituée de panneaux rigides en fibres de bois qui font office de pare pluie et sont enduits. Après isolation, ce mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 5,51 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29	0,44	45
Panneau bois	0,2	0,04	5,00	5,44	3
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	5,47	10
Re			0,04	5,51	
Extérieur				5,51	

Le diagramme ci-dessous, nous montre qu'il n'y a aucun risque de condensation dans le mur. Cette technique préserve l'inertie du mur calcaire.





ETUDE DE CAS N°3 : MUR EN PIERRE CALCAIRE DE 40 CM ISOLE PAR L'EXTERIEUR EN BOTTE DE PAILLE

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 0,51 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,96 \text{ W/m}^2\text{K}$

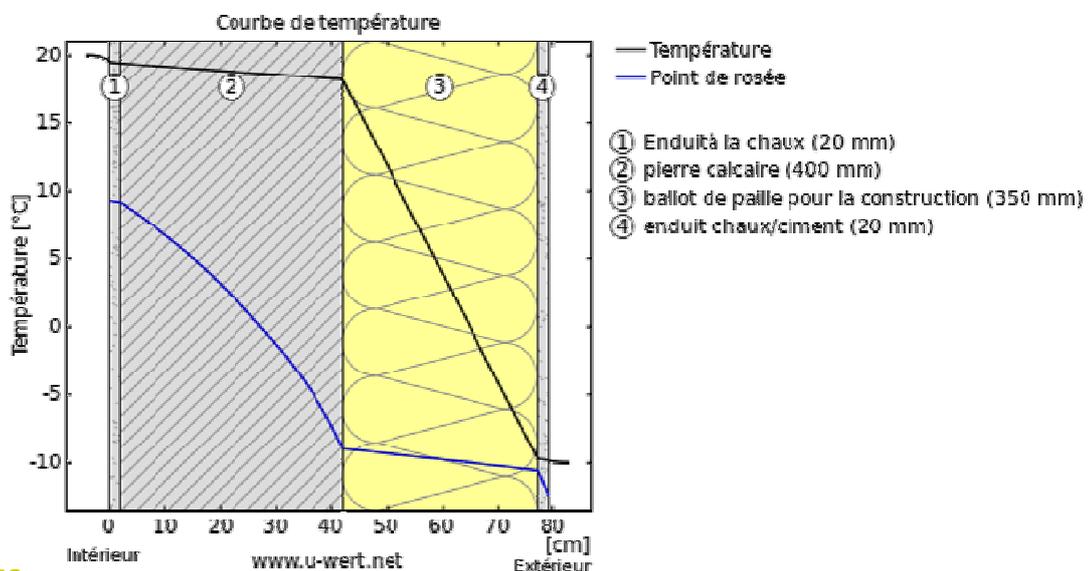
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29	0,44	45
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,47	10
Re			0,04	0,51	
Extérieur				0,51	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation avec bottes de paille

Isolation par l'extérieur avec 35cm de paille (botte à chant). Les bottes de paille offrent un flux thermique perpendiculaire aux fibres. Si, $\lambda = 0,052 \text{ W/mK}$; $\rho = 100 \text{ Kg/m}^3$; $\mu = 2$; $C = 1600 \text{ J/kgK}$., soit $R = 7,21$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29	0,44	45
Botte de paille	0,35	0,052	6,73	5,44	3
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	7,17	10
Re			0,04	7,21	
Extérieur				7,21	

Dans ce cas, la performance thermique du mur est très satisfaisante, il n'y a pas de risque de condensation, la perméabilité à l'air est assurée par un enduit à la chaux. On conserve la forte inertie de la pierre coté intérieur ce qui améliore le confort thermique.





ETUDE DE CAS N°4 : MUR EN BAUGE DE 80CM ISOLE PAR L'EXTERIEUR AVEC DES PANNEAUX DE FIBRE DE BOIS

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en bauge a une résistance thermique $R = 0,94 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}$

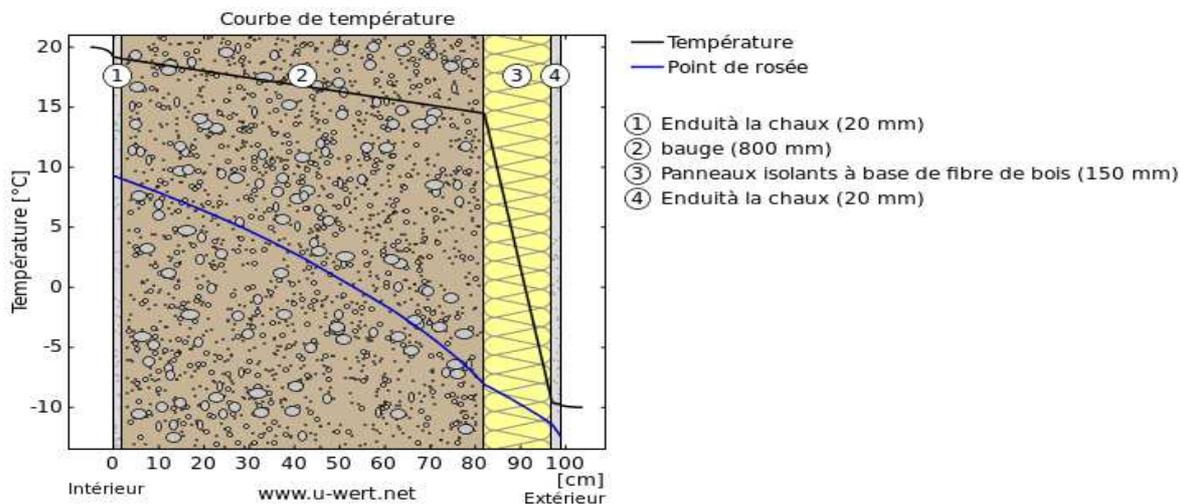
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Mur bauge	0,8	1,1	0,73	0,88	45
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,9	10
Re			0,04	0,94	
Extérieur				0,94	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation par de la fibre de bois

Isolation par l'extérieur avec 15cm de panneau fibre de bois $\lambda = 0.039 \text{ W/mK}$ et $\mu = 3$ soit $R = 4,79 \text{ m}^2\text{K/W}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Mur bauge	0,8	1,1	0,73	0,88	10
Fibre de bois	0,15	0,039	3,85	4,73	3
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	4,75	10
Re			0,04	4,79	
Extérieur				4,79	

Dans ce cas la performance thermique du mur est satisfaisante, il n'y a pas de risque de condensation, la perméabilité à l'air est assurée par un enduit à la chaux. On conserve la forte inertie de la terre côté intérieur ce qui améliore le confort thermique.





ETUDE DE CAS N°5 : MUR EN BRIQUE DE 30CM AVEC ISOLATION PAR L'EXTERIEUR PAR MOUSSE ISOLANTE

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en brique a une résistance thermique $R = 0,57 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$

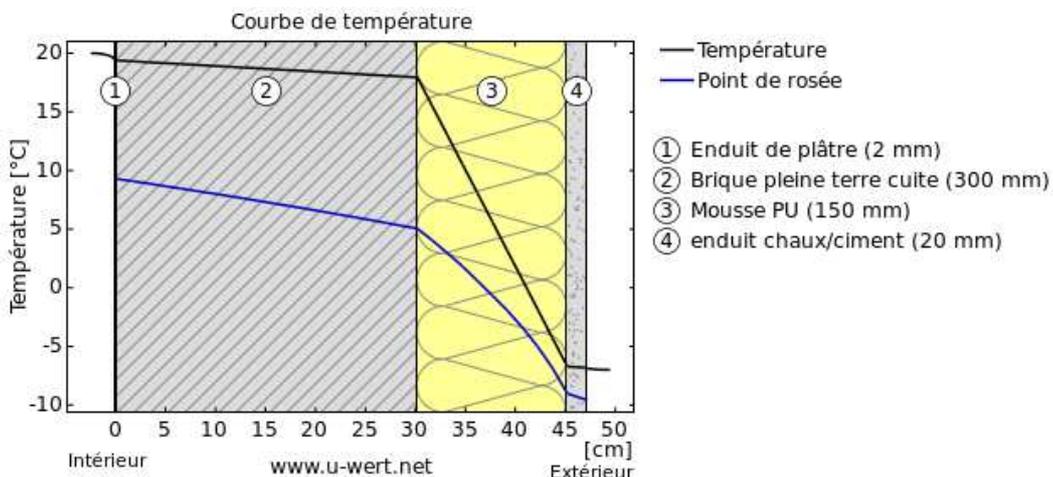
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit plâtre	0,02	0,35	0,06	0,19	10
Mur brique	0,3	0,96	0,31	0,5	45
Enduit chaux/ciment	0,02	0,7	0,03	0,53	10
Re			0,04	0,57	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation par l'extérieur avec 15 cm de mousse isolante

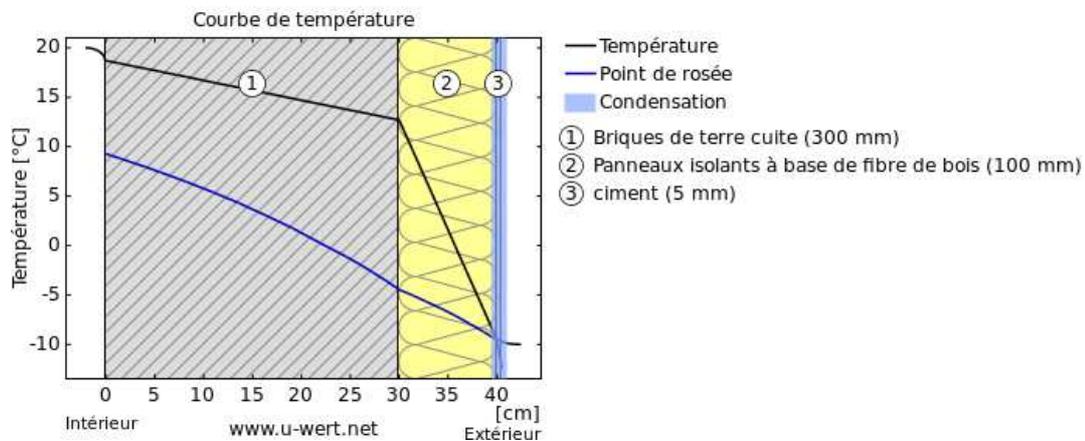
On obtient $U = 0.17$ soit $R = 5,9 \text{ m}^2\text{K/W}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit plâtre	0,02	0,35	0,06	0,19	10
Mur brique	0,3	0,96	0,31	0,5	45
Mousse isolante	0,15	0,028	5,36	5,86	50/200
Enduit chaux/ciment	0,02	0,7	0,03	5,89	10
Re			0,04	5,93	
Extérieur				5,93	

Il n'y a pas de problème de condensation dans la paroi. Dans ce cas la performance thermique du mur est satisfaisante, il n'y a pas de risque de condensation, l'imperméabilité à l'air est assuré par les différents composants de la paroi. On conserve la forte inertie de la terre coté intérieur ce qui améliore le confort thermique.



Attention, l'utilisation d'une mousse isolante, d'un liège, d'une laine minérale, et du verre cellulaire non capillaire limite les possibilités d'évaporation de la paroi, l'habitat ancien présente des risques de remontées capillaires qui ne pourraient être évacuées vers l'extérieur de la paroi. L'utilisation de matériaux hygroscopiques est préférable. Par exemple, la mise en œuvre d'un enduit ciment en revêtement extérieur conduit à la condensation.





ETUDE DE CAS N°6 : MUR EN GRANITE ISOLE PAR L'EXTERIEUR.

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en granit a une résistance thermique $R = 0,39 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

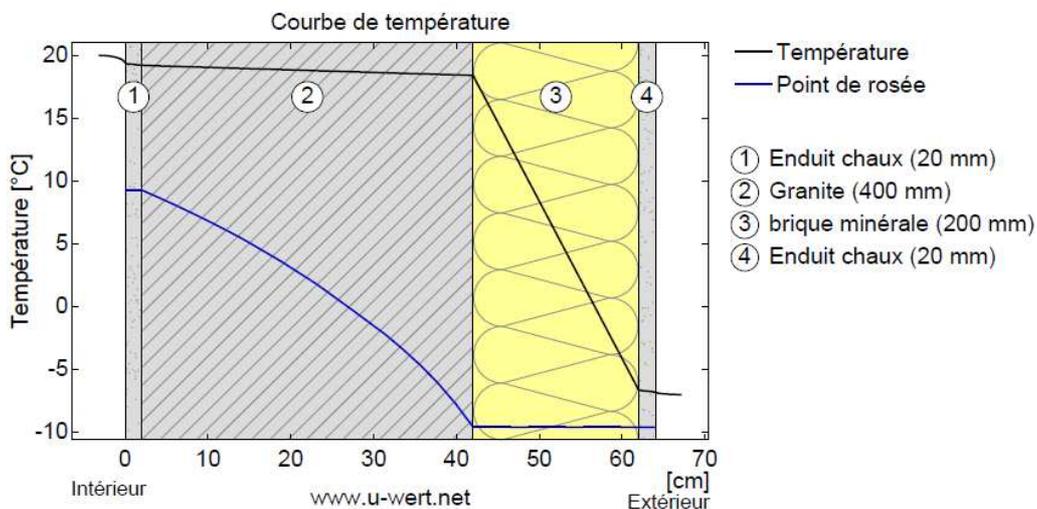
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
granit	0,4	2,5	0,16	0,31	10000
enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,34	10
Re			0,04	0,39	
Extérieur				0,39	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation par l'extérieur avec brique minérale de 20 cm

Après isolation en utilisant de la brique minérale sur une épaisseur de 20cm : le mur en granit a une résistance thermique $R = 5,39 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Granit	0,4	2,5	0,16	0,31	10000
brique minérale	0,2	0,04	5,00	5,31	3
enduit chaux	0,02	0,7	0,03	5,34	10
Re			0,04	5,39	
Extérieur				5,39	

Le diagramme ci-dessus, nous montre qu'il n'y a aucun risque de condensation dans le mur. Cette solution permet l'évacuation d'humidité éventuelle due à des remontées capillaires du fait de la perspirance de la paroi.

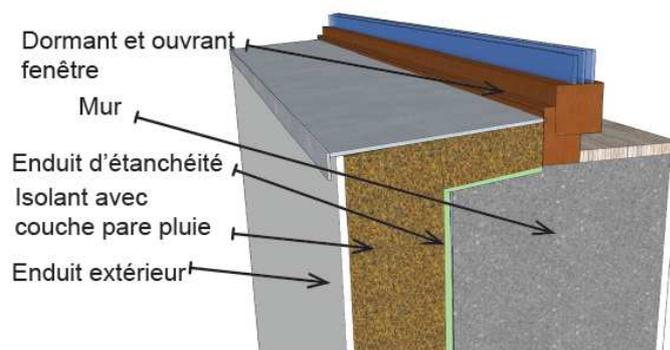


II.4- POINTS SINGULIERS A VERIFIER POUR EVITER LES PONTS THERMIQUES

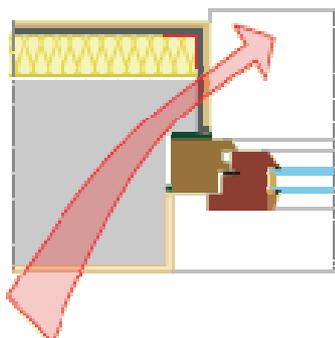
Les ponts thermiques sont à traiter avec soin. Il s'agit des jonctions sol/mur, plancher haut/mur, encastrement des poutres dans le mur, encadrement des fenêtres.

II.4.A - Traitement des ponts thermiques murs/ouvrants

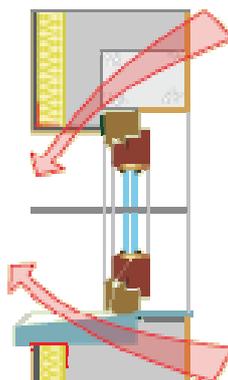
Si on profite du chantier pour changer les huisseries, on pourra les rapprocher de l'extérieur pour compenser la perte de luminosité et améliorer l'esthétique. Le travail architectural de composition de la façade et l'optimisation du ratio performance thermique / coût incitent à positionner les menuiseries au nu extérieur du mur, tout en conservant un retrait d'au moins 8 cm par rapport au plan de la façade. Il est donc envisageable de prolonger l'isolant devant le dormant pour améliorer l'étanchéité, la performance thermique et le clair de jour. Suivant l'endroit où s'interrompt l'isolant, l'étanchéité à la jonction mur - isolant- dormant est à traiter soigneusement. Il faut veiller à la continuité de l'isolation au niveau du retour de baies.



Source ADEME



Ponts thermiques au niveau de l'encadrement.



