Etude interne sur l'instabilité du lambda

iLanga, division thermique





Table des matières

1	Prés	entation de l'entreprise	3
	1.1	La division de mise en œuvre d'isolation très performante	4
	1.2	La division bureau d'étude énergétique	4
	1.3	La zone d'intervention d'iLanga	5
2	Prés	entation de l'étude sur l'instabilité du Lambda	6
	2.1	L'historique du projet	6
	2.2	Le confort thermique	6
	2.2.2	Le confort vu par les normes	6
	2.2.2	2 Le confort vu par la science	7
	2.2.3	3 Le confort humoristique	8
	2.3	Les Normes et labels clefs de la performance thermique du bâti	8
	2.3.2	Les propriétés hygrothermiques : NF EN ISO 10456 (2008)	8
	2.3.2	Les performances thermiques : NF EN 12667 (2001)	8
	2.3.3	B Le confort thermique : ISO 7730 (2005)	9
	2.3.4	Le label de certification des ACERMI	9
	2.4	Les principaux paramètres physiques liés à l'isolation	10
	2.4.3	La conduction thermique	10
	2.4.2	2 La diffusivité	11
	2.4.3	3 L'effusivité	11
	2.4.4	1 L'inertie thermique	11
	2.4.5	5 Le déphasage	12
	2.4.6	Les 3 modes de transfert de la chaleur	16
	2.5	Atteindre le confort thermique ?	
	2.5.2	l Isoler	16
	2.5.2	Choisir des matériaux pour des parements intérieurs	17
	2.5.3	Obtenir un déphasage minimum de 12h	17
	2.5.4	Limiter les courants d'air	18
	2.5.5	Maitriser son humidité relative	21
	2.5.6	Chauffer pour compenser	25
	2.6	Atteindre un retour sur investissement raisonnable	25



2	.7 Les	lambdas (conductivité thermique)	26
	2.7.1	La mesure du lambda	26
	2.7.2	Les valeurs mesurées	27
	2.7.3	La valeur déclarée	27
	2.7.4	Les valeurs de calcul	27
	2.7.5	Les valeurs de calcul par défaut	27
	2.7.6	Le lambda par défaut	27
	2.7.7	En résumé	28
2	.8 L'in	stabilité du lambda	29
	2.8.1	L'instabilité du lambda en fonction de la température	29
	2.8.2	L'instabilité du lambda en fonction de l'humidité	31
	2.8.3	L'instabilité du lambda en fonction de la densité	33
	2.8.4	L'instabilité du lambda en fonction de la direction	34
	2.8.5	L'instabilité du lambda dans le temps	36
	2.8.6	Conclusion sur l'instabilité du lambda	39
3	Compléi	ment de Bibliographie	41
4	To see.		41



1 Présentation de l'entreprise

iLanga SAS est localisée à Mieussy en Haute-Savoie et intervient sur la vallée de Chamonix. Nous possédons une filiale au Québec, iLanga Canada inc. Dans le cadre de la résilience thermique, l'objectif de la société est d'apporter des solutions simples et adéquates pour augmenter le niveau de confort et diminuer les coûts d'exploitations liés au chauffage et à la climatisation. iLanga s'emploie à canaliser l'énergie qui nous est offerte par ce gigantesque réacteur nucléaire qu'est le soleil, d'ailleurs iLanga veut dire « soleil » en Zulu¹.



Figure 1: Rénovation d'un chalet d'alpage

Pour atteindre cet objectif iLanga possède deux activités distinctes :

- Un bureau d'étude énergétique qui traite de la thermique, du photovoltaïque (principalement hors réseau) et de l'aéraulique. Cette activité tourne toute l'année.
- La mise en œuvre d'isolation performante qu'iLanga pratique entre le Avril et Novembre.

En 2014, iLanga SAS a repris une partie des actifs des sociétés de charpente et d'isolation créées par Claude Lefrançois² avec Fabrice Francioli comme actionnaire. Claude Lefrançois a été directeur technique de la division isolation d'iLanga et il est aujourd'hui Youtubeur³, formateur, écrivain et à la retraite.

A l'inverse des sociétés précédentes, iLanga a fait le choix de ne pas s'investir dans la charpente mais de monter encore en compétence sur le domaine énergétique, à savoir le bureau d'étude et la mise en œuvre. Ce positionnement permet de travailler avec nos donneurs d'ordre classiques qui sont les architectes mais aussi tous nos ex-concurrents qui sont les charpentiers. La stratégie d'iLanga est d'être un acteur incontournable de la performance associé à un excellente retour sur investissement, sur les rénovations et constructions neuves à très base énergie et à énergie positive.

_

¹ Les Zoulous sont un peuple bantou et guerrier. Ils sont aujourd'hui sédentarisés principalement en Afrique du Sud.

² https://www.papyclaude.fr/

³ https://www.youtube.com/channel/UCIt0v-EXWIEF4IpD6LJQCiw





Figure 2: ilanga.org

Voici un aperçu des deux divisions :

1.1 La division de mise en œuvre d'isolation très performante

C'est la division historique, iLanga a une très grande expérience des isolants biosourcés et plus particulièrement de la ouate de cellulose. Nous travaillons principalement avec deux grands producteurs de ouate de cellulose ISOFLOC et IGLOO.

Jusqu'à fin 2019 iLanga transmettait son expertise au travers de formations agréées. Cette activité est aujourd'hui reprise par Claude Lefrançois.

Un exemple de réalisation de bâtiment performant, l'équipe d'iLanga a réalisé en 2010, bâtiment de 211 m² de SRT dans la vallée de Chamonix qui est monitoré tous les mois. Ce bâtiment oscille entre 2.9 et 6.8 kWh/m²/an sans aucun surcoût par rapport à un bâtiment RT2012, soit entre 2 et 3 fois plus performant qu'un bâtiment passif. Enfin ce bâtiment est non seulement totalement autonome en énergie mais il génère depuis 2013 suffisamment d'électricité pour faire 20'000 km par an en véhicule électrique.

1.2 La division bureau d'étude énergétique

Afin de consolider la division historique qu'est la mise en œuvre d'isolation très performante, iLanga s'est dotée de formalisme et d'outils pour parvenir à modéliser la gestion d'énergie de bâtiments sur la vallée de Chamonix. A titre d'exemple le dirigeant d'iLanga a commencé avec le logiciel open source EnergyPlus⁴ en 2003. Pour information EnergyPlus permet une modélisation globale de l'énergie mais n'a aucune légitimité en France et iLanga a dû maintenant basculer sur Pléiades. J'ai pu récupérer et intégrer un modèle météo locale à notre périmètre d'action, que j'ai avéré avec les données issues de l'instrumentalisation du bâtiment décrit ci-dessus. Le bureau d'étude traite aussi régulièrement de la perspirance des enveloppes qui a un impact très important sur la consommation énergétique, le confort et la pathologie des bâtiments. Pour les mêmes

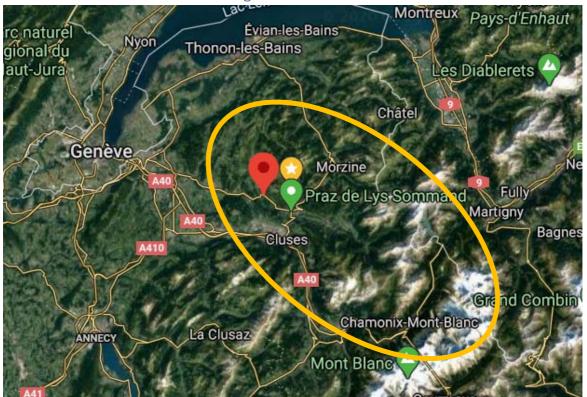
_

⁴ EnergyPlus est logiciel de simulation énergétique des bâtiments qui est développé sous le model open source par le « US Departement of Energy »



objectifs, le bureau d'étude s'est doté de moyens pour les études de VMC. iLanga a pu ainsi monter des modèles énergétiques extrêmement efficaces car basés sur une logique transverse de l'énergie (thermique, VMC simple flux, ballon thermodynamique). Enfin iLanga fait des études photovoltaïques hors réseau ou hybride (en ilotage avec reconnexion possible au réseau) qui vont de la simple électrification d'un site isolé à de l'interconnexion de sites isolés ou de la modulation de puissance de charge de véhicule électrique en temps réel.

1.3 La zone d'intervention d'iLanga



Le bureau d'études et la mise en œuvre travaillent sur des projets à moins d'une heure de route des bureaux.