Source IBGE



Solution

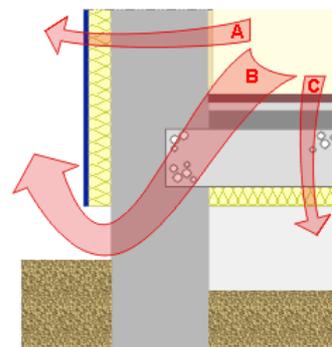
II.4.B - Le traitement des pieds de murs

Cette coupe de pied de mur présente le pont thermique entre le plancher et le pied de mur. Il est important de traiter ce pont thermique.

Pour limiter le pont thermique entre le mur et le plancher bas, l'isolation doit descendre le plus bas possible. Il faut bien évidemment tenir compte de la nature du sol et des fondations pour ne pas mettre en péril la stabilité de l'édifice.

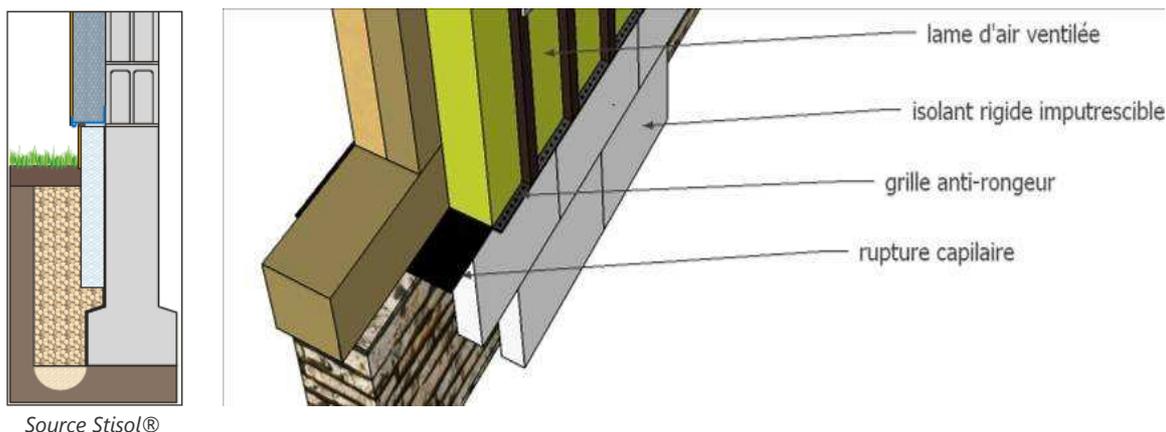
La partie enterrée du mur est isolée avec un matériau insensible à l'humidité mais hygroscopique : liège, verre cellulaire, pierre ponce.. Cet isolant imputrescible monte jusqu'à 25-30 cm au dessus du niveau du sol.

Si l'isolant utilisé en pied de mur est capillaire, on installera une rupture de capillarité. On place une rupture de capillarité et une grille anti rongeur au niveau de la jonction avec l'isolation du mur extérieur. L'isolant du pied de mur doit être aussi perméant à la vapeur d'eau exemple plaque silico calcaire.



www.energieplus-lesite.be

On peut profiter de ces travaux pour poser un drain si c'est nécessaire. Il faut bien sur tenir compte de la solidité des fondations et la pose d'un drain est loin d'être banale, il ne faut pas risquer de trop assécher le mur.



Si on ne peut pas toucher au sol extérieur, on se contentera d'une correction thermique avec des matériaux imputrescibles et perspirants.

II.4.C - L'Étanchéité à l'air

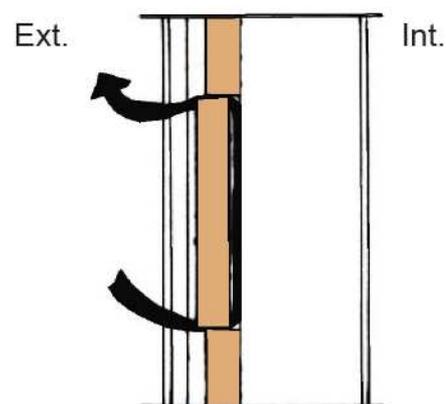
Il faut éviter que de l'air froid extérieur ne puisse s'infiltrer du côté intérieur du mur, réduisant ainsi l'efficacité de l'isolation. Pour que cette étanchéité soit effective, il faut que les panneaux isolants soient posés de manière bien jointive.

Pour éviter les courants de convection, les panneaux doivent être appliqués contre le mur-support. Si l'isolant est perméable à l'air (fibre, laine minérale) il doit être posé sur un support lui-même étanche à l'air.

→ Entourage des baies

Une attention particulière doit être portée aux points sensibles que sont les entourages de baies. Le CETE de Lyon a réalisé un mémento technique proposant près de 200 schémas de détails techniques très précis des murs maçonnés⁹.

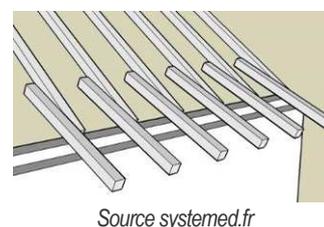
Il existe de nombreux systèmes et produits manufacturés, cependant le soin et la qualité de la mise en œuvre restent essentiels.



Étanchéité à l'air pour ITE ; Source ADEME

II.4.D - Les débords de toit

L'isolation par l'extérieur va réduire le débord de toiture. Une solution pour rallonger le débord de toiture est le rapport d'un coyau. Le coyau va permettre la protection des murs contre les ruissellements et l'harmonie de l'ensemble pour l'esthétique du bâtiment.



II.5- EN CONCLUSION

L'isolation par l'extérieur génère peu de risque de condensation. Cette technique est efficace sous réserve de bien appréhender les points singuliers. Il est nécessaire dans le cas du bâti ancien de

⁹ <http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/etancheite-a-lair-du-batiment>.

veiller à la perspiration de la paroi pour permettre l'évaporation d'eau présente dans le mur et due par exemple à des remontées capillaires.

Dans le cas de l'isolation par l'extérieur, il faudra veiller à ce que le revêtement intérieur mis en œuvre permette le séchage du mur : soit le mur restera apparent soit on utilisera des matériaux hygroscopiques (enduit en terre ou chaux...).

Les compositions des parois étudiées dans ce chapitre sont favorables à la diffusion de vapeur d'eau, cependant pour chaque cas il faudra redéfinir le mu du mur existant et faire une simulation.

III - CAS D'UNE ISOLATION REPARTIE

L'isolation répartie consiste en une isolation dans l'épaisseur du mur. En construction neuve on utilise généralement pour cela des briques isolantes. En rénovation cette technique est principalement utilisée pour le remplissage de structures bois.

Nous étudierons dans ce chapitre l'option remplissage du pan de bois et une autre forme d'isolation qui peut être assimilée à l'isolation répartie elle concerne les isolations rapportées à l'extérieur et à l'intérieur.

III.1- LE REMPLISSAGE DU PAN DE BOIS

Après avoir réglé les pathologies qui pourraient exister, le point suivant à étudier concerne la qualité du remplissage c'est à dire le torchis en place. A-t-il besoin d'être restauré ou d'être changé complètement ?

La réponse à cette question va conditionner la technique de rénovation choisie. Le remplacement total du remplissage permet d'avoir une isolation répartie qui supprime les risques de condensation dans le mur. Pour avoir une performance thermique intéressante, il va falloir augmenter l'épaisseur du mur. Cette surépaisseur sera réalisée sur la face intérieure et/ou extérieure

III.1.A - Isolation répartie : remplacement total du remplissage

Dans le cas de dépose du torchis en raison de son mauvais état, il existe 2 techniques de mise en place d'un nouveau remplissage :

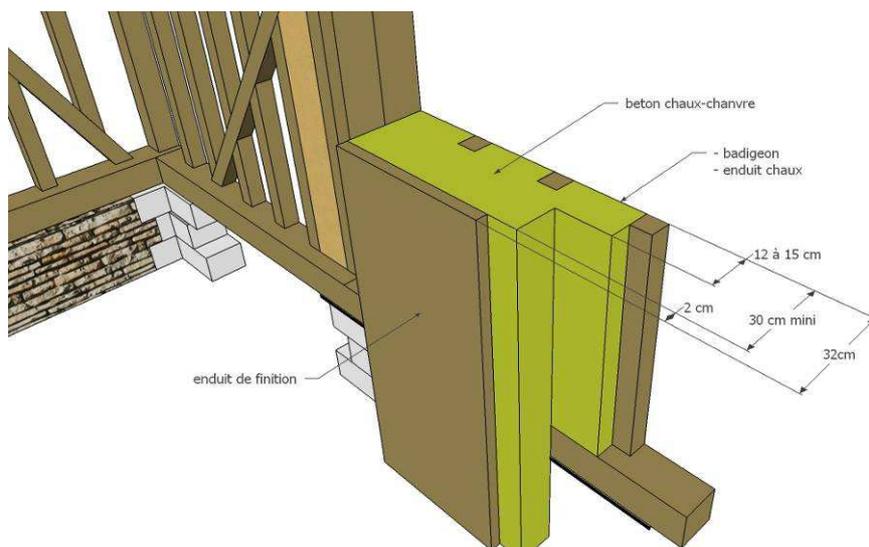
- La technique de banchage ?
- La technique de projection ;

Lors de la mise en place du nouveau remplissage, on réalise une isolation répartie en augmentant l'épaisseur du mur. On utilise un matériau identique sur toute l'épaisseur du mur (cela permet de limiter le risque de condensation par limitation du risque de changement de phase).

Attention au passage des fluides : il est nécessaire de poser tous les conduits de fluides avant coulage. On utilise comme matériau de remplissage un mortier léger isolant.

On voit sur ce schéma la continuité de l'isolant. Ici, la surépaisseur d'isolant est placée à l'intérieur.

En remplacement du



Isolation répartie d'un pan de bois

torchis, les matériaux utilisés sont des mortiers légers où des fibres sont mélangées au liant. Autrefois, le torchis était à base de terre et paille.

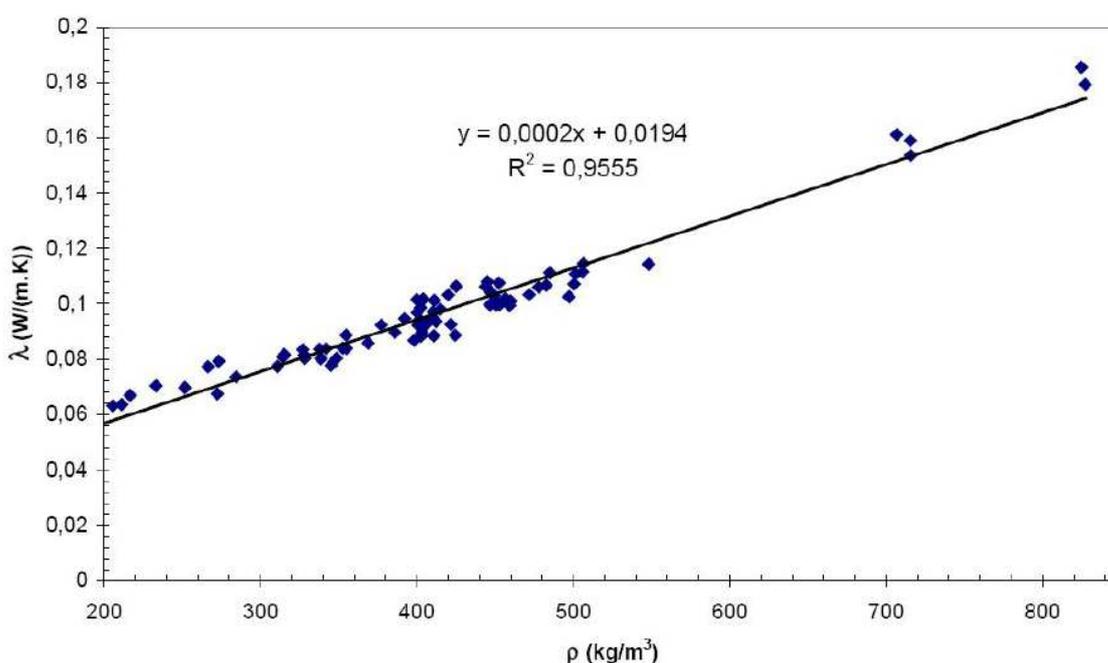
On peut cependant utiliser différentes sortes de liants et de fibres. Les liants sont la chaux, la terre. Les fibres sont la paille, le chanvre, le lin, le miscanthus. La terre est plus facile à travailler, elle est plus souple que la chaux.

III.1.B - Influence de la densité du mortier

Les liants utilisés et les caractéristiques des fibres (granulométrie, hygrométrie,...) influent directement sur les performances des mortiers de remplissage. Le pourcentage de fibres présentes dans le mortier aura une influence primordiale sur sa densité et sur sa conductivité thermique.

L'étude par « Cérézo 2008 » (voir diagramme) montre que la conductivité thermique évolue d'une manière quasi linéaire avec la masse volumique sèche du matériau. De plus, l'humidité influence aussi la conductivité thermique du mortier : la teneur en eau augmente la conductivité thermique et affaiblit son pouvoir isolant. La conductivité thermique du béton de chanvre est comprise entre 0,06 et 0,19 W/m.K pour des masses volumiques sèches variant de 200 à 840 kg/m³ (Cérézo 2005).

Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (μ) est compris entre 10 et 13.



La conductivité thermique du béton de chanvre sec en fonction de la masse volumique (Cérézo, 2008).

→ Un exemple : Le mortier chaux/chanvre

Le mortier léger en chaux/chanvre est présenté ici en particulier. En effet, ce béton léger au chanvre peut être utilisé avec une ossature noyée dans la maçonnerie ou laissant apparaître la structure bois sur une face. Ils conviennent particulièrement à la rénovation de maisons en colombages. Ils ont l'intérêt d'avoir une bonne perméabilité à la vapeur d'eau favorisant une très bonne stabilité hygrothermique des pièces de bois.

Dans la construction, le béton de chanvre est considéré comme un nouvel éco-matériau car il ne fait l'objet de recherches scientifiques que depuis une vingtaine d'années. D'une manière générale, le béton et le mortier de chanvre sont obtenus en mélangeant la chènevotte avec un liant à base de chaux et d'eau. La variation des proportions entre la chènevotte et le liant permettent d'obtenir des matériaux ayant différentes caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques, couvrant ainsi plusieurs domaines d'applications dans la construction : chapes d'égalisation sur plancher, dalles de béton léger, remplissage ou doublage d'ossature bois, murs banchés, blocs préfabriqués...

Actuellement, pour faciliter l'utilisation du béton de chanvre, quatre types de mélange sont définis en faisant principalement varier le dosage en liant. Leur dénomination reflète l'usage pour lequel ils sont le plus couramment utilisés, "Toit", "Sol", "Mur", "Enduit". Leur composition, et leur mise en œuvre ont fait l'objet d'un brevet déposé à l'INPI, elles bénéficient d'un contrat responsabilité civile et elles

répondent aux exigences des Règles Professionnelles d'Exécution d'Ouvrage en Béton de Chanvre qui impliquent la caractérisation du couple granulats de chanvre/liants.

Le mélange "Mur" est né d'un compromis entre la résistance mécanique et l'isolation thermique. Il a des densités apparentes d'environ 420 kg/m³.

Règles Professionnelles d'Exécution Béton de chanvre - données Murs :

- Densité sèche : 420 kg/m³
- Module d'élasticité à 28 jours : 20 MPa
- Résistance à la compression à 28 jours : 0,3 MPa
- Conductivité thermique : 0,10 W/m.K

III.1.C - Technique de banchage

Ici, un mortier léger est utilisé en remplissage de la paroi avec une ossature porteuse. N'étant pas porteur, le mortier est versé manuellement et compacté dans une structure porteuse en bois, par la technique dite du banchage.

Cette technique consiste à mettre des banches pour maintenir l'extérieur des parois et à couler à l'intérieur le mortier. Ces banches sont placées en limite intérieure ou extérieure de l'ossature ou alors elles englobent totalement l'ossature.

Avec ce procédé le matériau est peu compacté, généralement le mortier utilisé pour le mur possède une masse volumique apparente voisine de 420 kg /m³.