2 Présentation de l'étude sur l'instabilité du Lambda

Le sujet d'étude porte sur la compréhension de l'instabilité de la conductivité thermique (λ). Le préalable à cette étude est une compréhension poussée de l'isolation, les points abordés sont : le besoin de confort, le retour sur investissement, les facteurs qui influencent la performance d'une isolation, la compréhension des différentes conductions thermiques utilisées, les calculs théoriques et les résultats terrain lors de la mise en œuvre.

2.1 L'historique du projet

iLanga se focalise sur des bâtiments localisés dans la vallée de Chamonix, et maintenant au Québec également. Nous avons produit un bâtiment neuf de 211 m² habitable sous les 5 kWh/m²/an, tous les autres bâtiments d'iLanga neuf sont sous les 30 kWh/m²/an pour le neuf et entre 25 et 50 kWh/m²/an pour la rénovation.

A résistance thermique (R) égale, nous avons toujours été surpris en bien par les performances des isolants biosourcés, par rapport aux isolants nés après-guerre. Il était donc important pour nous de valider si nous étions dans du fantasme ou de la science. Notre démarche a été entamée en commençant par la compréhension du confort des habitants et par la compréhension théorique et pratique de tous les paramètres qui contribuent à la performance énergétique.

L'objectif est de récapituler les savoirs et de les organiser dans une démarche scientifique afin de pouvoir construire efficacement de nouvelles connaissances.

2.2 Le confort thermique

En Octobre 2018 l'Ademe a publié les résultats de sa dernière enquête sur les travaux de rénovation énergétique des maisons individuelles (Trémi ⁵). Pendant la période 2014-2016, 5,1 millions de ménages en maisons individuelles ont réalisé des travaux, soit 32% du parc de maisons françaises (59,3 milliards d'euros de travaux). Il en ressort que, pour 80% d'entre eux, l'objectif N° 1 est effectivement l'amélioration du confort, bien avant toutes leurs autres aspirations parmi lesquelles le volet économie d'énergie et la valorisation du patrimoine.

Bien, mais qu'est-ce que le confort ?

2.2.1 Le confort vu par les normes

2.2.1.1 ISO 7730 (2005)

.

L'ISO 7730 (2005) est la norme à laquelle nous devons nous référer. Elle décrit les sensations thermiques de l'homme liées principalement à l'équilibre thermique du corps dans son ensemble. Elle précise que cet équilibre est influencé par son activité physique et par son vêtement ainsi que par les paramètres de l'environnement : température de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse de l'air et humidité de l'air. Elle a entre autres comme objectif de prédire deux indices :

⁵ https://www.ademe.fr/travaux-renovation-energetique-maisons-individuelles-enquete-tremi



- PMV (vote moyen prévisible, de l'anglais predicted mean vote)
- PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits, de l'anglais predicted percentage dissatisfied)

Cette norme précise que l'inconfort thermique peut aussi être causé par un refroidissement ou un réchauffement local non désiré du corps. Elle définit l'insatisfaction comme étant la cause d'un inconfort chaud ou froid du corps considéré dans son ensemble.

2.2.1.2 Le «standard 55» de l'ASHRAE / ANSI

Le «**standard 55**» est destiné au marché Nord-Américain. Il traite des mêmes indices que l'ISO mais est plus pragmatique, principalement sur les ressentis en milieu humide et sous condition de climatisation. Il est vrai qu'en Amérique du Nord on parle plus souvent de la température ressentie que de la température sous abri du soleil, du vent et de l'humidité!

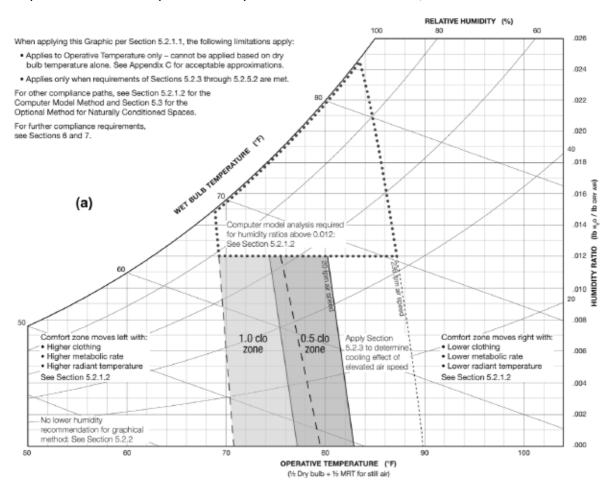


Figure 3: Graphique de confort sur les plages de température et d'humidité

2.2.2 Le confort vu par la science

Pour d'autres personnes comme la Dr Agnès Sommet6, docteur en pharmacologie, pharmacologue au CHU de Toulouse, maître de conférences à la faculté de médecine, la

-

⁶ https://www.researchgate.net/profile/Agnes_Sommet



définition du confort passe par la compréhension des pertes de calories de notre enveloppe (peau) qui constituent la source principale de ressenti d'inconfort. Pour elle, elles s'opèrent ainsi :

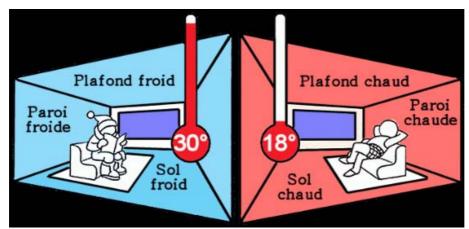
La radiation, émission sous forme de rayonnement : 60%

La convection : 15%La conduction : 3%

• L'évaporation de la sudation : 22%

2.2.3 Le confort humoristique

Enfin pour certains leur vision du confort est très simpliste mais tellement réelle :



Cela étant posé, la question est : sur quels paramètres physiques doit-on jouer pour atteindre le confort et peut-on leur faire confiance ?

2.3 Les Normes et labels clefs de la performance thermique du bâti

2.3.1 Les propriétés hygrothermiques : NF EN ISO 10456 (2008)

La Norme internationale NF EN ISO 10456 spécifie des méthodes pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles des matériaux et produits du bâtiment thermiquement homogènes, ainsi que des procédures pour convertir les valeurs obtenues pour un ensemble de conditions en valeurs valides pour un autre ensemble de conditions.

Ces procédures sont valables pour des températures ambiantes utiles comprises entre -30 °C et +60 °C. Dans la pratique les tests sont exécutés sur la plage optimale pour l'isolant et cette Norme fournit les coefficients de conversion liés à la température et à l'humidité.

2.3.2 Les performances thermiques : NF EN 12667 (2001)

En France, la norme NF EN 12667 Juillet 2001 (« Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique ») spécifie les principes et les modes opératoires d'essai relatifs à la détermination, par les méthodes de la plaque chaude gardée ou fluxmétrique, la résistance thermique des éprouvettes ayant une résistance thermique d'au moins 0,5 m2. K/W.

La conductivité thermique peut être mesurée par différentes méthodes : méthode flux métrique, plaque chaude gardée, boite chaude gardée, sonde à fil chaud.



2.3.3 Le confort thermique : ISO 7730 (2005)

Voir le § 2.2.1.1 « ISO 7730 (2005) » ci-dessus.

2.3.4 Le label de certification des ACERMI

Le Certificat ACERMI est délivré par l'Association pour la CERtification des Matériaux Isolants qui regroupe :

- Le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
- Le LNE (Laboratoire National de métrologie et d'essais)

2.3.4.1 Méthode de calcul retenue pour la conductivité

Le cahier technique 1⁷ de l'association ACERMI (voir annexe) décrit la méthode de mesure et de calcul de la conductivité thermique déclarée. La mesure est effectuée selon la norme NF EN 12667 ou NF EN 12939.

La conductivité thermique utilisée pour le calcul de la résistance thermique (« conductivité thermique déclarée ») est exprimée « à 10°C, pour un isolant stabilisé à l'équilibre hygrométrique 23°C, 50% d'humidité relative ». Les mesures de conductivité thermique sont réalisées à l'état humide (50% d'humidité relative) à la température de 23°C (λ23,(23/50)) puis ramenées par calcul à 10°C, ou effectuées directement à 10°C (λ10,(23/50)).

Une marge plus ou moins importante est prise par rapport à la moyenne des mesures. Cette marge dépend du nombre d'échantillons testés et de l'écart-type constaté sur les mesures. La valeur retenue tient compte du tassement (qui modifie la masse volumique).

Un effectif de 10 échantillons est un strict minimum. Si le produit est fabriqué dans plusieurs usines, la conductivité thermique moyenne et l'écart type devront être déterminés pour chacune d'elle. La valeur margée correspond au fractile 90% avec un niveau de confiance de 90%.