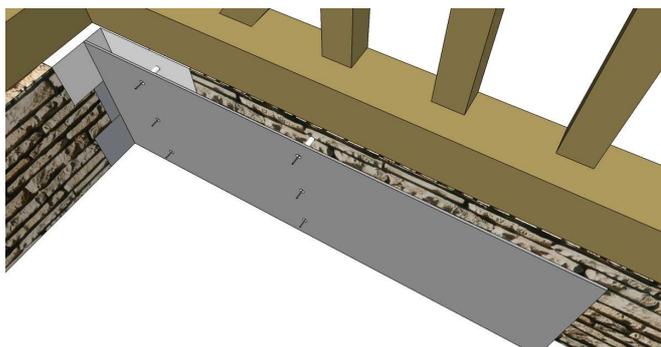


→ Ossature noyée dans la maçonnerie

- Fixer un premier rang de banches de chaque côté de l'ossature en laissant un espace suffisant entre les banches et les pièces de bois. (Hauteur de banche conseillée : 0,80 à 1,00 m)
- Verser le béton entre les banches par couches de 10 à 15 cm.
- Tasser chaque couche le long des banches et autour des pièces de bois.
- Il est possible de débancher 15 mn après la fin du remplissage, mais il est conseillé de remplir auparavant une partie du rang supérieur des banches.
- Ce pose la question de la tenue dans le temps des ossatures bois noyées dans la paroi en cours d'étude par Professions bois

→ Restauration du remplissage, préparation du mur

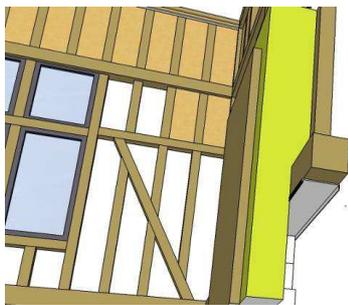
Avant d'isoler le mur, il faut s'assurer du bon état des bois et du remplissage. Si le remplissage peut être conservé, les défauts peuvent être comblés par un mélange de terre et de fibres. On peut aussi utiliser du béton de chaux et de fibres (ex : chaux/lin) : un conglomerat léger est nécessaire pour une bonne isolation avec une densité autour de 300kg/m³. Il est aussi possible de réutiliser l'ancien torchis en le retravaillant avec de la paille pour l'alléger. La mise en œuvre se fait de façon manuelle ou avec l'utilisation d'une machine à projeter.



Pose de banche au niveau du soubassement du pan de bois

→ Pan de bois apparent d'un côté

Le colombage reste apparent à l'extérieur comme à l'intérieur. On utilise, dans ces deux cas, la même technique de banchage soit en remplissage soit avec projection.



Colombage restant apparent à l'extérieur



Isolation faite avec du béton de chanvre

III.1.D - Technique de la projection

Cette technique consiste à mettre en place un mortier léger par projection grâce à une machine sur une banche. La photo ci contre montre un pré-mélange sec de la chaux et de la chènevotte. Il est réalisé à l'air dans un tuyau et l'eau pulvérisée est ajoutée juste avant la sortie du tuyau

En fonction de la distance de projection, on peut obtenir des bétons avec des masses volumiques et des caractéristiques mécaniques et thermiques différentes.

- Précautions de mise en œuvre : l'épaisseur mise en œuvre du mortier doit être adaptée à la capacité de charge de la structure, il peut être nécessaire de renforcer l'ossature bois ;
- Passage des fluides : tout rebouchage ne pouvant être dissimulé que par un enduit épais, il est nécessaire de poser tous les conduits de fluides avant coulage ;
- Temps de séchage : l'application par projection humide nécessite un certain temps de séchage à l'air libre qui dépend des conditions climatiques. Il y a lieu, avant de procéder à la mise en œuvre des parements intérieurs, de vérifier que le produit est suffisamment sec ;
- Performance et comportement hygrothermique dynamique du pan de bois avec une isolation répartie chaux/chanvre : caractéristique de la résistance R du mur $R=4,17$ à pans de bois avec remplacement du torchis par un mortier chaux/chanvre et surépaisseur intérieure (Mur fini : 41 cm).



Source www.chanvre-terre-chaux.com

III.2- ETUDE DE CAS

A travers l'étude théorique de différentes solutions d'isolation, il sera vérifié d'une part la valeur de la résistance thermique et d'autre part l'existence, ou non, d'un risque de condensation (point de rosée) et donc la faisabilité de la rénovation thermique.



PRESENTATION DE LA METHODE

→ Outil utilisé pour les études de cas : logiciel "Uparois"

Les études de cas ont été réalisées avec le logiciel Uparois. Ce logiciel permet d'étudier la condensation au sein d'une paroi. Il utilise la méthode de Glaser. Il calcule la quantité d'eau accumulée durant les mois d'hiver et calcule l'eau évaporée durant les mois d'été. Ce logiciel mentionne les valeurs λ , μ , ρ , C, il donne également la possibilité de changer ces valeurs ou d'entrer de nouveaux matériaux.

Cet un logiciel libre d'accès <http://www.uparoi.net>

→ Les paramètres utilisés

λ La conductivité (ou conductibilité) thermique caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Elle s'exprime par le coefficient λ (lambda). Plus λ est grand, plus le matériau est

conducteur, plus le λ est petit, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique des matériaux s'exprime en $[W/m \cdot K]$.

R La résistance thermique du matériau est égale à son épaisseur divisé par la conductivité et s'exprime $[m^2K/W]$.

μ ou Mu Grandeur sans unité, symbolisé μ , elle indique dans quelle mesure un matériau (pris sous son aspect « matière » : le béton, le bois...) s'oppose à la migration de la vapeur d'eau. Il est établi par convention que l'étalon pour exprimer la progression de la vapeur d'eau est l'air immobile ($\mu_{air} = 1$)

C Capacité thermique massique ou chaleur massique, c'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré centigrade ($^{\circ}C$) ou kelvin ($^{\circ}K$), un kilogramme de matériau donné. Symbolisée « C », elle s'exprime en $[J/kg \cdot K]$. Plus « C » est grand, plus le matériau, pour un poids donné, peut stocker de chaleur.

Sd épaisseur de lame d'air équivalente en mètre $Sd (m) = \mu \times e$ (épaisseur en m), cette valeur est une des caractéristiques des membranes d'étanchéité.

P La densité du matériau exprimée en kg/m^3

→ Données de départ

- Conditions intérieur : **20°C, 50% humidité**
- Conditions extérieur : **-7°C, 80% humidité**

→ Résultat de l'étude

- Calcul de la valeur **$U=1/R$**
- Etude "condensation en statique" ou étude de Glaser : le **graphique généré** montre que la température de condensation (courbe bleue) est la température à laquelle la vapeur d'eau condense pour former de l'eau liquide (changement de phase gazeuse à phase liquide). Si la température (courbe noire) est supérieure à cette température de condensation il n'apparaît pas d'eau liquide. Si les deux courbes viennent à se toucher, il se forme en ce point de la condensation. C'est le point de rosée. Le logiciel tient aussi compte de la possibilité de séchage au cours de la saison chaude.
- Le **déphasage** : le logiciel permet de calculer le déphasage généré par la paroi. Ces données n'ont pas été prises en compte dans les études de cas, car le déphasage doit s'apprécier au vue de l'ensemble des parois de la pièce. Cette information doit être prise en compte de manière globale notamment pour préserver le confort d'été. Dans le cas de l'isolation des combles, le déphasage apporté par les matériaux d'isolation doit être de nature à éviter les surchauffes en se rapprochant d'un déphasage de 12 heures.
- Il est préférable d'utiliser un logiciel de simulation thermique dynamique pour apprécier cette donnée.

→ Limite de la méthode de Glaser

Le modèle de calcul ne prend pas en compte :

- les propriétés hygroscopiques (matériaux qui permettent de stocker en leurs seins une certaine quantité d'humidité) des matériaux utilisés. Les propriétés hygroscopiques favorisent le transport par capillarité des éventuels condensats,
- la capacité d'inertie des matériaux, permettant un stockage de la chaleur et d'établir un équilibre thermique entre intérieur et extérieur.

La prise en compte de ces facteurs conduirait à d'une part minorer les risques liés au point de rosée et d'autre part améliorer la performance des parois à forte inertie.

La prise en compte de ces facteurs conduirait à d'une part minorer les risques liés au point de rosée et d'autre part améliorer la performance des parois à forte inertie.



ETUDE DE CAS N°1 : PAN DE BOIS AVEC UNE ISOLATION REPARTIE CHAUX CHANVRE

→ Caractéristiques techniques de la paroi avant isolation

Avant isolation, le pan de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}=0,66 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique de $U_{paroi}=1,5 \text{ W}/\text{Km}^2$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Mu
Ri			0,13	0,13	
BA13	0,013	0,25	0,05	0,18	7
Bois/torchis	0,15	0,34	0,44	0,62	10
Re			0,04	0,66	
Extérieur	0,163			0,66	

→ Caractéristiques techniques de la paroi après isolation

Isolation répartie avec remplacement du torchis et ajout de 15cm de béton de chanvre à l'intérieur et 10 à l'extérieur. Suppression du BA 13 et pose d'enduit intérieur et extérieur à la chaux. On obtient $R_{tot} = 4,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ et un $U_{paroi} = 0,24\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

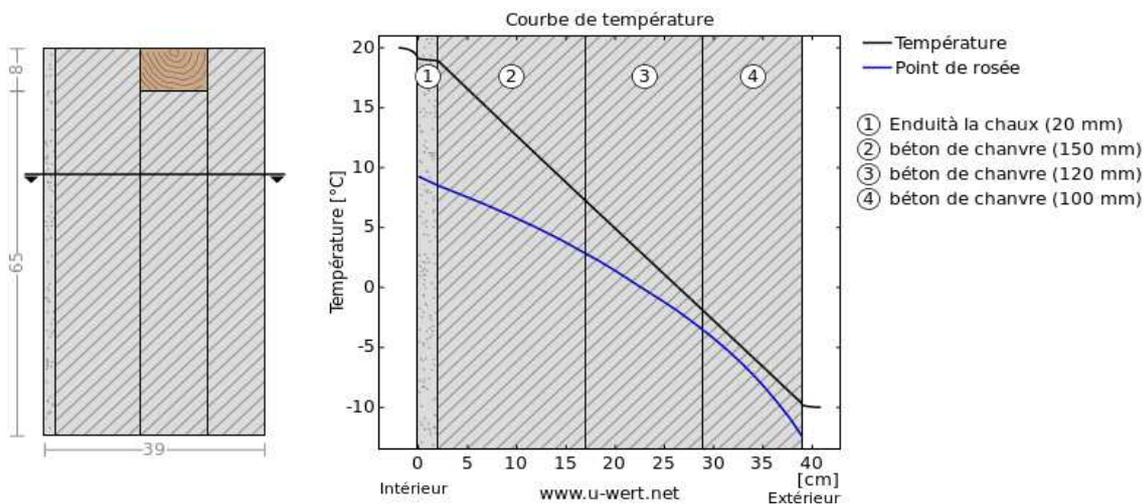
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,020	0,7	0,03	0,16	10
Bois/torchis	0,37	0,09	3,94	4,10	10
Enduit chaux	0,020	0,7	0,03	4,13	10
Re			0,04	4,17	
Extérieur	0,41			4,17	

La résistance globale du mur est $4,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ en tenant compte des résistances superficielles, des enduits et des ponts thermiques intégrés.

→ Etude des risques de condensation au sein du mur

Ce diagramme de Glaser étudie un mur avec une isolation répartie. Le remplissage est réalisé avec un mortier léger chaux/chanvre et un enduit extérieur à la chaux de 2cm. L'épaisseur finale du mur est de 38 cm.

Le diagramme de Glaser, ci-dessous, nous indique une absence de condensation interne dans la paroi, il n'y a pas nécessité de mettre en œuvre un frein vapeur.





ETUDE DE CAS N°2 : MUR EN PIERRE OU BRIQUE ISOLE PAR L'INTERIEUR ET L'EXTERIEUR

Cette configuration peut se retrouver dans le cas d'une maison ancienne qui a déjà été isolée par l'intérieur. Pour mettre à niveau l'isolation en intervenant par l'extérieur, est-il possible de ne pas toucher à l'isolation intérieure ?

→ Caractéristiques techniques de la paroi avant isolation

Le mur initial a une résistance thermique initiale de 2,22 m².K/W ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique de **U_{paroi} = 0,45 W/Km²**

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13		
Plaque de plâtre	0,013	0,14	0,09	0,22	10
Lame d'air non ventilée	0,02	0,12	0,17	0,39	7
Laine de verre	0,06	0,04	1,5	1,89	7
Mur pierre calcaire	0,40	1,4	0,29	2,18	
Lame d'air ventilée	0,03				
Re			0,04		
Extérieur				2,22	

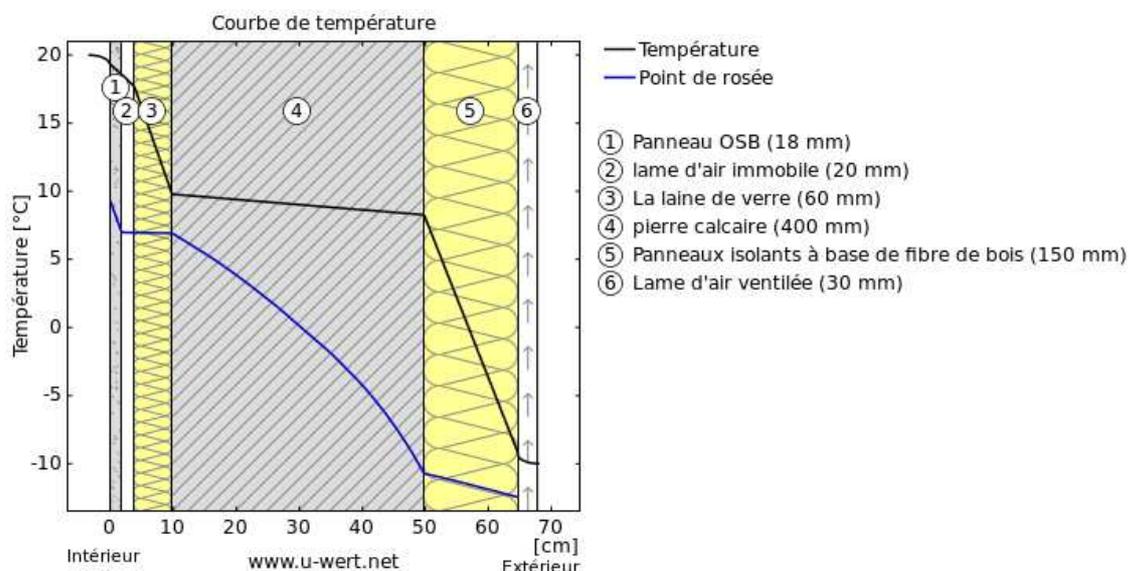
→ Caractéristiques techniques de la paroi après isolation complémentaire

Le complément d'isolation est réalisé par la pose d'une laine de bois à l'extérieur, la paroi est composée d'un mur maçonné en calcaire et isolé des 2 côtés. On obtient un **R total de 5,55 m².K/W** et un **U paroi = 0,18W/Km²**

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13		
Plaque de plâtre	0,013	0,14	0,09	0,22	10
Lame d'air non ventilée	0,02	0,12	0,17	0,39	7
Laine de verre	0,06	0,04	1,5	1,89	7
Mur pierre calcaire	0,40	1,4	0,29	2,18	40
Isolant laine de bois	0,15	0,045	3,33	5,51	10
Lame d'air ventilée	0,03				
Re			0,04		
Extérieur				5,55	

Pour le calcul nous n'avons pas disposé de frein vapeur devant la laine de verre. Il faut par défaut choisir cette option, car on ne peut savoir si à l'époque des travaux un frein vapeur a été correctement posé et ne s'est pas détérioré dans le temps.

Dans ce cas il apparaît qu'il n'y a pas de risque de condensation, mais il faut faire très attention chaque paroi est unique. Si nous avons choisi une épaisseur de laine de verre de 10 cm il y aurait eu condensation et risque de dégradation de l'isolant.



III.3- TRAITEMENT DES POINTS SINGULIERS

Dans le cadre d'une isolation répartie d'une structure pan de bois quelques points spécifiques sont à prendre en considération.

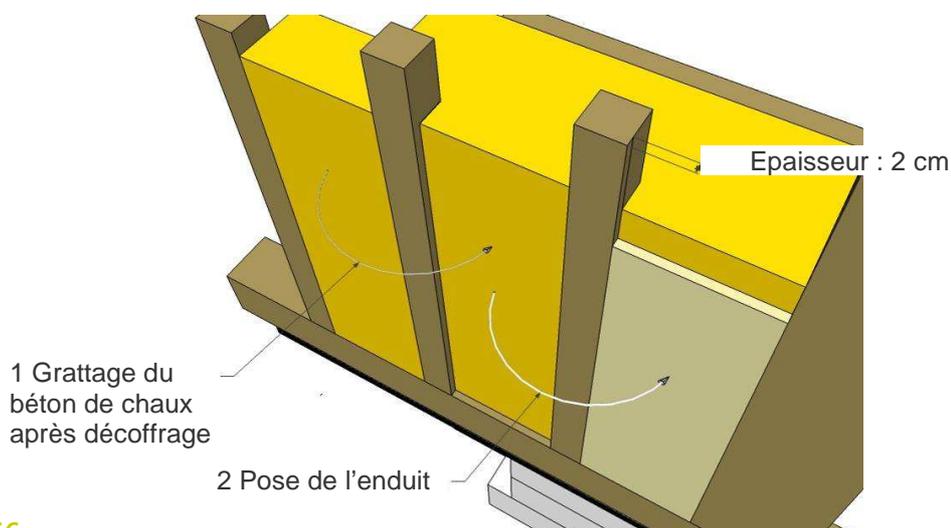
III.3.A - Enduits intérieur/extérieur du pan de bois

Attention, le mortier léger est sensible à l'humidité et n'est pas étanche à l'air. De plus, il est friable, il a donc besoin impérativement d'être protégé à l'intérieur et à l'extérieur.

L'enduit doit activer la fonction capillaire du mur. Les matériaux recommandés sont à base de chaux ou de terre. Attention aux mélanges qui contiennent du ciment. Ils limitent les propriétés capillaires de l'enduit. Les chaux NHL-Z sont hydrofuges et sont à éviter dans le bâti ancien, elles rendent les murs imperméables et bloquent de ce fait la migration de l'eau au sein du mur. L'enduit doit être parfaitement adhérent avec le mur.

- Extérieur: application d'un enduit chaux grasse (DTU 26.1 ou les règles professionnelles enduit sur support terre).
- Intérieur: application d'un enduit chaux grasse, d'un badigeon ou d'une eau forte suivant l'effet recherché et la qualité de surface.

Suivant les traditions régionales, l'enduit arrive au nu des bois ou en surépaisseur. Lorsque l'enduit doit venir à fleur (au nu) des bois, il conviendra de laisser une réservation de 2 cm pour l'enduit. Sinon, il faut venir au nu des bois avec le remplissage lorsque l'enduit doit être appliqué en surépaisseur.



Les enduits sont faits à la truelle et non parfaitement dressés. Ces enduits sont réalisés avec 2 couches successives. Les bois extérieurs restent sans vernis, ni lasures incolores.

III.3.B - Traitement des pieds du mur

Les soubassements des constructions à pans de bois sont en pierre. Il faudra les traiter de façon particulière. Ils seront, comme le pan de bois, isolés par l'intérieur ou par l'extérieur. Ce pied de mur en pierre permet de protéger le torchis des remontées capillaires éventuelles. Il faudra donc veiller à ce que l'humidité qui pourrait être présente en pied de mur puisse être évacuée par ventilation directe et en choisissant des matériaux perspirants et capillaires.

III.4- EN CONCLUSION

III.4.A - Il y a une isolation répartie dans les cas suivants :

- remplacement du remplissage et mise en place de mortier léger, on obtient une isolation répartie, continue sur toute l'épaisseur de la paroi. Il n'est pas nécessaire de mettre un frein vapeur. Les mortiers légers permettent de réguler au mieux l'humidité au sein de la paroi. C'est à dire qu'ils ont le pouvoir de tamponner une partie de l'humidité ambiante pour la restituer quand l'air est plus sec. Cet effet mèche permet au mur de s'assécher durant l'été et le protège contre les excès d'humidité.
- préexistence d'un isolant intérieur l'isolation complémentaire par l'extérieur peut être une solution, il faut cependant faire attention à l'état initial de l'isolant et du mur (pas de point de condensation).

Si l'état initial du mur isolé à l'origine ne présente pas de pathologie, on peut supposer que la première isolation a été réalisée dans les règles de l'art (pas de risque de condensation ou pare-vapeur présent) dans ce cas un ajout d'isolation par l'extérieur ne nuira pas à la paroi sous réserve que l'isolant utilisé à l'extérieur du mur est une forte perméabilité à la vapeur d'eau.

Si au contraire des pathologies sont apparentes, il est impératif d'enlever l'isolant intérieur et de reprendre complètement l'isolation du mur (soit en intérieur soit en extérieur).

IV - ISOLATION PAR L'INTERIEUR

Deux types d'interventions sont envisageables :

- Une isolation en prolongement du mur existant, dans ce cas l'isolant est plaqué ou collé au mur. Cette technique (en fonction du choix de l'isolant) permet d'assurer une continuité capillaire en laissant diffuser la vapeur d'eau. Cela permet également de bénéficier de l'inertie de la paroi. Cependant il faudra vérifier que la paroi ne présente pas de risque de condensation.
- Une isolation désolidarisée du mur comportant une lame d'air ventilée entre le mur et le complexe isolant (caisson de bois avec isolant, panneaux...). Dans la suite de l'étude cette option n'est pas traitée car la technique est identique à celle mise en œuvre dans les constructions « basse consommation ». Dans ce cas l'inertie du mur n'est pas valorisée.

Les études de cas qui vont suivre mettent en évidence les risques de condensation liés à l'isolation par l'intérieur. Dans la plupart des cas l'étude montre qu'il est nécessaire de prévoir la pose d'un pare vapeur qui assure également l'étanchéité à l'air.

IV.1.A - Isolation avec des panneaux souples

Les panneaux souples ou en rouleaux sont faciles à mettre en œuvre et bien adaptés à la rénovation : ils s'intercalent entre des éléments d'ossature et se fixent avec quelques agrafes.

Il existe divers isolants : les panneaux flexibles en fibres de bois, les panneaux ou rouleaux de cellulose, de laine de chanvre ou de lin, de mélange chanvre et coton. La structure cellulaire des fibres végétales leur permet de mieux réguler l'humidité au sein d'un bâtiment. C'est à dire qu'elles ont le pouvoir de tamponner une partie de l'humidité ambiante pour la restituer quand l'air est plus sec. L'équilibre hygrométrique va ainsi protéger le mur sensible à l'humidité et maintenir le caractère perspirant des



Crédit photo Antoine Bosse-Platière

parois. L'isolation en panneaux ou en rouleaux rapportés par l'intérieur impose la réalisation d'une enveloppe frein vapeur continue et sans défaut (vérifier la compatibilité avec la paroi existante).

→ Technique de mise en œuvre

1 Mise en place de l'armature

L'épaisseur des montants et traverses (bois ou métallique) est fonction de l'épaisseur d'isolant à installer. Pour les rouleaux, les professionnels conseillent de réduire un peu l'espacement entre les tasseaux (par exemple 55 cm pour des rouleaux de 60 cm) afin de les comprimer pour mieux les maintenir en place et pour qu'ils plaquent bien sur les côtés. Pour les panneaux semi-rigides, une réduction d'1 ou 2 cm sera suffisante.

Les tasseaux ou lambourdes de bois sont fixés directement sur la paroi à isoler. On privilégie les montants d'ossatures en bois pour minimiser les ponts thermiques intégrés.

2 Pose et fixation de l'isolant.

Les panneaux semi-rigides sont simplement posés entre les tasseaux ou rails. Les isolants en rouleaux doivent être agrafés par endroits contre les tasseaux pour éviter tout affaissement

L'ensemble des gaines et tuyauteries doivent être posées dans un espace réservé à cet effet soit dans un vide laissé entre le mur et l'isolant (cette solution n'est pas optimum car elle nécessite le percement du frein vapeur) soit dans un vide laissé entre l'isolant et le parement intérieur.

3 Étanchéité à l'air et pose du frein vapeur

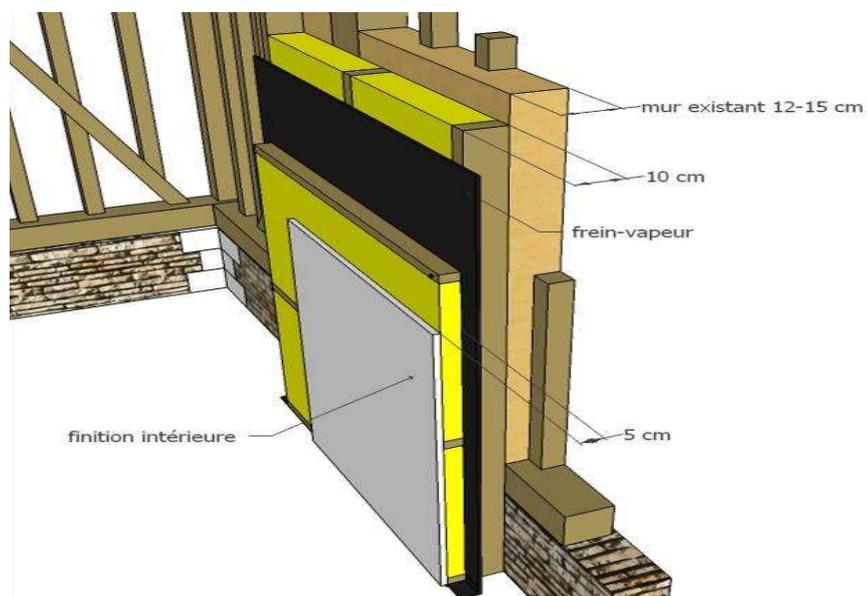
L'isolation en panneaux ou en rouleaux rapportée par l'intérieur en raison de leur forte perméabilité à la vapeur d'eau, impose la mise en place d'un frein vapeur.

Ce frein vapeur va assurer l'étanchéité à l'air de la paroi et protéger le mur d'un risque de condensation interne (attention cette membrane ne doit pas être perforée).

4 Nouvelle couche d'isolant.

Pour une isolation optimale, après le frein vapeur, on pose une nouvelle couche d'isolant de plus faible épaisseur. Elle sert aussi à protéger le frein vapeur d'éventuelle perforation et à supprimer les ponts thermiques causés par les montants en bois. Cette double couche est posée en position croisée par rapport à la première.

Pour assurer la continuité capillaire, il faut que l'isolant épouse au plus près la surface du mur. Pour assurer cette continuité et redresser les différences de niveaux du mur, on utilise par exemple un gobetis à base de chaux (couche d'accroche chaux /sable).



→ Exemple d'un panneau souple : propriétés technique du panneau Chanvre / lin

- **Conditionnement** : panneaux et rouleaux
- **Composition** : 44 % de fibres de chanvre, 44 % de fibres de lin, 12% de liant polyester
- **Densité** = 30 kg/m³ (EN 1602)
- **Conductivité thermique** = 0,041 W/m.K (EN 12667) non certifié
- **Résistance à la diffusion de la vapeur μ** : 1 à 2 (EN 12086)

La structure cellulaire des fibres végétales de chanvre et de lin permet de mieux réguler l'humidité au sein d'un bâtiment. Elles ont le pouvoir de tamponner une partie de l'humidité ambiante pour la restituer quand l'air est plus sec. L'équilibre hygrométrique est maintenu et maintient les parois perspirantes.



- **Capacité thermique Cp** = 1800 J/kg.K.

L'isolant chanvre/lin possède une bonne inertie thermique dont voici les valeurs (exprimées en heures de déphasage pour une densité=30kg/m³) :

- **Réaction au feu** : non testé
- Certificat ACERMI N°11/130/696 Licence n°11/130 /696 Accréditation n°5-0019 (www.cofrac.fr)

IV.1.B - Insufflation d'isolants en vrac

La mise en œuvre des isolants en vrac se fait par insufflation dans un vide existant ou dans des caissons. Ces caissons ou espaces doivent être bien hermétiques et remplis avec une densité suffisante pour éviter tout tassement ultérieur (60 kg au m³ pour la cellulose). La mise en œuvre des isolants en vrac par insufflation se fait à l'aide d'une machine pneumatique.

→ Exemple d'isolation en vrac propriétés technique de la ouate de cellulose

La ouate de cellulose est un isolant à base de fibres de cellulose obtenues à partir de papiers de journaux généralement recyclés et broyés. Le produit est traité avec des adjuvants ignifuges et antifongiques (Acide borique, Hydroxyde d'aluminium,...).

- **Masse volumique du produit mis en œuvre** : Insufflation de 50 à 65 kg/m³ en fonction de l'épaisseur.
- **Conductivité thermique**: 0,043 W/(m.K)
- **Épaisseur du produit mis en œuvre** : 5 cm à 40 cm.
- Produit hydrophile
- **EUROCLASSE** : C-s2, d0 (Classement au feu selon essais pour une masse volumique de 65 kg/m³ et une épaisseur de 180mm).
- **Comportement fongique** (NF EN ISO 846) : inerte

→ Mise en œuvre des caissons

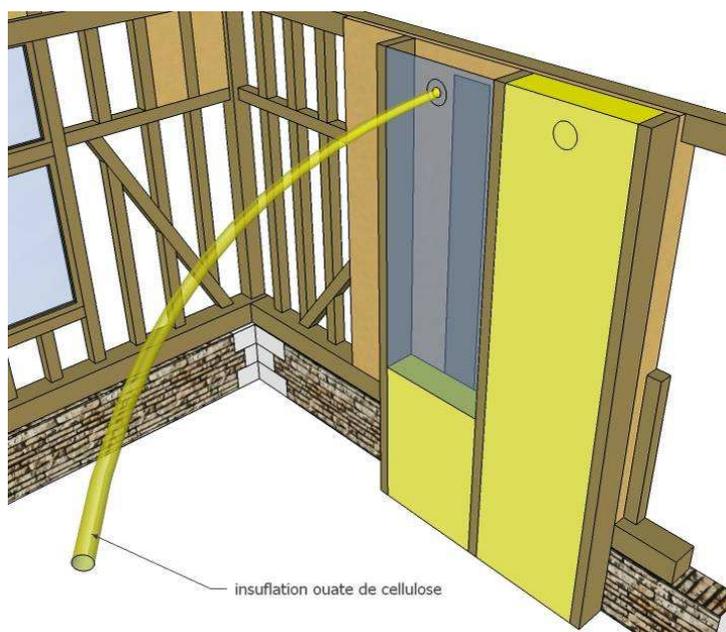
Les caissons doivent avoir une épaisseur minimale de 5 cm, maximale de 40 cm. La hauteur maximale est de 3,5 mètres. Les entraxes entre montants verticaux sont inférieurs à 60 cm. Leur forme doit se rapprocher le plus possible d'un parallélogramme rectangle

Il est recommandé d'éviter la multiplicité des caissons, source de ponts thermiques. Les caissons ne communiquent pas entre eux et sont étanches.

La ouate de cellulose doit être protégée de manière sûre et durable contre l'humidité. Les parois intérieures et extérieures sont exemptes de traces d'humidité résultant d'infiltrations ou de remontées capillaires et, dans le cas contraire, il a été porté remède par traitement adapté. Dans tous les cas, la paroi extérieure doit être étanche à l'eau liquide.

Toute conduite d'eau à l'intérieur de la couche isolante doit être protégée par un fourreau. Il en est de même pour toute traversée de ventilation. Il n'est pas permis d'installer dans l'épaisseur de l'isolation à réaliser tout matériel électrique non protégé susceptible de créer une source de chaleur continue (spots, transformateurs), norme NFC 15-100. Le cas échéant, des boîtiers ignifugés sont à créer conformément aux exigences induites par les caractéristiques des appareils.

Tous les éléments encastrés dans le caisson tels que ceux constituant par exemple l'installation électrique doivent être obturés de façon étanche pour que l'isolant n'y pénètre pas. Le traitement des cheminées et conduits de feu devra être conforme à la Norme NF DTU 24.2 qui prévoit une protection de sécurité incendie qui dépend de la nature et du type du conduit de fumée ainsi que de sa classe en température. Les espaces (volets roulants, baies, etc...) qui pourraient être en communication avec les caissons à traiter doivent être correctement clos avant la mise en œuvre de l'isolant.



IV.1.C - Panneaux rigides

Lors de la pose de panneaux rigides, il est primordial d'assurer une parfaite continuité entre l'isolant et le mur afin d'éviter toute rupture de capillarité de la paroi. Pour compenser les différences de niveaux, on rétablit la planéité avec un gobetis à la chaux.

Les isolants plus rigides (panneaux de fibre de bois, paille cartonnée, blocs de chanvre...) n'ont pas besoin d'être installés entre des montants d'ossature. Ils sont maintenus au mur par chevillage ou collage. Pour rendre les panneaux bien jointifs, on les colle avec du mortier adhésif. Ce mortier à base de chaux fait effet de mèche et assure la continuité capillaire.

IV.1.D - Isolation par mortier léger

L'utilisation d'un mortier léger à base de chaux sur les murs pierre ou autre technique constructive a l'avantage d'avoir une très bonne capillarité et d'assainir le mur. C'est une technique qui permet de concilier isolation et inertie, avec une continuité de nature de matériaux.

Le mélange chaux-chanvre n'est pas étanche à l'air et il est poudreux. Il a besoin d'être enduit sur 2 couches. Présentation de la technique dans la partie terre. Attention au type de chaux et aux épaisseurs d'isolants. Cette technique évite également l'utilisation de membrane pare vapeur.

IV.2- ETUDE DE CAS

A travers l'étude théorique de différentes solutions d'isolation, il sera vérifié d'une part la valeur de la résistance thermique et d'autre part l'existence, ou non, d'un risque de condensation (point de rosée) et donc la faisabilité de la rénovation thermique.