2.3.4.2 Méthode de calcul retenue pour la Résistance thermique

Le cahier technique 2⁸ de l'association ACERMI définit la méthode de calcul de la résistance thermique des isolants. La résistance thermique « certifiée » prend en compte le tassement éventuel du produit dans le temps pour les produits en vrac.

Pour les produits en vrac, ne relevant pas d'une norme européenne harmonisée, mis en œuvre par soufflage, les valeurs de la résistance thermique sont basées sur les informations suivantes :

- plage de masse volumique
- conductivité thermique de référence par plage de masse volumique
- taux d'humidité en masse (en %) selon les conditions de stabilisation et d'application (séchage, durée...)

⁷ https://www.acermi.com/documents-reference/cahiers-techniques/ct-01-determination-conductivite-thermique.pdf

 $^{^{8}\} https://www.acermi.com/documents-reference/cahiers-techniques/ct-02-determination-resistance-thermique.pdf$



tassement éventuel

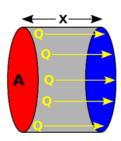
Les valeurs de résistance thermique sont exprimées à partir de la valeur de conductivité thermique de référence λréf et sont chacune associées à une épaisseur minimale installée et un nombre de sacs minimum pour 100 m². La résistance thermique R certifiée est exprimée en (m².K)/W par pas de 0,5 (m².K)/W ou 1 m².K/W, à partir d'une valeur minimale certifiée de 2 (m².K)/W.

2.4 Les principaux paramètres physiques liés à l'isolation

Avant tout voici les principaux paramètres physiques que nous avons l'habitude de traiter pour la physique du bâtiment :

2.4.1 La conduction thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ , elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.



La conduction thermique évolue avec l'humidité suit la relation $\lambda=k\lambda_0 \mathrm{e}^{0.08H}$

k est un coefficient de dimensions;

H est l'humidité relative en pourcentage ;

 $\lambda 0$ est la conductivité thermique du matériau sec ; λ la conductivité thermique du matériau en condition d'humidité H.

La conduction thermique n'est donc pas une constante.

On distingue plusieurs valeurs du λ

- λD: La valeur déclarée d'un matériau de construction est généralement fournie par son fabricant. Cette valeur est certifiée sur base d'un agrément technique. Elle est obtenue dans des conditions de référence données de température et d'humidité (d'après les principes donnés dans la EN ISO 10456). Deux λD existent:
 - λD,I (10°C): En prenant une température de référence de 10°C de l'isolant.
 Cela correspond aux conditions hivernales de 0°C dehors et 20°C à l'intérieur.
 - λD,II (23°C): En prenant une température de référence de 23°C de l'isolant.
 Cela correspond aux conditions estivales de 26°C dehors et 20°C à l'intérieur.
- λU,i: À partir de cette valeur λD, il est possible de déduire les valeurs de calcul de la conductivité thermique λU,i. C'est la conductivité thermique d'un matériau dans une paroi intérieure ou dans une paroi extérieure, à condition que le matériau soit protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation.
- **λU,e** : À partir de cette valeur λD, il est possible de déduire les valeurs de calcul de la conductivité thermique λU,e. C'est la conductivité thermique d'un matériau dans une



paroi extérieure qui n'est pas protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation.

2.4.2 La diffusivité

La diffusivité est la vitesse de déplacement des calories dans un corps. Plus elle est faible, moins vite la chaleur se déplace dans la matière concernée.

Sa formule est : D = $\lambda/(\rho.c)$ [m²/s]

λ est la conductivité thermique du matériau [W.m⁻¹.K⁻¹]

 ρ la masse volumique du matériau [kg.m⁻³]

c la capacité thermique massique du matériau [J.kg-1.K-1]

Elle contribue à maintenir la chaleur vers la source d'émission, à l'intérieur l'hiver et à l'extérieur l'été, et faire monter la température de la face du matériau ainsi exposée. Ainsi, un bon confort demande une faible diffusivité pour que cet échange se fasse le plus lent possible.

2.4.3 L'effusivité

L'effusivité thermique caractérise la capacité d'un matériau à échanger (absorber et restituer) de la chaleur avec son environnement.

Sa formule est $E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$ [J.K⁻¹.m⁻².s^{-1/2}]

λ est la conductivité thermique du matériau [W.m⁻¹.K⁻¹]

 ρ la masse volumique du matériau [kg.m⁻³]

c la capacité thermique massique du matériau [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Un matériau à faible effusivité absorbe peu de chaleur et contribue à la renvoyer par rayonnement.

"L'effusivité caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...)."

Exemple : Le marbre à la température de 20°C possède une effusivité élevée et semble froid lorsque nous posons la main dessus, car il absorbe la chaleur corporelle (qui est de 33°C environ), la température de contact s'élevant à 25°C. Le bois ayant une faible effusivité absorbe beaucoup moins de chaleur et la température de contact s'établit à 29°C, d'où une sensation différente de chaleur.

2.4.4 L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un corps, matériaux (par exemple les murs), à stocker de la chaleur, elle est caractérisée par la capacité thermique. L'inertie thermique est une combinaison de la diffusivité et de l'effusivité.



2.4.5 Le déphasage

Le déphasage exprime le temps nécessaire pour qu'une calorie traverse un matériau.

Il est dépendant des mêmes valeurs que la diffusivité et l'effusivité λ , ρ et c auxquelles viennent s'ajouter l'oscillation de la température extérieure (T) ainsi que l'épaisseur de matériau mis en œuvre (e).

Voici une simulation avec le logiciel UBAKUS de deux murs au principe constructif identique mais l'un a un isolant biosourcé et l'autre un isolant minéral :

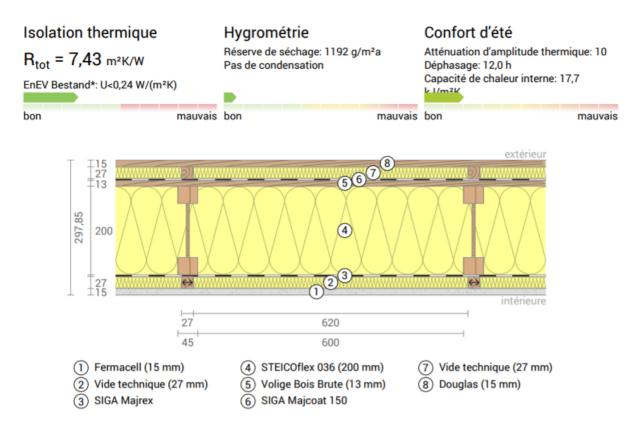


Figure 4: Composition du mur (laine de bois)



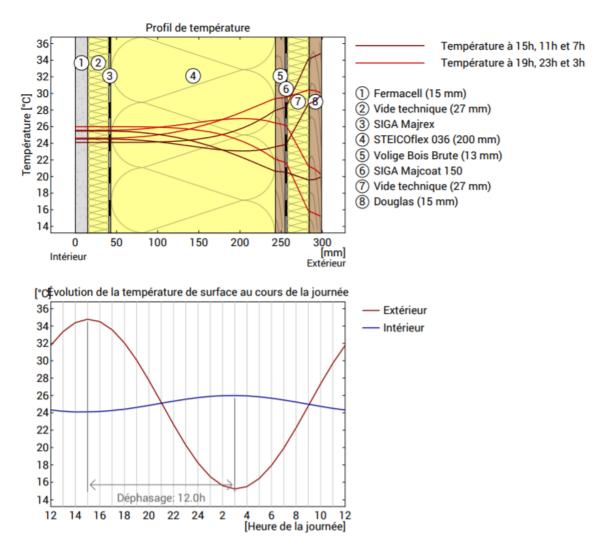


Figure 5: Profile et évolution de la température dans une laine de bois

Avec la laine de bois on se rend réellement compte que les températures du mur intérieur restent extrêmement stables au court de la journée et des différentes températures d'entrée. Le fait d'avoir un déphasage de 12h permet de lisser complètement les variations de température et garder une température intérieure très constante.



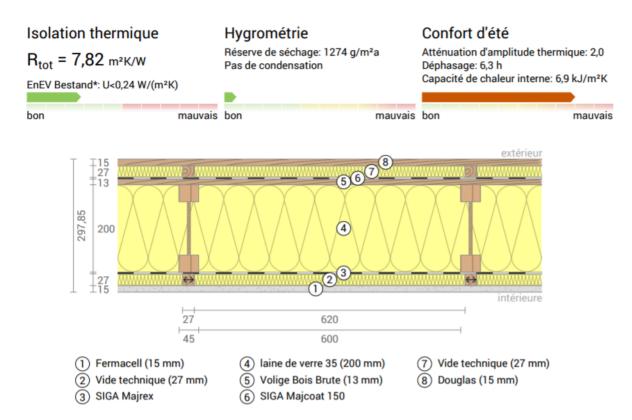


Figure 6: Composition du mur (laine minérale)



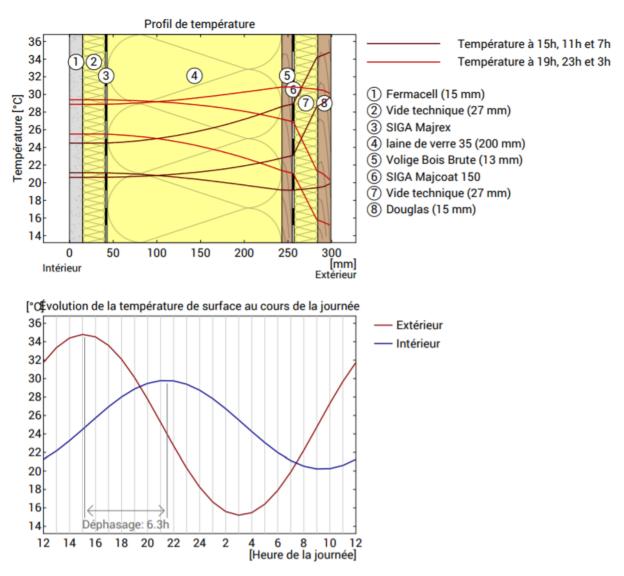


Figure 7:Profile et évolution de la température dans une laine minérale

Maintenant on observe le mur isolé en laine de verre sur les mêmes bases constructives que le mur en laine de bois, soit 20cm d'isolant. La simulation donne les informations suivantes :

	20 cm de Laine de verre	20 cm de Laine de bois	
	0.032 W/(m.K)	0.036 W/(m.K)	
Resistance thermique théorique	6,25 m ² K/W	5.55 m ² K/W	
Déphasage (h)	6h20	12h00	
Amplitude thermique intérieur et sans ventilation (°C)	21°C le matin à 29°C en fin de journée	24°C le matin à 24.5°C en fin de journée	
Confort	2/5	4/5	



Ici avec l'aide de Ubakus on peut se rendre facilement compte des écarts entre deux isolants. On a le même mur, les mêmes épaisseurs d'isolant. Même avec un R supérieur un matériau qui n'a pas un bon déphasage ne peut égaler un biosourcé sur le confort.

2.4.6 Les 3 modes de transfert de la chaleur

La conduction: La conductivité d'un matériau est sa capacité à retenir ou à évacuer la chaleur. C'est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un corps de particule à particule lorsque l'on marche pieds nus sur un carrelage frais.

La convection : C'est le transfert de chaleur d'un fluide liquide ou gazeux à un corps solide, par exemple de l'air à un mur. Cet effet est d'autant plus important que l'écart de température entre l'air et le corps est grand. La vitesse de l'air accentue ces échanges.

Le rayonnement : C'est la transmission de la chaleur d'un corps à un autre sous forme de rayonnement.

2.5 Atteindre le confort thermique ?

2.5.1 Isoler

L'isolation thermique est un ensemble de technique mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur. Le paramètre le plus connu est R. La résistance thermique R (exprimée en m^2 .K/W) dépend de l'épaisseur (e exprimée en mètre) et de la conductivité thermique lambda (λ) du matériau :

$$R = e / \lambda$$
.

Les valeurs communément utilisées car définies pour la RT2012, la RT existante 2018, le CITE⁹ sont les suivantes :

Matériaux d'isolation thermique des parois opaques	Caractéristiques et performances
Planchers bas sur sous-sol, sur vide sanitaire ou sur passage ouvert	R ≥ 3 m² K/W
Murs en façade ou en pignon	R ≥ 3,7 m² K/W
Toitures-terrasses	R ≥ 4,5 m² K/W
Planchers de combles perdus	R ≥ 7 m² K/W
Rampants de toiture et plafonds de combles	R ≥ 6 m² K/W

Figure 8: Critères CITE

.

⁹ Le crédit d'impôt transition énergétique. https://www.economie.gouv.fr/particuliers/credit-impot-transition-energetique-cite



2.5.2 Choisir des matériaux pour des parements intérieurs

L'objectif est de compenser la principale perte du corps humain qui est le rayonnement (60% des pertes) par des matériaux favorisant l'émission de rayonnement infrarouge. Les caractéristiques du matériau doivent être un compromis entre :

- faible effusivité,
- faible diffusivité,
- chaleur spécifique élevée,
- une faible densité

2.5.3 Obtenir un déphasage minimum de 12h

L'enveloppe du bâti doit amortir les fluctuations de températures extérieures. La première des actions est de traiter la toiture, cette action a un impact très fort sur le confort d'été. Ce temps de déphasage, c'est-à-dire le temps qui est nécessaire à la chaleur pour traverser un isolant, doit être au moins égal à une demi-journée. Au-dessus de 11h, le gain n'est pas visible en condition d'exploitation réelle.



A titre d'exemple voici le déphasage pour 20 cm d'isolant que l'on peut trouver dans la littérature. Il est à noter que je n'ai pas trouvé de valeur comparative provenant de publications scientifiques.

• 4h : polystyrène expansé, polyuréthane

• 6h : laine de roche, laine de verre

• 10h : liège

• 12h : ouate de cellulose, panneau de laine de bois

Une troisième vient s'y ajouter : le déphasage. Pour le calculer il faut prendre en compte deux autres données, l'oscillation de la température extérieure (T) ainsi que l'épaisseur de matériau mis en œuvre (e).

Les 3 caractéristiques dépendent en grande partie des mêmes valeurs (chaleur spécifique, épaisseur et lambda), il en ressort qu'elles sont donc intimement imbriquées mais expriment des capacités différentes.

2.5.4 Limiter les courants d'air

Ils sont de 2 ordres : les courants d'air générés par des défauts d'étanchéité dans les parois extérieures, et les convections générées par des différences de température entre 2 points d'un même volume.

2.5.4.1 Défaut d'étanchéité

Un courant d'air même minime peut provoquer des moisissures. En effet l'air intérieur ayant une température, une humidité relative et une pression donnée, peut arriver en contact avec une surface de température plus faible. Au contact, l'air se refroidit et la température qu'il atteint dans le voisinage de la surface peut se retrouver en dessous du point de rosée. Il apparaît alors de la condensation dite de surface que l'on peut déterminer grâce au diagramme enthalpique dit de Mollier.

La figure ci-dessous montre l'évolution de l'état de cet air sur le diagramme de l'air humide : pour un air à 20 °C, 50 % d'HR et 101,3 hPa, la condensation apparaît lorsque la température est réduite à 10 °C ou moins (à pression constante).



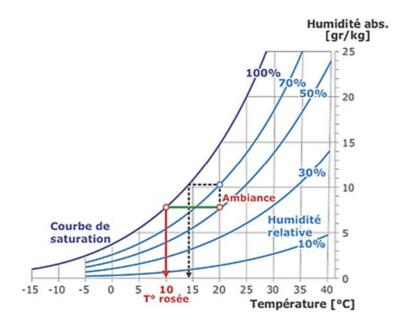


Figure 9: Exemple de représentation sur le diagramme de l'air humide



Figure 10: Cas typique d'une mauvaise étanchéité entre le dormant et le mur





Figure 11: Un traitement adéquat en RT existante 2018 sur Chamonix

Que ce soit en RT2012 ou en RT existante 2018, le frein ou pare vapeur est obligatoire. En zones froides et même si la RT existante 2018 ne le demande pas, il est nécessaire de soigner les liaisons dormant de la menuiserie et frein ou pare vapeur avec le même niveau que pour la RT2012 pour éviter cette condensation.

Il faut, toutefois, là aussi se poser la question du niveau de performance à atteindre selon le type d'habitat et demeurer dans le raisonnable.

2.5.4.2 Convections internes

Durant l'hiver, un courant d'air, même une simple convection, favorise l'évaporation de l'eau de surface de notre peau. Cette évaporation favorise la baisse de température (transformation endothermique) et le ressenti est un inconfort.

Pour les éviter, il faut que les besoins en chauffage soient faibles et résolus par des équipements le moins ponctuels possibles et chauffant par rayonnement plutôt que par convection ou air pulsé. Le pire du pire dans ce domaine étant les chauffages à air pulsé (nous faisons bien la différence entre de l'air pulsé et de l'air renouvelé).