PRESENTATION DE LA METHODE

→ Outil utilisé pour les études de cas : logiciel "Uparois"

Les études de cas ont été réalisées avec le logiciel *Uparois*. Ce logiciel permet d'étudier la condensation au sein d'une paroi. Il utilise la méthode de Glaser. Il calcule la quantité d'eau accumulée durant les mois d'hiver et calcule l'eau évaporée durant les mois d'été. Ce logiciel

mentionne les valeurs λ , μ , ρ , C , il donne également la possibilité de changer ces valeurs ou d'entrer de nouveaux matériaux. Ce logiciel est en libre accès sur <http://www.uparoi.net>

→ Les paramètres utilisés

λ La conductivité (ou conductibilité) thermique caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Elle s'exprime par le coefficient λ (lambda). Plus λ est grand, plus le matériau est conducteur, plus le λ est petit, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique des matériaux s'exprime en $[W/m \cdot K]$.

R La résistance thermique du matériau est égale à son épaisseur divisé par la conductivité et s'exprime $[m^2K/W]$.

μ ou Mu Grandeur sans unité, symbolisé μ , elle indique dans quelle mesure un matériau (pris sous son aspect « matière » : le béton, le bois...) s'oppose à la migration de la vapeur d'eau. Il est établi par convention que l'étalon pour exprimer la progression de la vapeur d'eau est l'air immobile ($\mu_{air} = 1$)

C Capacité thermique massique ou chaleur massique, c'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré centigrade ($^{\circ}C$) ou kelvin ($^{\circ}K$), un kilogramme de matériau donné. Symbolisée « C », elle s'exprime en $[J/kg \cdot K]$. Plus « C » est grand, plus le matériau, pour un poids donné, peut stocker de chaleur.

Sd épaisseur de lame d'air équivalente en mètre $Sd (m) = \mu \times e$ (épaisseur en m), cette valeur est une des caractéristiques des membranes d'étanchéité.

P La densité du matériau exprimée en kg/m^3

→ Données de départ

- Conditions intérieur : **20°C, 50% humidité**
- Conditions extérieur : **-7°C, 80% humidité**

→ Résultat de l'étude

- Calcul de la valeur **$U=1/R$**
- Etude "condensation en statique" ou étude de Glaser : le **graphique généré** montre que la température de condensation (courbe bleue) est la température à laquelle la vapeur d'eau condense pour former de l'eau liquide (changement de phase gazeuse à phase liquide). Si la température (courbe noire) est supérieure à cette température de condensation il n'apparaît pas d'eau liquide. Si les deux courbes viennent à se toucher, il se forme en ce point de la condensation. C'est le point de rosée. Le logiciel tient aussi compte de la possibilité de séchage au cours de la saison chaude.
- Le **déphasage** : le logiciel permet de calculer le déphasage généré par la paroi. Ces données n'ont pas été prises en compte dans les études de cas, car le déphasage doit s'apprécier au vue de l'ensemble des parois de la pièce. Cette information doit être prise en compte de manière globale notamment pour préserver le confort d'été. Dans le cas de l'isolation des combles, le déphasage apporté par les matériaux d'isolation doit être de nature à éviter les surchauffes en se rapprochant d'un déphasage de 12 heures.
- Il est préférable d'utiliser un logiciel de simulation thermique dynamique pour apprécier cette donnée.

→ Limite de la méthode de Glaser

Le modèle de calcul ne prend pas en compte :

- les propriétés hygroscopiques (matériaux qui permettent de stocker en leurs seins une certaine quantité d'humidité) des matériaux utilisés. Les propriétés hygroscopiques favorisent le transport par capillarité des éventuels condensats,
- la capacité d'inertie des matériaux, permettant un stockage de la chaleur et d'établir un équilibre thermique entre intérieur et extérieur.

La prise en compte de ces facteurs conduirait à d'une part minorer les risques liés au point de rosée et d'autre part améliorer la performance des parois à forte inertie.

La prise en compte de ces facteurs conduirait à d'une part minorer les risques liés au point de rosée et d'autre part améliorer la performance des parois à forte inertie.



ETUDE DE CAS N°1 : PANS DE BOIS ISOLE PAR L'INTERIEUR AVEC DES PANNEAUX SOUPLES

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Avant isolation, le mur à pans de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}=0,66 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission surfacique $U_{paroi}=1,5 \text{ W/Km}^2$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
Ri			0,13	0,13
BA13	0,013	0,25	0,05	0,18
Bois/torchis	0,15	0,34	0,44	0,62
Re			0,04	0,66
Extérieur	0,163			0,66

→ Caractéristiques de la paroi après isolation

Conservation du mur existant, dépôt du BA 13, isolation intérieure croisée avec des panneaux souples de lin/chanvre. 1ère couche d'isolant de 10cm, un frein vapeur puis une 2ème couche de 4,5cm. Epaisseur du mur fini : 33,5cm.

Après isolation, le mur à pans de bois a une résistance thermique totale $R_{tot}=4,02 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission surfacique $U_{paroi}=0,24 \text{ W/Km}^2$. Si on intègre les ponts thermiques avec 15% de perte. Les résultats sont minorés. On obtient alors $R_{tot}=3,8 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ et $U_{paroi}=0,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13		
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Panneau lin/chanvre	0,045	0,045	1	1,15	2
Frein vapeur Sd =5	0,0005	0,22	0,00	1,15	10000
Panneau lin/chanvre	0,1	0,045	2,44	3,59	10
Bois/torchis	0,15	0,4	0,375	3,965	6
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	3,985	10
Re			0,04	4,02	
Extérieur					

→ Etude de la diffusion de la vapeur d'eau

Le diagramme de Glaser, page suivante, est réalisé pour une isolation croisée par l'intérieur avec des panneaux souples de lin/chanvre. L'épaisseur finale du mur est de 33,5. La composition du mur, en partant de l'intérieur, est la suivante : 1ère couche d'isolant 4,5 cm, frein vapeur, 10 cm d'isolant lin/chanvre, mur à pans de bois.

Le diagramme, page suivante, nous indique une absence de condensation interne dans la paroi (avec un frein-vapeur ayant un $S_d=5\text{m}$). Il est nécessaire de mettre un pare-vapeur si on ne veut pas de condensation dans le mur. L'humidité relative moyenne des panneaux isolants n'excède pas 70%, ce qui leur permet de conserver une bonne stabilité dans le temps.



ETUDE DE CAS N°2 : MUR EN BRIQUE AVEC ISOLATION PAR L'INTERIEUR EN OUATE DE CELLULOSE

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, le mur en brique a une résistance thermique $R = 0,65 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,54 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
BA 13	0,013	0,25	0,05	0,18	7
Brique	0,4	1	0,40	0,58	10
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,61	10
Re			0,04	0,65	
Extérieur					

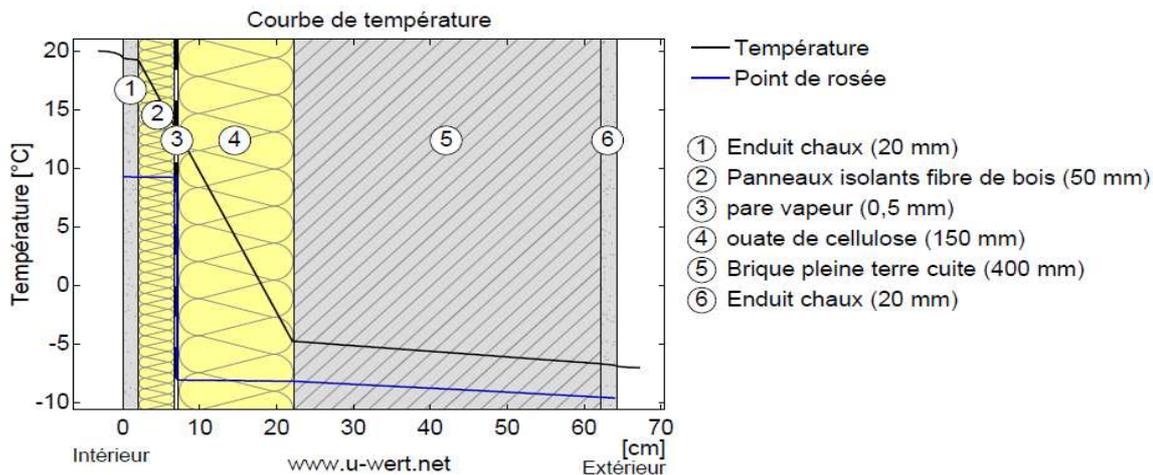
→ Caractéristiques de la paroi après isolation

L'isolation par l'intérieur est constituée de 15 cm de ouate de cellulose, d'un pare vapeur et de 5 cm de panneau en fibre de bois. Après isolation, le mur en brique a une résistance thermique $R = 5,64 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,04		10
Panneau bois	0,05	0,04	1,25		5
Pare vapeur Sd=100	0,0005	2,3	0,00		200000
Ouate	0,15	0,04	3,75		3
Brique	0,4	1	0,40		10
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03		10
Re			0,04		
Extérieur				5,64	

→ Étude des risques de condensation

Le diagramme, nous montre qu'il est indispensable de mettre un pare vapeur pour éviter les risques de condensation dans le mur. Il faudra veiller dans cette solution à bien poser le pare vapeur et informer les habitants du risque lié à sa perforation.





ETUDE DE CAS N°3 : MUR EN PIERRE CALCAIRE ISOLE PAR L'INTERIEUR AVEC DES PANNEAUX EN FIBRES DE BOIS.

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, le mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 0,58 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
BA 13	0,013	0,25	0,05	0,18	7
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29	0,46	45
Enduit chaux	0,05	0,7	0,07	0,53	10
Re			0,04	0,58	
Extérieur				0,58	

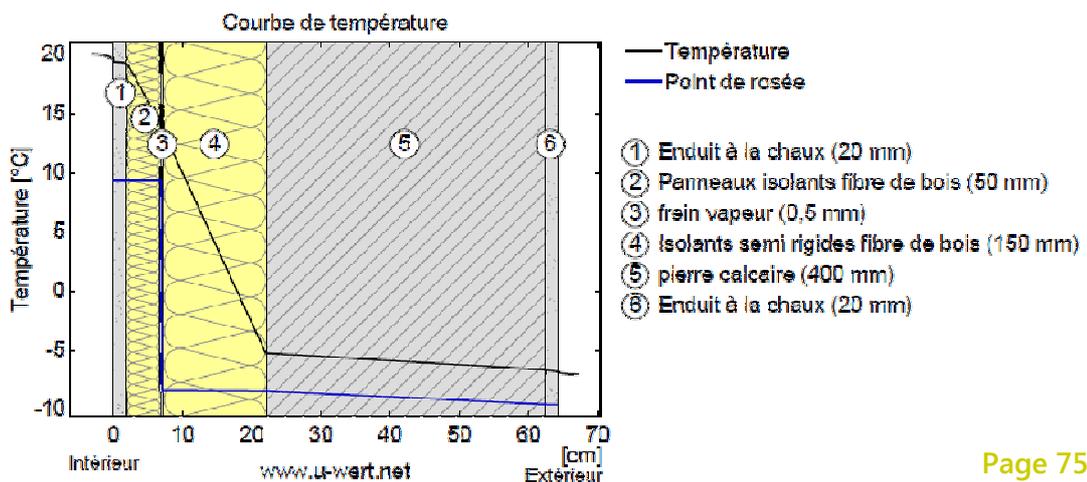
→ Caractéristiques de la paroi après isolation

L'isolation par l'intérieur est constituée de panneaux souples en fibres de bois, d'un pare vapeur et d'une deuxième couche d'isolant en fibre de bois. Après isolation, le mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 5,51 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03		
Fibre bois	0,05	0,04	1,25		1
Pare vapeur	0,0005	2,3	0,00		1E+06
fFibre bois	0,15	0,04	3,75		1
Calcaire tendre	0,4	1,4	0,29		40
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03		10
Re			0,04	5,51	
Extérieur				5,51	-7

→ Etude des risques de condensation

Le diagramme nous montre qu'il est indispensable de mettre une membrane frein vapeur pour éviter les risques de condensation dans le mur. Il est important de noter que cette étude tient compte de l'évaporation possible du mur pendant l'été, lorsque le flux de vapeur s'inverse. Par contre ce logiciel ne tient pas compte des propriétés hygroscopiques des matériaux qui permettent aussi un assèchement.





ETUDE DE CAS N°4 : MUR EN GRANIT ISOLE PAR L'INTERIEUR AVEC PANNEAUX EN FIBRES DE BOIS

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, le mur en granit a une résistance thermique $R = 0,39 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Granit	0,4	2,5	0,16	0,31	10000
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,34	10
Re			0,04	0,39	
Extérieur				0,39	

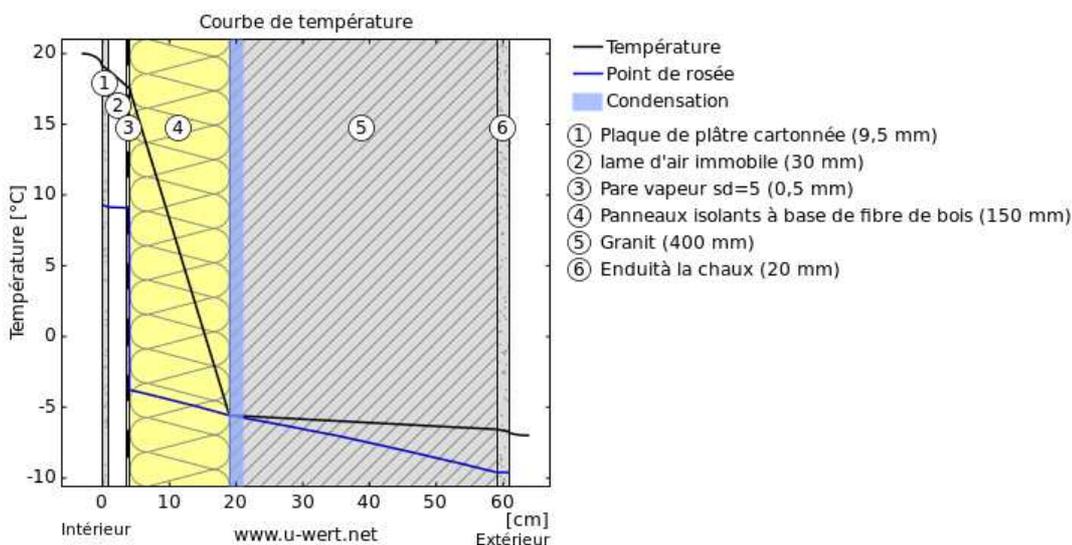
→ Caractéristiques de la paroi après isolation

L'isolation par l'intérieur est constituée de 15 cm de panneaux en fibres de bois, d'un pare vapeur. Après isolation, le mur en granite a une résistance thermique $R = 1.64 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	mu
Ri			0,13	0,13	
Plaque de plâtre	0,01	0,21	0,05		10
Lame d'air	0,03	0,17	0,18		1
Frein vapeur		0,22	0		2E+06
Laine de bois rigide	0,15	0,05	3,3		5
Granit	0,4	2,5	0,16		10000
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03		10
Re			0,04		
Extérieur				3,9	

→ Etude des risques de condensation

Le diagramme, nous montre que même avec un pare vapeur et 15 centimètres d'isolant, il y a un phénomène de condensation dans le mur.



L'isolation par l'intérieur des murs en granite est problématique en raison de la très forte étanchéité à la vapeur d'eau du granite. Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau du granite est : $\mu = 10000$. La réalité est beaucoup plus nuancée car les blocs de granite sont assemblés avec des joints. Ces joints sont beaucoup moins étanches à l'eau que les pierres, ils sont au contraire très capillaires et perméables à la vapeur d'eau.

On ne peut donc pas assimiler le mur à une paroi totalement étanche. Jusqu'à maintenant, aucun logiciel ne tient compte de la complexité des parois en granite et en pierres étanches à la vapeur d'eau, il faudra donc ajuster le μ en fonction de la paroi.