2.5.5 Maitriser son humidité relative

Une mauvaise maitrise de l'humidité relative engendre les désagréments suivants :

- Un surcoût de chauffage : Il est beaucoup plus coûteux de chauffer de l'eau que de chauffer de l'air sec, en effet la capacité thermique de l'eau (1.163 Wh/m³.K) alors que celle de l'air est de 0,34 Wh/m³.K.
- **Pathologie du bâtiment** : Un air humide génère plus facilement de la condensation donc de la moisissure sur et dans les parois.
- **Pathologie humaine** : Les bactéries, y compris pathogènes, se développent plus facilement dans un milieu tempéré et humide.

L'humidité a une influence importante, directe et indirecte sur le confort. L'influence directe résulte du fait que l'eau est le vecteur d'échange entre l'air et la peau. Un air sec captera moins de calories par contact direct avec un élément qu'un air humide. L'influence indirecte résulte du fait qu'un élément humide transporte plus rapidement les calories.

Stabiliser l'humidité relative aux environs de 50 à 55%.

Afin de remédier à ces problèmes nous avons fort heureusement beaucoup de solutions.

2.5.5.1 La VMC

Dans les bâtiments RT2012 ou les rénovations RT Existante 2018, la VMC est la grande oubliée du dispositif énergétique / confort / pathologie du bâtiment. La perspirance de l'enveloppe extérieure ne suffit pas à évacuer les pics d'humidité. De plus une VMC moderne régule son débit non seulement avec le taux d'humidité mais aussi avec les taux de CO2 et de COV (Composés Organiques Volatils). La VMC devrait être obligatoire et planifiée dès la programmation des travaux.

2.5.5.2 L'utilisation d'isolants sont hydrophiles

Certains matériaux isolants sont hydrophiles. Par exemple la ouate de cellulose a la capacité d'absorber l'humidité ambiante, ce qui permet de réguler l'atmosphère environnante et de créer un confort de vie supplémentaire inconnu avec les laines minérales. Quand l'atmosphère s'assèche, la ouate de cellulose restitue l'humidité stockée sans être altérée. Le processus se produit à chaque changement du taux d'humidité et de la variation de la pression de l'air ambiant. La ouate de cellulose est un excellent régulateur d'humidité de l'air. Cette propriété particulière des isolant biosourcés végétaux ne diminue en rien les performances thermiques dans le temps contrairement aux isolants minéraux.

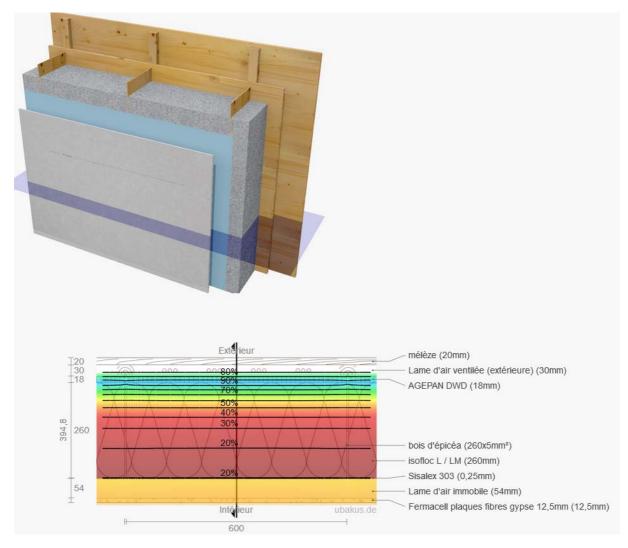
2.5.5.3 La maitrise de la perspirance

C'est la propriété d'une paroi à laisser passer l'humidité de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment afin qu'elle s'évapore lorsqu'elle arrive de l'autre côté. Cette capacité est nécessaire pour évacuer la vapeur d'eau générée par les occupants dans une habitation, environ 2,5 l d'eau /jour/personne.

Voici deux exemples de construction d'habitation personnelle de charpentiers de la vallée de Chamonix sur lesquelles iLanga est intervenue.

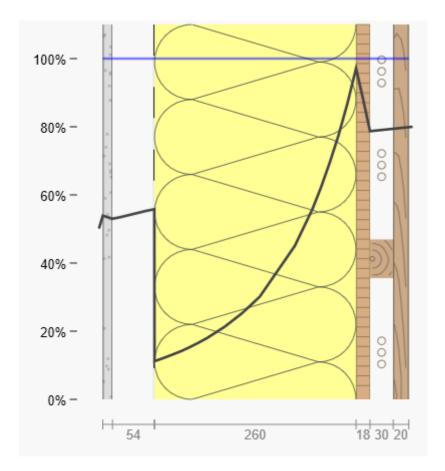


Exemple d'une construction saine d'environ 320m² de SRT, à 1100m d'altitude, côté ubac, contre une rivière, et sous les 20 kWh/m²/an depuis 2 ans. L'intervention iLanga portait sur la STD, la perspirante, le déphasage, l'aéraulique et la mise en œuvre de l'isolation.



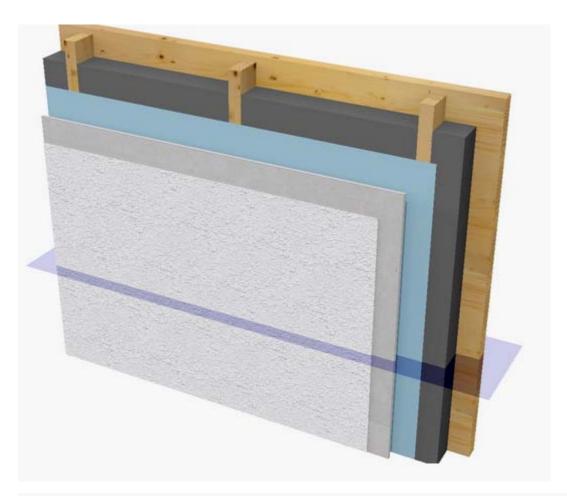
Ce complexe n'est pas conforme au DTU et agréments techniques car il utilise un frein vapeur sd=5 alors que nous devrions être sous les sd≥18. Cette valeur de sd=5 permet une migration rapide de l'humidité vers l'extérieur.

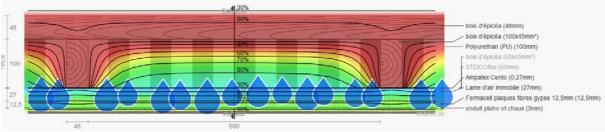




Exemple d'une construction malsaine d'environ 200 m² de SRT, à 1000 m d'altitude, côté adret. iLanga a refusé de travailler sur ce dossier car le principe constructif imposé par le propriétaire, charpentier de métier, ne peut pas fonctionner. Nous avons uniquement fait l'étude de la perspirance pour prouver nos dires.



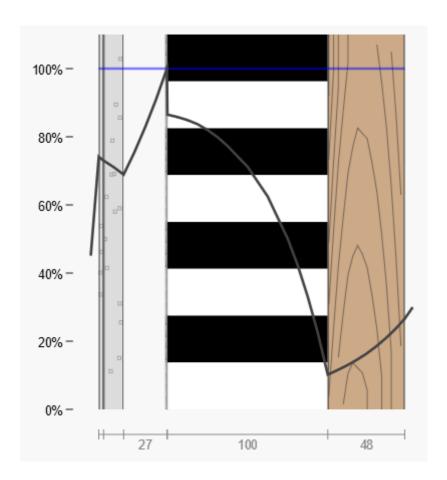




Les défauts majeurs sont :

- Une absence de perspirance. Les matériaux sont environ 5 fois plus fermés que 20cm de béton banché.
- Des ponts thermiques au niveau du lambourdage.
- Des points de rosée qui se situeront principalement autour des lambourdes.





2.5.6 Chauffer pour compenser

Si tout ce qui précède n'a pas suffi, il faudra chauffer pour compenser. Même une maison passive de 250m2 dans la vallée de Chamonix aura besoin de son chauffage, certes il fera 2 ou 3 kW et sera utilisé 100h par an, soit un maximum de 300kWh ou 45€ d'électricité.

2.6 Atteindre un retour sur investissement raisonnable

Il est infiniment plus simple de faire des habitats à 10 kWh/m²/an avec un retour sur investissement supérieur à 200 ans que de faire un bâti à 25 kWh/m²/an pour le coût d'un bâtiment RT2012 (donc à 60 kWh/m²/an dans notre région). En 2010, le dirigeant d'iLanga a conçu et réalisé un prototype de bâtiment de 250 m² de SRT dans la vallée de Chamonix qui est monitoré tous les mois. Ce bâtiment oscille entre 2.9 et 6.8 kWh/m²/an sans aucun surcoût par rapport à un bâtiment RT2012. C'est donc tout à fait possible mais il y a des grands changements de paradigmes à opérer :

- Il faut une conception bioclimatique poussée et surtout ne pas oublier que le confort d'été est tout aussi important que le confort d'hiver.
- C'est beaucoup plus facile de faire ce genre de bâtiment en altitude pour être audessus de la couche d'inversion et profiter des rayons du soleil.
- Il faut faire des entorses aux DTU et agréments techniques, aussi mineures soientelles. Cf §2.5.5.3 « La maitrise de la perspirance » ci-dessus.



- Il faut accepter de reporter l'intégralité du budget chaleur (producteur de chaleur et émetteur de chaleur) dans la conception, l'isolation et des menuiseries ultra performantes. Adieux les feux de cheminée.
- Il faut réinventer l'usage du bâtiment durant l'hiver : Le sas d'entrée est inhabituel dans notre pays, il y a beaucoup de châssis fixes, il ne faut pas ouvrir les menuiseries et faire confiance à la VMC double flux thermodynamique.



Figure 12:Les termites sont les meilleurs architectes bioclimatiques du monde

En résumé, c'est 100% possible de faire un retour sur investissement dès le premier jour mais il faut repenser notre mode constructif, avoir la conviction que la physique du bâtiment est plus importante que les normes, et que nous devons rester très humbles et tenter de nous rapprocher des connaissances d'une termite Australienne.

2.7 Les lambdas (conductivité thermique)

2.7.1 La mesure du lambda



Le CTMF permet de mesurer la conductivité thermique de tous les matériaux isolants tels que les polystyrènes, polyuréthanes, laines minérales, la terre cuite/crue, les céramiques, les plastiques, les bois, les supers isolants et bien d'autres encore.



Le principe du CTMF repose sur la méthode fluxmétrique qui consiste à produire un gradient de température suivant l'épaisseur de l'échantillon à caractériser et de mesurer le flux de chaleur qui le traverse.

La différence de température entre les deux faces de l'échantillon est appliquée grâce à des thermo-éléments spécifiquement dimensionnés.

Le flux thermique est mesuré par des thermopiles selon les normes citées. L'ensemble est dimensionné pour recevoir des éprouvettes de 150 x 150 mm et de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur.

2.7.2 Les valeurs mesurées

La valeur déclarée λMn est la valeur mesurée par le lambdamètre pour le test n. Le protocole nécessite en effet plusieurs cycles de mesures pour corréler les résultats.

2.7.3 La valeur déclarée

La valeur déclarée λD d'un matériau de construction est généralement fournie par son fabricant. Cette valeur est certifiée sur base d'un agrément technique. Elle est obtenue dans des conditions de référence données de température et d'humidité (d'après les principes donnés de la norme EN ISO 10456). Les isolants d'un marquage type ACERMI affichent un λD déjà margé sur leur étiquette. Inutile de prendre des marges supplémentaires.

2.7.4 Les valeurs de calcul

À partir de cette valeur λD , il est possible de déduire les valeurs de calcul de la conductivité thermique λU , i et λU , e. Ces valeurs sont en fait recalculées pour des conditions spécifiques à l'utilisation du matériau (interne ou externe). A titre d'exemple, en Belgique il existe un site officiel qui indique les valeurs λU , i et λU , e de certains matériaux qui peuvent directement être utilisées pour le calcul des performances thermiques des parois.

2.7.5 Les valeurs de calcul par défaut

Des valeurs de calcul λU ,i et λU ,e par défaut peuvent toujours être utilisées lorsque le matériau ne possède pas de valeur λD certifiée ou n'est connu que par sa nature. Ces valeurs sont reprises dans divers tableaux de la réglementation.

2.7.6 Le lambda par défaut

En l'absence de mesures, la règlementation RT2012 définit en annexe 9 des valeurs par défaut.



A N N E X E I X PERFORMANCE PAR DÉFAUT DES ISOLANTS BIO-SOURCÉS

A défaut de pouvoir justifier une valeur de conductivité thermique utile d'un isolant bio-sourcé définie selon les modalités précisées à l'article 8 du présent arrêté, la valeur à utiliser est la valeur par défaut définie dans le tableau ci-après :

TYPE D'ISOLANT		MASSE VOLUMIQUE SÈCHE (r) en kg/m³	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE UTILE (I) en W/(m.K)
Isolants dérivés du bois	Liège défini conformément à la norme NF B 57-000 — comprimé — expansé pur conforme à la norme NF EN 13170 (ICB) — expansé aggloméré au brai ou aux résines synthétiques	r 500	0,10
		100 r 150	0,049
		100 r _s 150	0,049
		150 r 250	0,055
	Panneaux de fibres de bois définis selon la norme NF EN 316	750 r 1 000	0,20
		550 r 750	0,18
		350 r 550	0,14
		200 r 350	0,10
		r 200	0,07
	Panneaux de laine de bois — panneaux de laine de bois agglomérés avec un liant hydraulique, définis conformément à la norme NF EN 13168 — panneaux de laine de bois agglomérés	350 r 450	0,10

Figure 13: extrait de l'annexe IX (https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022959397&categorieLien=id)

2.7.7 En résumé

Le marquage CE ne constitue pas une certification sur le plan thermique. Les isolants disposant uniquement d'un tel marquage sont parfois/souvent testés sur un nombre



d'échantillons faible, insuffisant pour définir une valeur fiable et représentative de la totalité de la production, et parfois/souvent dans des laboratoires non accrédités. Il est d'usage d'appliquer systématiquement une majoration de 15% sur la « conductivité thermique déclarée » (λD) des isolants ne disposant que d'un marquage CE.

2.8 L'instabilité du lambda

2.8.1 L'instabilité du lambda en fonction de la température

2.8.1.1 La norme NF EN ISO 10456

La température retenue pour effectuer les calculs règlementaires de besoins en chauffage est 10°C. Cette température correspond approximativement à la température moyenne de l'isolant dans la paroi (si on considère une température de 20°C à l'intérieur du bâtiment et une température extérieure de 0°C). Le lambda « utile hiver » est donc celui mesuré à 10°C, et c'est à cette température que correspond la valeur donnée sur les étiquettes des isolants industriels.

L'été, la température moyenne de l'isolant est plus élevée. La température « utile » pour estimer le niveau de confort d'été dépend de la paroi considérée puisque le soleil rayonne avant tout sur la toiture. Les calculs règlementaires n'imposant rien sur le déphasage thermique et sur l'affaiblissement de l'onde de chaleur diurne (ces paramètres se calculent en partie à partir de la conductivité thermique), aucune température « utile été » convergée n'a été définie.

Nous utiliserons 23°C comme température « utile été », en sachant que la température moyenne d'un isolant en toiture est supérieure. Cette température présente l'avantage d'être une température pour laquelle nous disposons de mesures en laboratoire (le calcul du lambda « hiver » nécessite des mesures à une température supérieure à 10° C, et c'est à 23° C que sont faites ces mesures additionnelles). Le λ à 23° C n'est pas affiché sur les étiquettes des isolants commercialisés.

Dans la vallée de Chamonix, les températures hivernales passent largement sous la barre de -20°C les nuits anticycloniques. Aussi le λ que nous devrions utiliser est le λ à 0°C. L'été, sous les toits en bac aciers gris anthracite ou sous les lauzes, la température monte facilement à 40°C, aussi c'est le λ à 30°C que nous devrions utiliser.



2.8.1.2 Oak Ridge National Laboratories

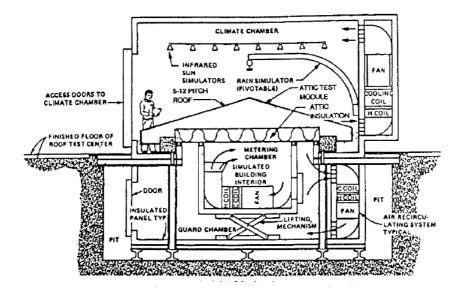
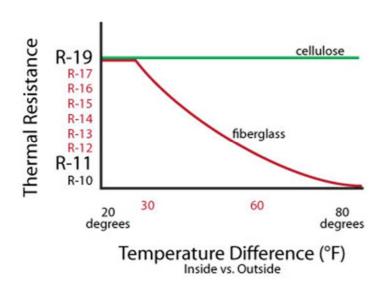


Figure 1 Cross section of the large-scale climate simulator. The climate chamber at the top simulated outdoor conditions, and the metering chamber and guard chamber at the bottom simulated indoor conditions.