ETUDE DE CAS N°5 : MUR EN GRANIT ISOLE PAR L'INTERIEUR AVEC PANNEAUX DE LAINE DE ROCHE

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, le mur en granit a une résistance thermique $R = 0,39 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

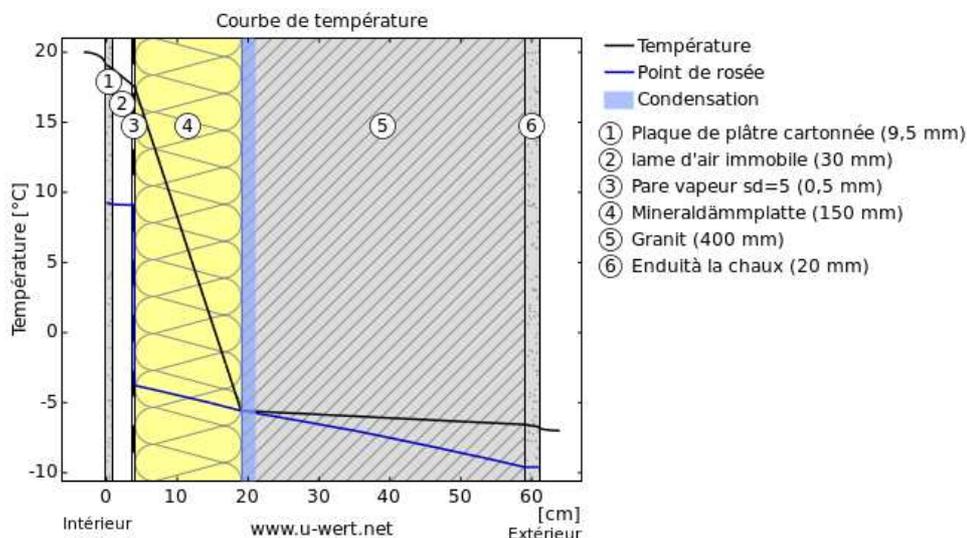
Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,15	10
Granit	0,4	2,5	0,16	0,31	10000
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,34	10
Re			0,04	0,39	
Extérieur				0,39	

→ Après isolation par l'intérieur avec une laine de roche de roche de 15cm

Après isolation, le mur en granit a une résistance thermique $R = 4,34 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
Plaque de plâtre	0,01	0,21	0,05		10
Lame d'air	0,03	0,17	0,18		1
Frein vapeur		0,22	0		2E+06
Laine de Roche	0,15	0,04	3,75		5
Granit	0,4	2,5	0,16		10000
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03		10
Re			0,04		
Extérieur				4,34	

En isolant avec de la laine de roche, nous observons le même risque de condensation qu'en utilisant de la laine de bois. Les pathologies générées par cette condensation risquent d'être plus importantes dans le cas de matériaux non hygroscopique (matériaux qui peut stoker de l'eau sous forme liquide).



Dans cette configuration il peut être intéressant d'étudier la faisabilité d'une isolation désolidarisée du mur, en laissant une lame d'air ventilée.

Cette technique évite la détérioration de l'isolant en cas de condensation, mais ne permet pas de bénéficier de l'isolation apportée par le mur. C'est une technique particulièrement adaptée en cas d'utilisation de laine minérale. Dans un principe similaire, il est possible de réaliser une ossature bois pour créer une isolation intérieure en laissant une lame d'air ventilée entre le mur et l'ossature.

→ Membranes pare vapeur

Un pare-vapeur est une feuille ou membrane plus ou moins étanche à la vapeur d'eau qui a pour rôle d'empêcher le cheminement et la stagnation de vapeur d'eau dans les parois. Il est donc disposé vers l'intérieur, côté chauffé.

Les pare-vapeur sont caractérisés par leur aptitude à résister à la diffusion de vapeur d'eau. Le coefficient S_d (exprimé en mètres), représente la résistance d'un pare-vapeur par rapport à celle qui correspondrait à une épaisseur équivalente d'une couche d'air :

- plus la valeur S_d est élevée, moins le produit laisse passer de vapeur d'eau,
- plus la valeur S_d est faible, plus le produit laisse passer de vapeur d'eau. Il est alors perméable à sa diffusion.

On parle de **pare-vapeur** lorsque la membrane bloque la quasi totalité du flux de vapeur à travers la paroi, $S_d > 10m$ et de **frein-vapeur** lorsque la membrane ne bloque que partiellement le flux de vapeur et à un $S_d < 10$.

Certains frein-vapeur sont hygrovariables : le μ de cette membrane varie avec l'humidité relative. Plus l'humidité relative est élevée plus la résistance à la diffusion est faible. L'intérêt d'une telle membrane est qu'elle permet le séchage de la paroi en cas de flux inversé (par exemple en été).

La pose d'une membrane nécessite de :

- Veiller à bien obturer les joints entre les panneaux. Les lés du frein vapeur sont jointoyés entre eux et sont raccordés aux éléments de construction et aux huisseries moyennant colle et adhésifs adaptés.
- Réaliser une fermeture étanche à l'air intérieur, à la périphérie des panneaux (plancher, plafond, fenêtre), éventuellement par la pose d'un joint souple;
- Ne pas encastrier des conduites ou des canalisations électriques qui percent le pare-vapeur. L'installation électrique peut être réalisée en pose apparente ou bien dissimulée derrière une double finition. Le frein vapeur peut être installé entre les deux couches d'isolant afin de le protéger de dégradation ultérieure (perçement, déchirement)
- Informer les occupants de la nécessité de ne pas endommager le pare-vapeur

Une parfaite maîtrise de la mise en œuvre entre les éléments constructifs est indispensable pour concevoir et construire des bâtiments étanches à l'air. Afin d'éviter l'apparition de pathologies résultant des infiltrations d'air dans la construction (moisissures, dégradation de l'isolant), des guides concernant la mise en œuvre des techniques d'isolation thermique par l'extérieur sont aujourd'hui disponibles.



ETUDE DE CAS N°6 : MUR EN PIERRE CALCAIRE ISOLE PAR L'INTERIEUR AVEC MORTIER LEGER

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, ce mur en pierre calcaire a une résistance thermique $R = 0,81 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	Mu
Ri			0,13	0,13	
enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
calcaire tendre	0,4	0,66	0,60	0,75	45
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,77	10
Re			0,04	0,81	
Extérieur				0,81	

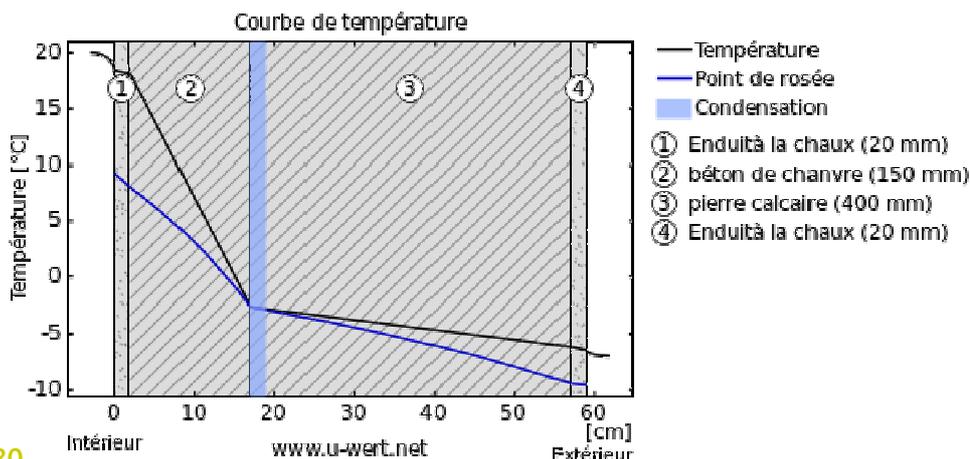
→ Caractéristiques de la paroi après isolation de 15cm de béton chaux chanvre

Caractéristique : 15cm de mortier léger chaux/chanvre : $\lambda = 0,09 \text{ W/mK}$; $\rho = 450 \text{ Kg/m}^3$; $\mu = 10$; $C = 1600 \text{ J/kgK}$; $U = 0,4$; $R = 1,66 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK)	Rx (m ² .K/W)	Rtot (m ² .K/W)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Béton chaux chanvre	0,15	0,09	1,66	1,81	10
Mur pierre calcaire	0,40	0,66	0,60	2,41	45
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02		10
Re			0,04		
Extérieur				2,47	

Sur le diagramme, on observe une condensation dans le mur : 453 g/m^2 . Celle-ci peut s'évacuer en 86 jours durant la saison chaude. De plus, si on utilise un mortier à base de chaux, la chaux va activer la fonction capillaire du mur et permettre un assèchement plus rapide de celui-ci. Plus on augmente l'épaisseur de l'isolant, plus le risque de condensation augmente.

Cette solution a l'avantage de ne pas nécessiter de frein vapeur, l'utilisation d'un logiciel dynamique montrera l'efficacité du matériau grâce à l'équilibre hydrique constaté au fil des saisons. L'inertie de la paroi est préservée. La résistance thermique de cette paroi est modeste du fait de la faible prise en considération des phénomènes d'inertie dans les moteurs de calcul.





ETUDE DE CAS N°7 : MUR EN BAUGE AVEC ISOLATION INTERIEURE EN MORTIER ALLEGE

→ Caractéristiques de la paroi avant isolation

Sans isolation, le mur en terre de 80 cm a une résistance thermique $R = 0,95 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
Enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
Bauge	0,8	1,1	0,73	0,88	10
Enduit chaux	0,02	0,7	0,03	0,91	10
Re			0,04	0,95	
Extérieur	0,84			0,95	

→ Caractéristiques de la paroi après isolation

L'isolation par l'intérieur est constituée de 15 cm de torchis terre/paille allégé. Les caractéristiques du mortier léger terre/paille sont :

- Conductivité thermique $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$,
- Résistance à la diffusion de vapeur $\mu = 3$,
- Masse volumique $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$,
- Capacité thermique massique $c = 1600 \text{ J/kgK}$

Avec une isolation de 15 cm de mortier terre/paille, le mur en terre de 80 cm a une résistance thermique $R = 1,83 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à un coefficient de transmission thermique $U = 0,555 \text{ W/m}^2\text{K}$

Avec un mortier chaux/chanvre de conductivité thermique $\lambda = 0,09$, on obtient avec une isolation par l'intérieur avec 15 cm de mortier, une résistance thermique $R = 2,62 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui correspond à $U = 0,38$. Nous sommes toujours relativement éloignés de la valeur R minimum (4) préconisée par Effinergie

Intérieur	Epaisseur (m)	Lambda W/mK	Rx ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	Rtot ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	mu
Ri			0,13	0,13	
enduit chaux	0,02	0,87	0,02	0,15	10
mortier allégé	0,15	0,17	0,88	1,03	3
bauge	0,8	1,1	0,73	1,76	10
enduit chaux	0,02	0,87	0,03	1,79	10
Re			0,04	1,83	
extérieur	0,99			1,83	

Cette solution a l'avantage de ne pas nécessiter de frein vapeur, l'utilisation d'un logiciel dynamique montrera l'efficacité du matériau grâce à l'équilibre hydrique constaté au fil des saisons.

L'inertie de la paroi est préservée. La résistance thermique de cette paroi est modeste du fait de la faible prise en considération des phénomènes d'inertie dans les moteurs de calcul.

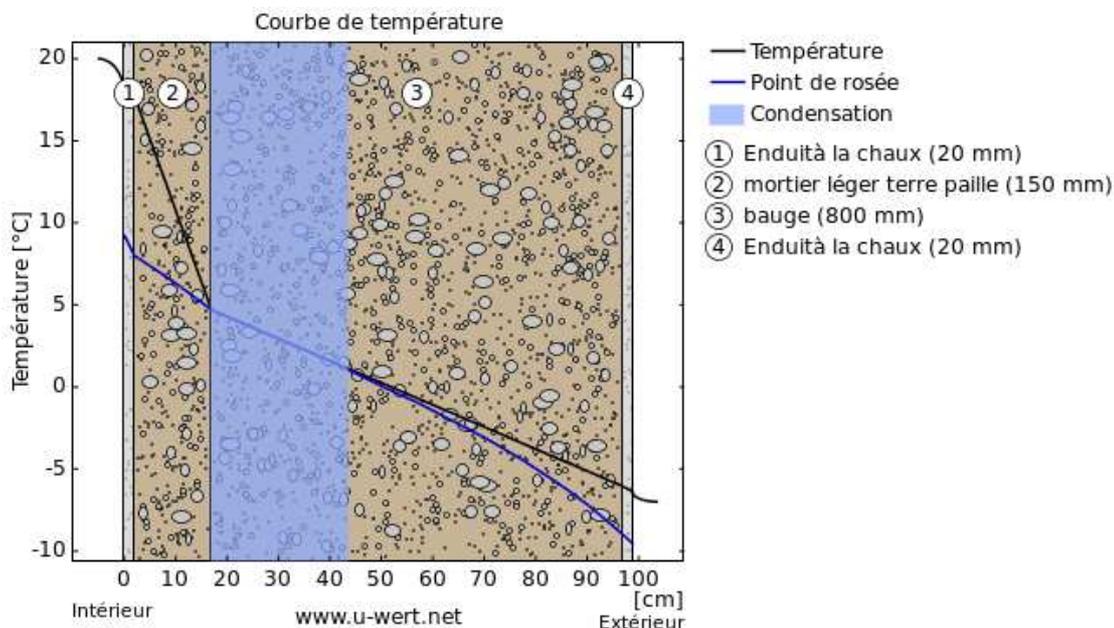
→ Etude des risques de condensation

Le diagramme ci-dessous, nous montre qu'il y a un risque de condensation estimé à 400g par m^2 pendant 60 jours, le mur séchera en 36 jours sans altération du mur.

Dans les deux derniers cas étudié, la solution est peu satisfaisante sur le plan thermique et le risque de condensation existe. Malgré les risques identifiés les murs conservent une bonne perspirance ce qui permet d'évacuer la présence éventuelle d'eau.

Cette étude statique est défavorable aux matériaux à forte inertie, la température réelle de la paroi en terre sera très souvent supérieure à celle calculée par le logiciel.

Il est donc préférable d'étudier plus précisément le comportement de la paroi à l'aide d'un logiciel dynamique, par exemple WUFI.



IV.3- SIMULATION HYGROTHERMIQUE AVEC WUFI

Nous avons vu qu'il existait pour certains types de parois des risques de condensation dans les murs lors de l'isolation par un mortier léger sans freine vapeur. Le logiciel de simulation hygrothermique dynamique nous permet de mesurer la capacité d'assèchement du mur au cours d'une ou plusieurs années (en prenant en considération les conditions climatiques : soleil, vent pluie...).

Ce logiciel n'a pas été utilisé pour cette étude car son acquisition est payante. Cependant dans des cas spécifiques comme vu précédemment, son usage paraît nécessaire. Les études devaient être réalisées par des bureaux d'étude thermique.

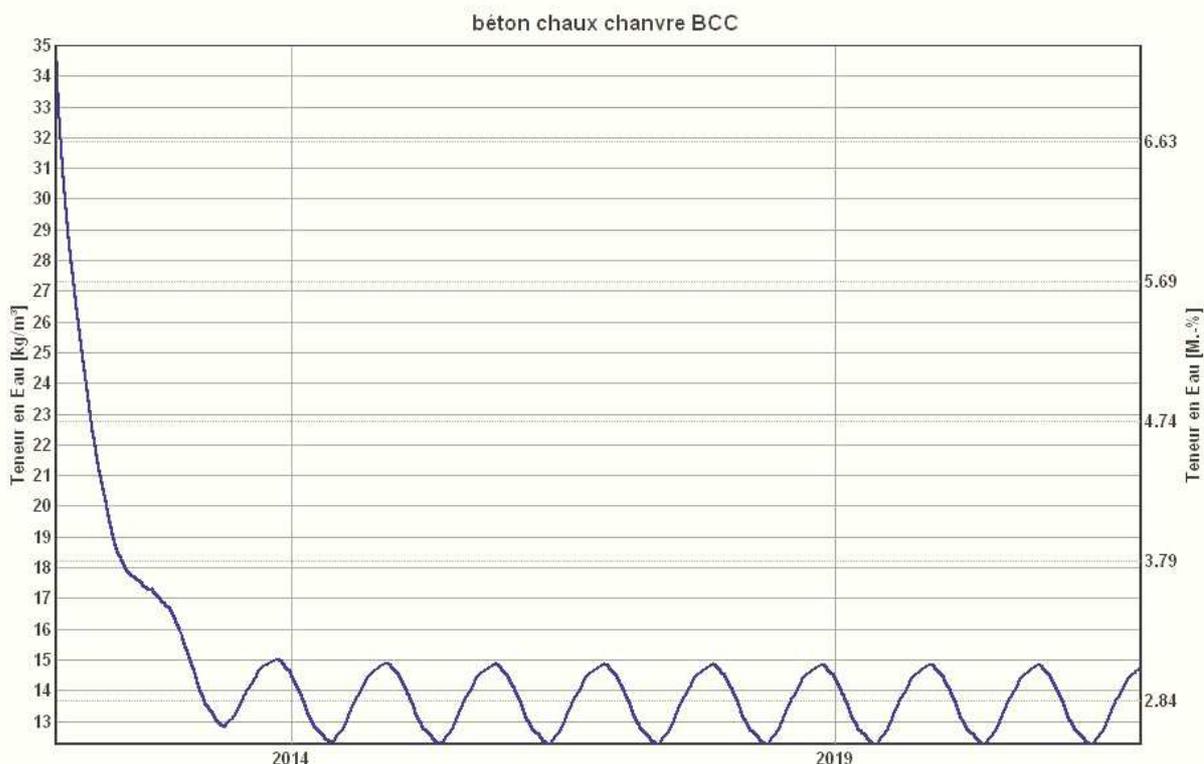


ETUDE DE CAS N°8 : EXEMPLE D'UNE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE SUR UN BETON DE CHAUX CHANVRE

Etude de l'évolution de la teneur en eau d'un mur en pierre calcaire isolé par l'intérieur avec 15 cm de béton chaux/chanvre et enduit à la chaux : mur calcaire (60cm), béton chaux-chaivre (15cm) et enduit chaux (2cm).