Figure 14: Large Scale Climate Simulator (LSCS) at the DOE Roof Research Center (Huntley 1989)

Les températures dans les chambres de mesure et de garde étaient toutes deux contrôlées à un niveau constant de 21°C, tandis que la température dans la chambre climatique était contrôlée à divers niveaux stables entre 7°C et -28°C.

Winter Conditions



Source: 1991 Oakridge National Laboratories

Les résultats de cette étude d'Oak Ridge National Laboratories montrent que la ouate de cellulose a un fonctionnement stable dans les conditions météorologiques que connaît notre région chaque année. Lorsque la température extérieure est de 30°C supérieure à la température intérieure, alors la valeur R perd 50% de sa performance. Il est bien connu que



l'isolation aide à garder votre maison au chaud en hiver, mais elle aide également à garder votre maison au frais en été. Comme les murs isolés d'une glacière, une bonne isolation maintient votre climatisation à l'intérieur. Vous avez besoin de votre isolation pour continuer à maintenir sa valeur R dans des températures chaudes et froides, si vous voulez être à l'aise toute l'année.

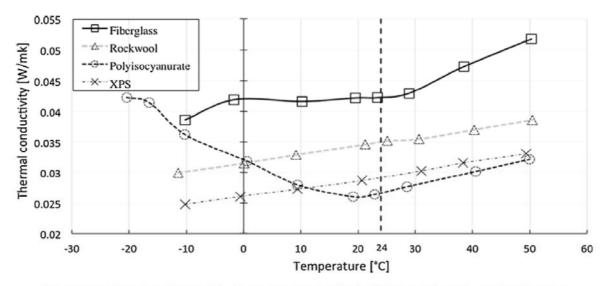


Fig. 3. Temperature dependency of the thermal conductivity for the four materials investigated in this paper.

Figure 15: Umberto Berardi

2.8.2 L'instabilité du lambda en fonction de l'humidité

La variation d'humidité relative fait passer la conductivité thermique de celle de l'air sec $(\lambda air = 0.026 \text{ W/m}^{-1}.\text{K}^{-1})$ à celle de l'eau $(\lambda eau = 0.600 \text{ W/m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

L'humidité relative de l'air « utile » pour l'hiver a été normée à 50%. Le lambda affiché sur les étiquettes des isolants commercialisés est donné pour 50% d'humidité relative. Pour l'été, on utilisera la même valeur, par défaut, aucune valeur n'étant normée.

Comme indiqué en §2.4.1 « La conduction thermique » la conduction thermique évolue avec l'humidité et selon la relation $\lambda=k\lambda_0e^{0.08H}$ Cette relation est normée pour l'ensemble des matériaux, mais dans la réalité cette relation est unique par matériau.

Exemple pour la laine de cellulose,

 $\lambda(10, \text{à sec}) = 0.0375 \,\lambda D(23,50) = 0.039 \,\lambda D(23,80) = 0.040 \,\lambda(\text{utile}) = ISO \,10456:2007$

Une étude Indienne réalisée par S. K. Jha et AmarSingh, publiée en 2007 dans le journal « Journal of agricultural engineering vol 44 », sur de la balle de riz de variété « Padmini », se penche sur les propriétés physiques et thermiques de la balle de riz.



La conductivité thermique augmente linéairement avec son taux d'humidité. L'évolution a été évaluée dans une plage de taux d'humidité d'environ 5% à 35% (masse humide). L'effet du taux d'humidité est important.

Les traitements (acide ou alcali) font diminuer légèrement la conductivité thermique, mais ne modifient pratiquement pas la dépendance de la conductivité en fonction du taux d'humidité.

Les résultats de l'étude sont synthétisés dans le tableau suivant et dans le graphique situé en dessous.

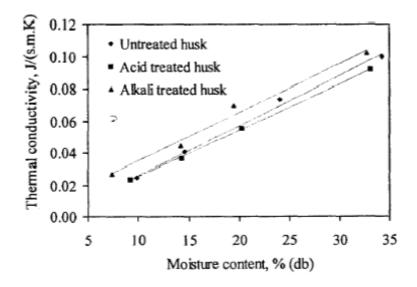


Fig. 6: Effect of moisture content on thermal conductivity of untreated and treated husk

Figure 16: Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux d'humidité

2.8.2.1 Tous les matériaux ne sont pas égaux face à $\lambda = k \lambda_0 e^{0.08H}$

La thèse «Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-humidité dans un isolant biosourcé¹⁰» de Mohammad Aghahadi démontre que le caractère fortement hydrophile des isolants thermiques biosourcés, a montré que les modèles classiques de transfert thermique ne sont pas suffisamment adaptés pour leur caractérisation thermique. En effet, en raison de leur caractère hydrophile, les fibres végétales peuvent absorber l'humidité ambiante en se gonflant et leurs performances d'isolation thermique s'en trouvent modifiées.

¹⁰ Mohammad Aghahadi. Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-Humidité dans un isolant biosourcé. Thermique [physics.class-ph]. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. Français. NNT:2019UBFCA007



2.8.3 L'instabilité du lambda en fonction de la densité

L'évolution de la conductivité thermique avec la densité a fait l'objet d'une étude aux Etats-Unis (« Apparent Thermal Conductivity Data and Related Information for Rice Hulls and Crushed Pecan Shells11 »).

La ou les variétés de riz utilisées pour cette étude ne sont pas mentionnées. Les mesures effectuées par le laboratoire RDS (R&D Service) ont été faites avec du riz étuvé provenant de chez Riceland¹², alors que les mesures faites par l'ORNL¹³ ont été faites avec du riz non étuvé.

Les mesures effectuées au RDS ont été faites à partir d'échantillons passés en étuve et stabilisés dans les conditions suivantes : $21 \pm 3^{\circ}$ C et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative. Ces mesures ont été faites dans le cadre de la construction de la «The Rice Hull House¹⁴ », en 2004, aux Etats-Unis. La résistance thermique de balle de riz étuvé a été testée selon la méthode ASTM C518, à 24°C. La densité correspondante aux résultats a elle aussi été mesurée.

Les mesures effectuées à l'ORNL ont été faites dans 2 conditions différentes :

- à partir des échantillons bruts (tels que reçus), non passés en étuve : densité 168.2 kg/m3, soit environ 9.4% d'humidité.
- à partir de ces mêmes échantillons passés en étuve 6 jours à 70°C et 2 jours à 103/104°C : densité 153.8 kg/m3.

La figure suivante compare la conductivité thermique pour différentes densités, et températures, telle que mesurée par 2 laboratoires.

¹¹

https://www.researchgate.net/publication/237295553_Apparent_Thermal_Conductivity_Data_and_Related_I nformation for Rice Hulls and Crushed Pecan Shells

¹² https://www.riceland.com/

¹³ https://www.ornl.gov/

¹⁴ "The Rice Hull House" by Paul A. Olivier, Ph.D.



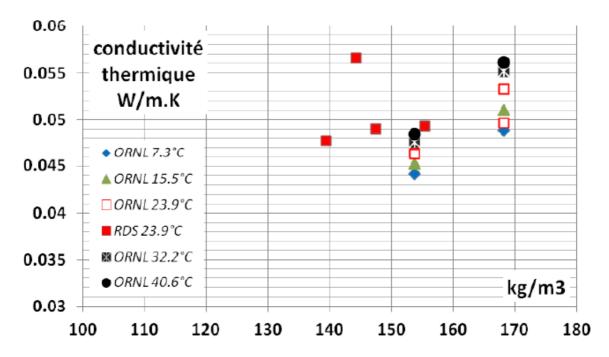


Figure 17: Comparaison de la conductivité thermique pour différentes densités, et températures, telle que mesurée par 2 laboratoires

Il en va de même pour tous les matériaux isolants. Ainsi lorsque Claude Lefrançois était Directeur technique et directeur de la formation chez ISOFLOC¹⁵ France, il a pu mettre en évidence, avec le même équipement de production mais avec des sources plus ou moins qualitatives des λ allant de 0.036 à 0.043. La différence résidait dans la densité du produit en fonction des sources de papier recyclé.