Données de l'étude :

- Exposition du mur : Nord
- Durée de la simulation : 10 ans
- Climat extérieur : Brest
- Climat intérieur : - Température intérieure comprise entre 20 et 21°C sans intermittence, hygrométrie comprise entre 40% et 60%



Etude WUFI : Teneur en eau du béton de chanvre

→ Résultats

Résultat de l'étude WUFI sur 10 ans. On observe l'évolution cyclique de la teneur en eau du mur. Il se charge en humidité pendant l'hiver et de décharge pendant l'été. La teneur en eau du béton chaux/chanvre se stabilise très vite (teneur moyenne en eau = 14 kg/m³). Le béton de chanvre permet au mur de s'assécher pendant l'été et d'apporter un meilleur confort d'été.

IV.4- TRAITEMENTS DES POINTS SINGULIERS

Les points singuliers à traiter dans le cas d'une isolation par l'intérieur sont les ponts thermiques avec dalle, mur de refend, liaison mur plancher haut, ouvrants. Il faudra être vigilant quand au passage des réseaux et également à la cage d'escalier entre volume non chauffé et volume chauffé.

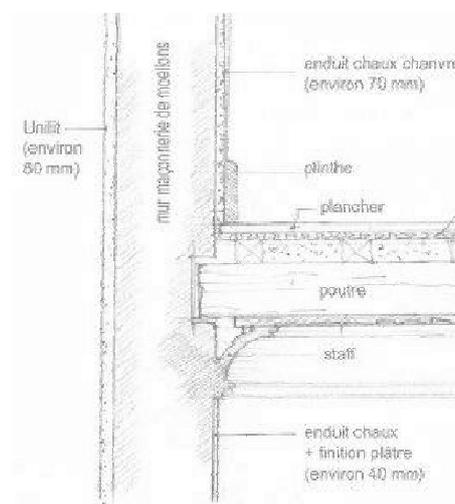
IV.4.A - Traitement des ponts thermiques

Les ponts thermiques sont à traiter avec soin. Il s'agit des jonctions mur-sol, mur-plancher, mur-mur de refend, encastrement des poutres dans le mur et encadrement des fenêtres.

Si les ponts thermiques ne sont pas traités, l'isolation par l'intérieur va les accentuer. L'interruption de l'isolant à la jonction entre les parois adjacentes fait qu'à certains endroits, la formation de condensation est fortement à craindre du fait de l'accentuation des ponts thermiques et de la présence de points froids. Il est indispensable de neutraliser les ponts thermiques aux jonctions.

→ Liaison mur-plancher haut

Dans le bâti ancien, les repos des abouts de poutres, en bois ou en fer, sont généralement réalisés en aménageant des espaces



libres (niches) autour de ces pièces de structure ; ceci afin d'éviter le pourrissement du bois ou la rouille du fer au contact des maçonneries.

D'un point de vue thermique, cette discontinuité des structures limite considérablement les échanges par conduction entre le plancher et la façade. Si, de plus, la sous face du plancher est recouverte d'un enduit de plâtre, un caisson d'air très faiblement ventilé est constitué. Ce dernier limite alors les échanges thermiques par convection, au niveau de la liaison plancher – façade.

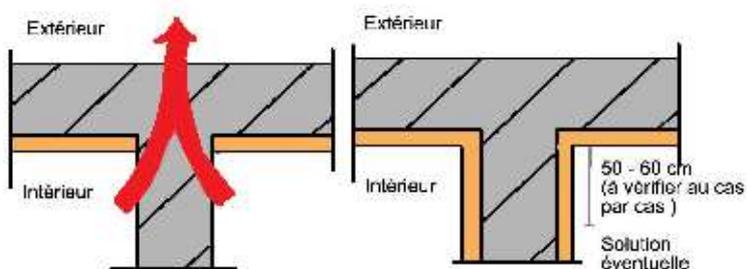
Lors de l'isolation par l'intérieur, il faudra conserver cet espace libre en tête de poutre pour permettre d'évacuer l'humidité. Il doit être suffisant pour éviter les risques de condensation et donc de pourrissement du bois¹⁰. On limitera les fuites d'air à ce niveau avec des joints à la chaux placés aux jonctions murs-planchers.

→ Liaison mur-refend

Lors de l'isolation par l'intérieur, on crée un pont thermique entre le mur extérieur et le mur de refend (schéma du haut ci-contre).

Une solution consiste à faire un retour d'isolation sur le mur de refend sur environ 1 mètre. Mais cela crée un problème esthétique lorsque l'on arrête l'isolant (schéma du bas, ci-contre).

On peut faire une correction thermique sur le mur de refend avec des enduits type chaux/chanvre, terre/paille. Cette correction limite le pont thermique et permet de conserver l'inertie donnée par le mur de refend.

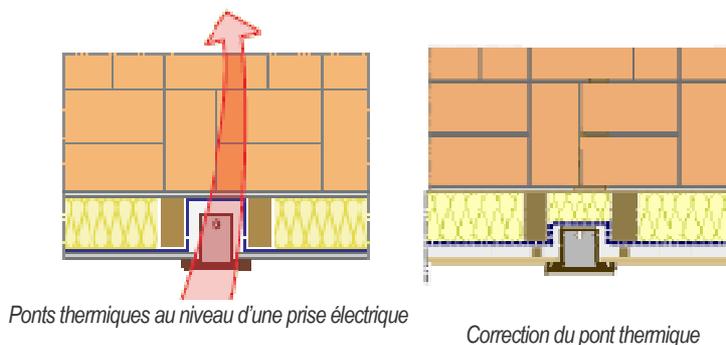


→ Ponts thermiques au niveau des percements

Les principaux ponts thermiques d'un bâtiment se situent aux jonctions des façades et planchers, façades et refends, façades et toitures, façades et planchers bas. Au niveau des percements (portes, fenêtres, loggias...), il s'agit de ponts thermiques structuraux. Ces ponts thermiques sont plus ou moins importants selon la constitution des parois, si elles sont isolées ou non.

Le nombre de percements du système d'étanchéité à l'air peut être évité par :

- l'intégration du tableau électrique (hors cas des locaux TGBT ventilés) dans le volume chauffé ;
- l'utilisation d'un vide technique en paroi ou plénum en plafond pour le passage des gaines et conduits ;
- en prévoyant un espacement suffisant autour de chaque gaine pour permettre le calfeutrement.



Lors du passage de fluides dans les dalles ou murs en béton, et si l'espacement suffisant a été prévu, l'étanchéité autour des conduits est obtenue à l'aide de mortier liquide pour remplir les interstices.

Lors de passage de fluides au travers d'une membrane d'étanchéité à l'air (pare ou frein-vapeur), quelques traversées sont inévitables (passages électriques ou encore évacuation d'eau, ventilation, etc). Des bandes adhésives étirables ou manchons en caoutchouc EPDM peuvent être employés.

Attention, la traversée d'une membrane par une gaine électrique ou un conduit doit être étanchée pour retrouver la continuité du plan d'étanchéité à l'air.

Dans le cas particulier des conduits d'évacuation des fumées (poêle à bois, insert), la réglementation fumisterie en vigueur impose l'emploi de composants ininflammables à proximité. Par exemple une plaque métallique comportant un joint lèvres étanche peut être mise en œuvre en traversée de toiture.

¹⁰ Source : Etude bâti ancien ville de Grenoble.

→ Ponts thermiques au niveau du plancher bas.

Le traitement des ponts thermiques entre le plancher bas et le mur va dépendre des niveaux du sol intérieur et du sol extérieur. Si le sol intérieur est plus bas que le sol extérieur, la terre va jouer le rôle d'isolant et le pont thermique est limité. Si le sol intérieur est plus haut que le sol extérieur, le pont thermique est important et il est accentué par l'isolation par l'intérieur.

Plusieurs possibilités sont alors envisageables et demandent des travaux plus ou moins lourds.

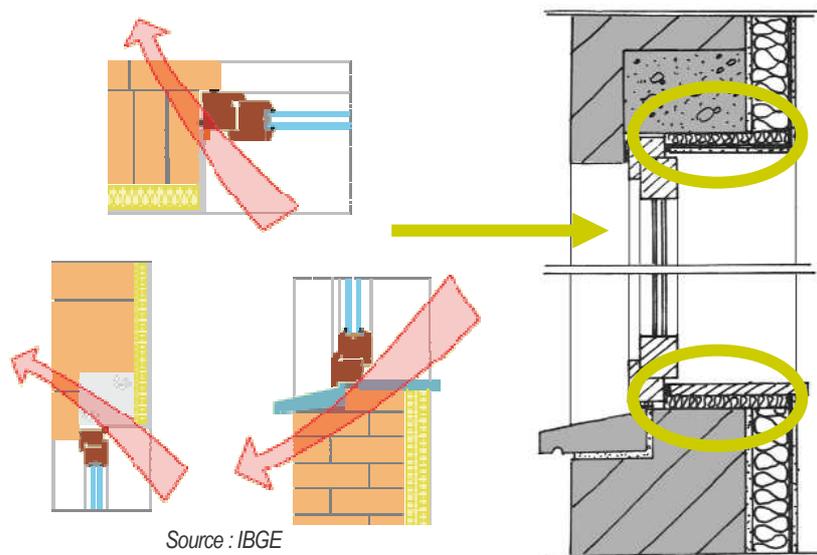
• ISOLATION DU PLANCHER BAS

On pose une chape flottante, on peut en profiter pour installer un plancher chauffant à basse température. On réalise un sondage en partie basse du mur pour connaître les possibilités d'isolation des soubassements. On réalise une saignée à l'intérieur du mur pour descendre l'isolant le plus bas possible. Cette solution risque de modifier la solidité structurelle du bâti. En cas d'impossibilité de réaliser des travaux lourds, on peut juste faire une correction thermique en posant un feutre et un plancher bois.

Si le plancher bas est un plancher bois ventilé, il faut garder cette ventilation. L'isolation rajoutée doit être étanche à l'air et perméable à la vapeur d'eau. Pour isoler ce plancher, on peut utiliser des fibres de bois denses avec une chape sèche.

→ Liaison mur et encadrement de baie

Pour supprimer les ponts thermiques et ainsi le risque de condensation autour de la baie (voir schéma ci-dessous), l'isolation thermique doit être prolongée jusqu'à la menuiserie avec un impact éventuel sur celle-ci et/ou sur les dimensions jour de la baie.



IV.4.B - L'enduit extérieur

Il s'agit de s'assurer que le ravalement extérieur soit en bon état. La paroi extérieure doit éviter tout risque de pénétration d'eau, ne pas faire obstacle aux transferts de vapeur d'eau et être plus perméable à la vapeur d'eau que la paroi intérieure.

Lorsqu'on place un isolant du côté intérieur de la paroi, le mur est plus froid en hiver et plus chaud en été que le même mur sans isolation thermique. Le mur isolé par l'intérieur subit donc des variations de température plus grandes et plus fréquentes. Il en résulte des risques de fissuration. Ces risques de fissuration dépendent des paramètres suivants :

- la dimension de la façade,
- le niveau d'exposition au soleil, à la pluie, au vent,
- les caractéristiques mécaniques des matériaux,
- la stabilité dimensionnelle de la maçonnerie,
- la teinte du parement.

IV.5- CONCLUSION ISOLATION PAR L'INTERIEUR

Lors de l'isolation par l'intérieur, on constate très souvent un risque de condensation à l'intérieur du mur lorsque la vapeur d'eau diffuse à travers le mur et atteint la couche froide de la paroi.

Ce risque est accentué par les défauts d'étanchéité à l'air. Les quantités de condensats sont plus importantes en période froide, lorsque l'air chaud et humide passe derrière l'isolant thermique, à cause d'une discontinuité, et rencontre une surface froide, il se forme de la condensation interne liée au transport de vapeur par convection. Pour éviter ce risque, trois options sont à étudier :

→ Pose d'un pare vapeur (frein vapeur)

Cette technique permet la pose d'isolant ayant une résistance thermique importante tout en évitant la constitution d'un point de rosée. Cette technique impose une pose parfaite (des défauts de continuité dans le frein vapeur entraînent de gros dégâts). Dans le cas de murs capillaires, elle a l'inconvénient de limiter l'assèchement du mur coté intérieur (sauf à utiliser des membranes spécifiques)

Pour que les usagers ne risquent pas d'endommager ce film il faut d'une part les informer des risques liés à la perforation et d'autre part positionner la membrane derrière un élément protecteur (une première couche d'isolant, vide technique....)

→ Mise en place d'une lame d'air

En dernier recours il est envisageable de dissocier l'isolant de la paroi en désolidarisant complètement la structure initiale du caisson isolant. Cette solution revient à utiliser les techniques mises en œuvre pour le BBC neuf et n'a pas été étudiée. Cette technique ne permet pas de bénéficier des apports de l'enveloppe initiale.

→ Isolation avec un mortier léger

L'intérêt majeur de cette solution est de conserver l'inertie du mur initial et sa perspiration, donc d'améliorer le confort hygrothermique. Cette technique respecte particulièrement le comportement du bâti ancien. Dans ce cas, la performance thermique au regard du calcul réglementaire est moindre, il est important de mesurer l'impact de la paroi à l'aide d'une simulation thermique dynamique.

D'autre part, l'isolation avec un mortier léger peut générer de la condensation qui est stockée dans la paroi puis restituée en fonction des saisons. Il faut donc également vérifier, avec un logiciel dynamique de simulation de parois, la capacité de séchage inter saisonnière.

Bien que cette technique semble la plus adaptée au bâti ancien, les calculs réglementaires la pénalise, il serait donc important d'améliorer les connaissances sur ces types de parois en intégrant les données d'inertie et d'hygrothermie.

ANNEXES

Capacité thermique volumique, $\rho \times C$ [J/m³K] Cette valeur décrit l'aptitude d'un volume à stocker de la chaleur. Plus cette valeur est grande, plus le matériau peut capter de la chaleur.

Chaleur spécifique, C_p [J/Kg °K] Aussi appelée capacité thermique massique ou chaleur massique. C'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré, un kilogramme de matériau donné

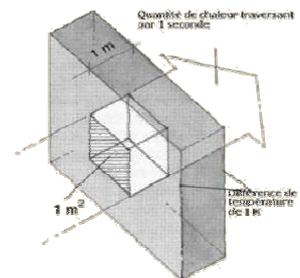
Coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ (sans unité) $\mu = \pi_{air} / \pi_{matériau}$ Il traduit la façon dont le matériau s'oppose à la migration de la vapeur d'eau. Il est établi par rapport à la progression de la vapeur d'eau dans l'air immobile ($\mu_{air} = 1$). Un matériau ayant un μ de 30, signifie qu'il résiste 30 fois plus à la diffusion de vapeur d'eau que l'air immobile.

Coefficient de transmission thermique, U [W/m² °K] U caractérise la performance thermique d'une paroi. Il est également appelé déperdition thermique surfacique : $U = 1 / R$. Ce coefficient U exprime la conductance de la paroi, c'est-à-dire l'intensité du flux de chaleur qui traverse un mètre carré de paroi pour une différence de température d'un degré entre les deux ambiances que sépare cette paroi. Plus la paroi est isolante, moins sa conductance est élevée. U représente la déperdition thermique pour le bâtiment en entier.

Conductivité thermique, λ (lambda) [W/m.°K]. C'est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Elle est exprimée en W/m°K.

Exemple de lambda performant $\lambda = 0,035$ W/m°K

Confort thermique 4 paramètres interviennent dans le confort thermique : la température de l'air, la température moyenne des parois, la vitesse de l'air, l'humidité relative de l'air. L'influence de l'humidité est moins évidente ; elle ne se manifeste nettement que si elle devient très élevée ou si la température de l'air est importante.



Diffusivité thermique, a [m²/s] aussi noté D . La diffusivité thermique traduit la vitesse de réponse d'un matériau pour transmettre une variation de température où $a = \lambda / (\rho \cdot C_p)$

λ : conductivité thermique, ρ : masse volumique, C_p : chaleur spécifique

Plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible, et plus celui-ci se réchauffe lentement.

Effusivité thermique, E [J / (°K.m².√s)] Aussi appelée, chaleur subjective. L'effusivité thermique d'un matériau caractérise la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur lors de sa mise en contact avec un autre matériau. Par exemple, en hiver, dans une salle de bain où le temps d'occupation est assez court, les revêtements à faible effusivité thermique, comme le bois augmenteront le confort thermique de la pièce. Notée E , l'effusivité thermique s'exprime en (J/°K/m³).√(m²/s) où $E = \lambda \rho C_p$

λ : conductivité thermique, ρ : masse volumique, C_p : chaleur spécifique

Énergie grise C'est l'énergie brute (primaire) nécessaire au cycle de vie d'un produit. C'est à dire l'énergie nécessaire pour extraire, transformer, distribuer le produit mais également le recycler quand il arrive en fin de vie. Ces informations sont données dans les ACV (analyse du cycle de vie) et dans les fiches FDES disponibles sur le site INIES

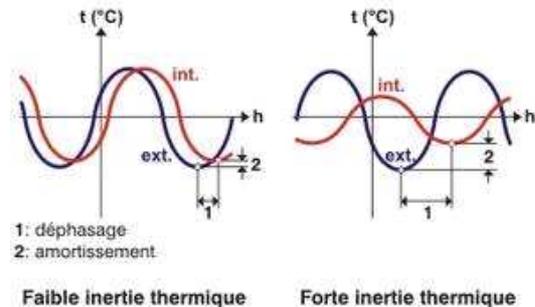
Epaisseur de lame d'air équivalente Sd [m] Elle Indique dans quelle mesure un élément s'oppose à la migration de la vapeur d'eau, on tient compte ici de son épaisseur : $Sd = \mu \times e$

Un élément ayant un Sd de 5 mètres exerce la même résistance à la vapeur d'eau qu'une lame d'air immobile de 5 mètres de largeur.

Inertie thermique

L'inertie thermique traduit la propriété qu'on les matériaux à stocker et à restituer de l'énergie dans le temps. Elle dépend de leur conductivité, de leur capacité thermique, ainsi que de leur masse volumique. Elle caractérise le temps de réponse du matériau soumis à une modification des températures. Plus le temps mis pour atteindre un nouvel équilibre thermique est long, plus le matériau est inerte. Le chauffage et/ou le refroidissement d'un local à faible inertie thermique seront rapides, tandis que dans le cas d'un local à forte inertie thermique, ils seront plus lents.

Sur le schéma ci contre, on constate qu'un bâtiment à forte inertie thermique présente des capacités d'amortissement (2) et de déphasage (1) plus importantes qu'un bâtiment à faible inertie thermique. Les variations de températures sont atténuées et décalées dans le temps.



La faible inertie peut être intéressante pour les locaux à utilisation intermittente (pas de temps d'attente pour la mise en chauffe). Mais en général, en thermique du bâtiment, les structures à forte inertie sont recherchées pour les locaux à utilisation permanente en raison de l'amortissement mais aussi du déphasage. En effet, l'inertie permet de tempérer les amplitudes journalières de températures intérieures face aux variations de températures extérieures. Elle permet aussi de retarder les pics de chaleur ou de froid. ce qui est générateur de confort et d'économie pour les locaux chauffés en permanence. Plusieurs valeurs physiques caractérisent l'inertie d'un matériau. : La diffusivité, l'effusivité, la capacité thermique volumique

Matériau capillaire La capillarité d'un matériau traduit sa capacité à stocker de l'eau liquide dans sa structure interne. L'eau peut se faire aspirer dans ses spores ou capillaires. Il s'agit de succion capillaire. Les matériaux capillaires favorisent la migration de l'eau liquide à l'intérieur de leurs pores. Le bois est très capillaire alors que le béton est très peu capillaire. Le coefficient d'absorption d'eau (A en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) est un indicateur de la capillarité d'un matériau.

Matériaux hydrophiles ou hydrophobes Les matériaux hydrophiles attirent l'eau, par exemple : le sel. Les matériaux hydrophobes repoussent l'eau, par exemple : les plastiques, l'huile.

Matériau hygroscopique Un matériau hygroscopique est à la fois poreux et hydrophile. Ce matériau a la propriété de fixer et de stocker une certaine quantité d'eau. La teneur en eau des matériaux influence l'ensemble des paramètres hygrothermiques du matériau. En effet, la masse volumique évolue selon la teneur en eau, mais c'est aussi le cas de la capacité thermique, de la conductivité thermique. La présence d'eau augmente la conductivité thermique du matériau qui perd de sa capacité à isoler.

Matériaux putrescibles Dans des conditions d'humidité prolongée ces matériaux se décomposent.

Paroi perspirante Une paroi perspirante permet une bonne migration de la vapeur d'eau au travers de tous les éléments qui la constituent tout en restant étanche à l'air et en évitant le phénomène de condensation.

Lorsque l'hygrométrie de l'air intérieur est supérieure à celle de la paroi, cette dernière (à l'instar d'une éponge) absorbe la surabondance de vapeur. A contrario, lorsque l'air intérieur devient trop sec, la paroi va libérer dans l'air la vapeur d'eau qu'elle a absorbée.

Une paroi perspirante présente la particularité d'autoréguler de façon naturelle l'hygrométrie de l'air à l'intérieur du bâti. Elle doit être conçue de façon à ce que la vapeur d'eau ne puisse jamais condenser dans la paroi. Le principe d'absorption et de restitution de la vapeur augmente la sensation de confort thermique.

Une enveloppe étanche à l'air et perspirante pourrait être comparée à une veste en matière Gore-Tex® : une couche isolante, une couche étanche à l'air pour se protéger du vent, et une matière permettant l'évacuation de la transpiration. Pour autant, un système de ventilation équivalent à la respiration humaine reste indispensable même dans un bâtiment perspirant pour évacuer CO₂, polluants divers et vapeur d'eau en excès.

Pare-vapeur, frein-vapeur ou film hygrovariable Un pare-vapeur prévient la pénétration de vapeur d'eau, d'humidité, à travers les murs, les toitures, les isolants en général. Cette membrane empêche aussi la vapeur d'eau de réduire la performance des isolants. On la dispose habituellement à l'intérieur, vers le côté chaud, sur la face avant de l'isolant dès que cela s'avère nécessaire. Les pare-vapeur sont caractérisés par leur aptitude à résister à la diffusion de vapeur d'eau. Le coefficient (Sd), exprimé en mètres, représente la résistance d'un pare-vapeur par rapport à celle qui correspondrait à une épaisseur équivalente d'une couche d'air.

Plus la valeur Sd est élevée, moins le produit laisse passer de vapeur d'eau, plus il est résistant à la diffusion de la vapeur d'eau.

Plus la valeur Sd est faible, plus le produit laisse passer de vapeur d'eau. Il est perméable à sa diffusion.

Le terme de frein-vapeur n'est pas défini dans les normes et textes français. Il est uniquement fait usage du terme pare-vapeur avec caractérisation par sa perméance.

Par convention en s'inspirant des habitudes suisses ou allemandes on peut définir les termes de la manière suivante:

Ouvert à la diffusion: $0 \text{ m} \leq Sd \leq 2 \text{ m}$

Frein-vapeur: $2 \text{ m} < Sd \leq 20 \text{ m}$

Pare-vapeur: $20 \text{ m} < Sd \leq 150 \text{ m}$

Barrière-vapeur: $150 \text{ m} < Sd \leq 1500 \text{ m}$

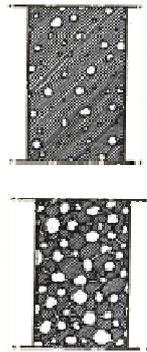
Étanchéité à la vapeur: $1500 \text{ m} < Sd \leq \text{infini}$

(DTU 31.2 2.4.2 Matériaux pour pare-vapeur Ils doivent avoir une perméance $\leq 0,005 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$. (Sd=18m)

Le choix d'un frein-vapeur, plus ouvert au passage de la vapeur, permet souvent de se prémunir du risque, dit secondaire, de condensations internes en été ou au printemps, ou quand la pression de vapeur est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur et que la vapeur a tendance à traverser la paroi de l'extérieur vers l'intérieur. En effet, le flux de vapeur n'est pas complètement bloqué vers l'intérieur ce qui facilite le séchage du mur.

Il existe aussi des membranes d'étanchéité hygrovariables. Elles ont une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau variable en fonction du taux d'hygrométrie ambiante. Leurs pores réagissent en fonction de la charge de

vapeur d'eau et de la température. En hiver, elles sont plus étanches à la diffusion et offrent une protection optimale de l'isolation contre la pénétration d'humidité. En été, elles peuvent diminuer très fortement leur résistance à la diffusion de vapeur et permettent l'évaporation vers l'intérieur.



Perméabilité à la vapeur d'eau π [Kg/msPa] C'est la capacité d'un matériau à laisser passer la vapeur d'eau. Plus elle est petite, plus le matériau est étanche à la vapeur.

Porosité

Les matériaux poreux contiennent des pores ou des cavités de plus ou moins grandes taille pouvant accueillir de l'air et donc de la vapeur d'eau. La structure poreuse peut être ou fermée.

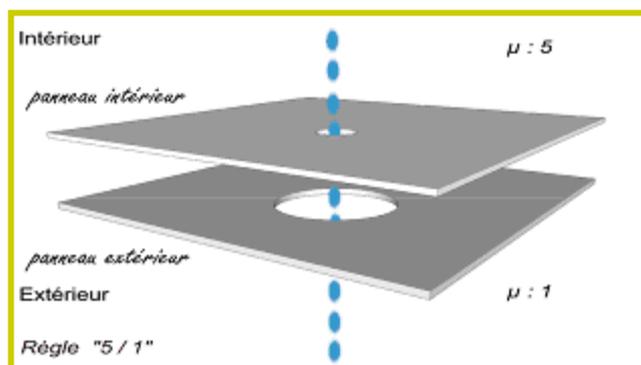
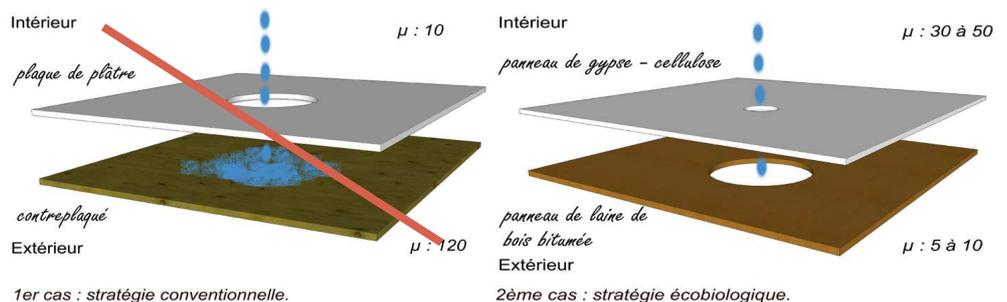
Porosité fermée : Les vides présents dans le matériau ne communiquent pas entre eux et ne permettent donc pas la circulation de l'air et de l'eau : le matériau est alors imperméable. Exemple : verre, polystyrène

Porosité ouverte : Les vides présents dans le matériau sont reliés entre eux par des canaux plus ou moins fins permettant la circulation des fluides. Les matériaux de ce type sont perméables. Un matériau poreux à structure ouverte a la propriété de laisser plus facilement traverser la vapeur d'eau.

La majorité des matériaux de constructions sont poreux et capables de contenir de l'humidité selon les conditions ambiantes dans lesquelles ils sont plongés. La teneur en eau d'un matériau évolue principalement en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle il est plongé. Pour une humidité relative extérieur allant jusqu'à 90%, la teneur en eau reste modérée : très basse pour certains matériaux (brique, béton cellulaire...) et plus élevée pour d'autres (bois, cellulose...). Au-delà de cette humidité relative, et jusqu'à la saturation (100 %), on entre dans la zone capillaire. La teneur en eau augmente alors beaucoup plus vite et peut atteindre des valeurs élevées. Certains pores se remplissent d'eau qui circule librement à travers ceux-ci sous forme liquide ou de vapeur. Exemple : Le béton est poreux mais sa structure interne relativement fermée rend ce phénomène très lent.

Règle "5 pour 1"

Cette règle a été établie pour que la vapeur d'eau contenue dans la maison ne soit pas bloquée à l'intérieur d'une paroi. La face extérieure doit être 5 fois plus perméable que la face intérieure pour assurer une bonne diffusion de la vapeur d'eau.



Résistance thermique, R [m² K/W] La résistance thermique R décrit le pouvoir isolant d'une couche de matériau. Elle se caractérise par deux paramètres : l'épaisseur du matériau et sa conductivité thermique. La formule est **$R = e/\lambda$** .

Plus la résistance thermique est élevée, plus la structure (mur, plafond) est isolante. La résistance d'une paroi composée de plusieurs couches dépend de la conductivité de chaque couche et de leurs épaisseurs respectives.

EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE MATERIAUX

	λ (W/m.K)	μ^*	Matériau hygroscopique	Matériau capillaire A en $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$	Matériau putrescible	Capacité thermique (J/kg.K)
Laine de verre	0,04	1 à 2	Non	Non 0	non	1030
Polystyrène	0,03	80 à 150	Non	Non 0	non	1450
Laine de bois	0,038 à 0,06	1 à 10	oui	Oui (+ ou -) 0.007	Difficilement (traitement)	1900
Ouate de cellulose	0,036 à 0,045	1 à 2	oui	Oui 0.3	Difficilement (traité)	2000
paille	0,045 à 0,085	1 à 2	oui	Oui (+ ou -)	oui	1600
Chaux chanvre	0,07 à 0,11	4,5		+ ou -	Difficilement sauf pendant la phase de séchage	1700
Brique minérale	0,06	1 à 3 perméable	Oui	Oui 1.2	non	1000
liège	0,04 à 0,048	1 à 15 Peu perméable à la vapeur	non	non	non	1800

* (sans unité) indique la perméabilité à la vapeur d'eau

→ **Ouvrages**

- Le guide ABC : Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974 - André Pouget
- -Etanchéité à l'air des bâtiments : Régions Alsace, Franche Comté, Bourgogne et Pays de Loire - ADEME (2011)
- L'isolation thermique écologique - J.P. Oliva, S. Courgey, édition Terre vivante (2010)
- Etude Athéba : amélioration thermique du bâti ancien, maisons paysannes de France - Ministère du développement durable, CETE de l'EST (2010)
- La terre crue en Basse Normandie, de la matière à la manière de bâtir – ouvrage collectif, Crecet, (2007)
- Le bâti ancien en Basse-Normandie : connaissance de l'habitat existant - Collection réalisée par EDF (version papier disponible à l'ARPE)

→ **Documents téléchargeables**

- Les matériaux Bio-sourcés produits et/ou utilisés en Basse Normandie - Région Basse Normandie (2011)
<http://www.arpe-bn.com/>
- Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines - Service public de Wallonie (2010)
<http://energie.wallonie.be/fr/isolation-thermique-par-l-interieur-des-murs-existants-en-briques-pleines.html>
- Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments - CETE de Lyon
<http://www.cete-lyon.developpement-durable.gouv.fr/documents-sur-la-permeabilite-a-l-a75.html>
- Amélioration de la performance thermique du bâti en rénovation - Agence Qualité Construction
<http://www.qualiteconstruction.com/publications/panorama.html>
- Guide pratique pour la construction et la rénovation de petits bâtiments
<http://www.bruxellesenvironnement.be>
- Etude des transferts hygrométriques dans le béton de chanvre et leur application dans le bâtiment
http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/08/19/PDF/These_TRANLE_TEL.pdf
- Pose de drain - Hervé EVEN, édition Tiez breiz (revue n°13)
<http://www.tiez-breiz.org/conseils.php>
- Restauration du patrimoine bâti percheron
http://www.parc-naturel-perche.fr/iso_album/charte_qualite_patrimoine_bati.pdf
- Notes techniques et réflexions, les transferts d'humidité dans les bâtiments - Clément Carpentier, Enertech (avril 2011)
<http://www.enertech.fr/pdf/45/transfert-d-humidite-dans-les-batiments.pdf>
- Gwenan ingénierie
<http://www.eztimat.com/infos-et-t%C3%A9l%C3%A9chargements/>
- Fiches Athéba - Maison paysanne
<http://www.maisons-paysannes.org/>
- Etude INSEE sur le bâti ancien en Basse-Normandie
http://www.insee.fr/fr/insee_regions/basse-normandie/themes/dossiers/onze_ter_v3/onz3_bn.pdf
- Réglementation thermique des bâtiments existants
<http://www.rt-batiment.fr/batiments-existants>

Ce dossier à destination des professionnels de la rénovation thermique a vocation à informer sur les différentes techniques d'isolation des parois du bâti ancien normand.

Il a été réalisé en s'appuyant sur un réseau d'experts Normands, l'outil a vocation à s'enrichir grâce aux expériences de chacun et aux évolutions techniques.

Pour cela nous vous invitons à envoyer vos contributions à l'ARPE : contact@arpe-bn.com

Avec le soutien de