2.8.4 L'instabilité du lambda en fonction de la direction

Un des éléments que montre la thèse de Doctorat de HUMAISH Hussein Hafudh, intitulée « Etude de techniques de mesure pour la caractérisation thermique de matériaux isolants du bâtiment » est que le λ peut varier considérablement en fonction de la direction des flux thermiques dans des isolants du type laine minérale.

-

¹⁵ ISOFLOC est une société Suisse, le leader européen de la ouate de cellulose.



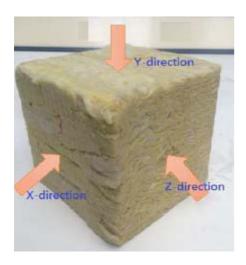


Figure 18: Les directions X, Y et Z des flux

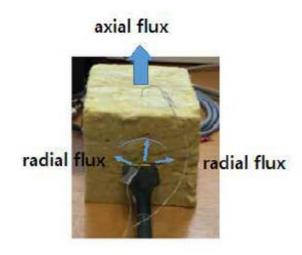


Figure 19: Echantillon utilisé pour le test



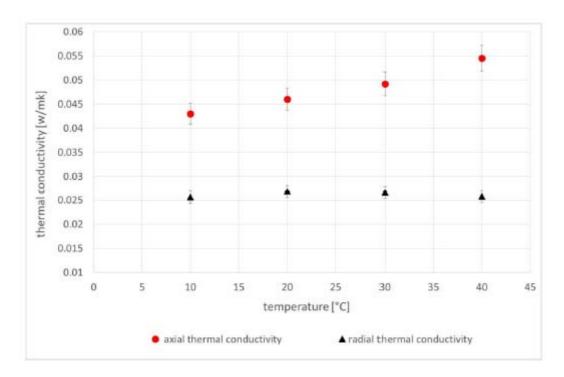


Figure 20: Mesure du λ en axial vs radial

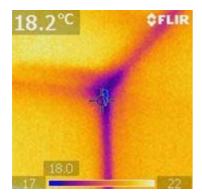


Figure 21: L'impact d'un flux axial dans un angle

Il en résulte une variation moyenne du simple au double entre le λD sur le flux radial et le λ mesuré sur le flux axial. Ce problème est présent dans tous les angles de mur et lorsque l'artisan place des chutes avec une rotation de 90°.

2.8.5 L'instabilité du lambda dans le temps

Nous rentrons ici dans un domaine où il existe très peu de publication scientifique. Cependant par expérience dans notre région toutes les laines minérales se tassent passé les 10 ans et nous voyons avec la caméra thermique un tassement de 2 à 4% passé les 15 ans.



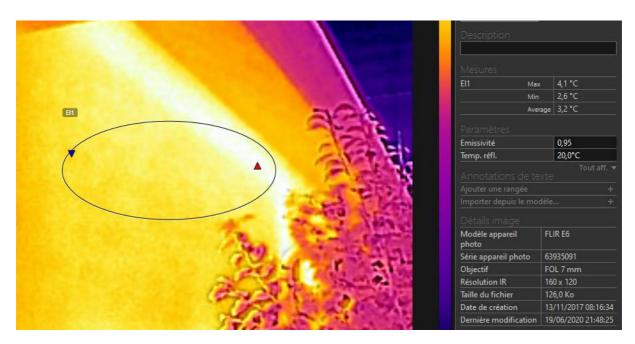


Figure 22: Tassement d'une laine minérale

Ce tassement intervient bien plus tard dans les régions chaudes, aussi iLanga a fait l'hypothèse que dans les région froide, l'humidité contenu dans l'isolant se condense puis gèle. L'élongation de la fibre minérale la fracture jour après jour, il en résulte une plus faible tenue structurelle et un tassement au fil du temps. Ce tassement diminué l'air contenu dans l'isolant et augment sa densité et par la même occasion augmente la valeur du λ . Pire l'espace laisser libre en haut de l'isolant devient un pont thermique. Cette hypothèse d'un des facteurs de tassement est corrélée par la publication "Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool¹⁶" de Tomáš Vrána est le résultat de 3 ans de recherche. Cette publication décrit une augmentation de la densité de l'isolant sur les zones exposée à des température inférieure à 0°C.

-

¹⁶ "Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool" par Tomáš Vrána, 2007, ISRN-KTH-BYT/R-07/200-SE, ISSN 1651-5536, ISBN 91-7178-637-1, KTH – The Royal Institute of Technology School of Architecture and the built Environment, Div. of Building Technology, Brinellvägen 34, SE-100 44 Stockholm



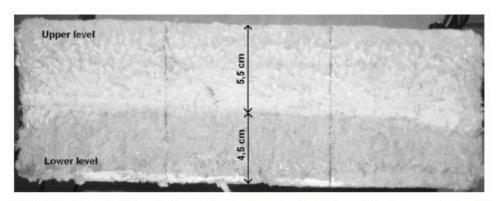


FIGURE 24: Frost formation (upper level) and the region of condensation (lower level) in the specimen A. The bottom surface of the lower level seems to be saturated by condensate, which could drain out of the material.

Les matériaux ne sont pas tous égaux face à cette augmentation de la densité avec le temps. Par exemple la ouate de cellulose appliqué avec la technique du projeté humide ne se tasse pas, car lors de la pose, l'humidité fait ressortir l'amidon des fibres qui en séchant constitue une colle. Le produit est alors stabilisé. De plus lors du gèle de la vapeur d'eau condensée, la fibre s'allonge puis revient à sa forme initiale lors du dégèle. En effet vous n'avez jamais vu de brin d'herbe brisé par une gelée matinale.



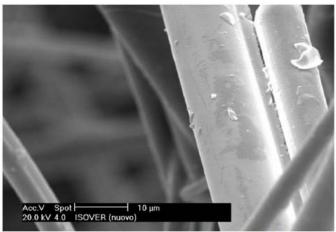


Fig. 6. Morphology of fibers of the new sample (N3)

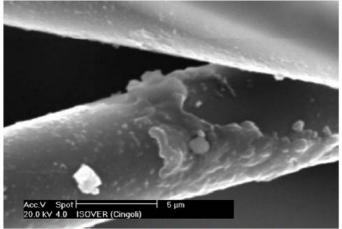


Fig. 7. Morphology of the fibers of aged sample (C3)

La publication « Degradation of glass mineral wool insulation after 25 years in Masonry Cavity Walls» de Francesca Tittarelli, Francesca Stazi, Giacomo Politi, Costanzo di Perna, and Placido Munafò émet l'hypothèse d'une dégradation chimique de la fibre. Voir ci-dessous :

$$\text{WC} \stackrel{\text{O}}{\underset{\text{OM}}{\longrightarrow}} \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{WC} \stackrel{\text{O}}{\underset{\text{OH}}{\longrightarrow}} \text{HO } \text{W}$$

Figure 23: Réaction de dépolymérisation

La plus grande sorption hygroscopique du vielle échantillon pourrait être causée par une dépolymérisation partielle par hydrolyse du liant polymère de la laine de verre causée par la présence d'humidité. Ce processus a provoqué la formation de groupes –OH conduisant à une diminution de l'hydrophobicité du matériau.

2.8.6 Conclusion sur l'instabilité du lambda

La résistante thermique (R) est omni présente dans la réglementation et il est demandé une précision extrême lors de la mise en œuvre d'un isolant. En effet à 1 cm près un bâtiment peut passer à côté des aides de l'état (TVA, CEE, CITE, etc), pourtant il n'y a pas un λ mais des λ déclarés, il n'y a pas un λ fixe mais un λ qui varie au gré de la température, de l'humidité, de la densité, de la direction des fibres et du vieillissement de l'isolant. La résistance thermique que nous vendent les thermiciens et les distributeurs n'est qu'un ordre de grandeur qui ne correspond pas à la réalité de nos bâtiments. Ce λ est d'autant plus fluctuant que les amplitudes de température sont grandes. De plus ce λ ne varie pas de la même manière suivant les familles d'isolants. Par ordre croissant, les impacts sur les performances du λ sont l'humidité, la température, l'orientation des fibres, la densité puis l'âge.

Dans un monde rationnel, ou dans une logique d'obligation de moyens il faudrait comprendre et modéliser d'une manière détaillée et exhaustive le paramètre λ . Il faudrait aussi faire de même sur tous les paramètres constituant les caractéristiques d'un isolant. Il faudrait caractériser tous les isolants sur leur performance mais aussi sur leur ACV. L'artisan pourrait alors être remplacé par n'importe quel opérateur humain ou non.



Dans un monde de bon sens, ou dans une logique d'obligation de résultat, nous nous baserions sur les connaissances transmises par nos ainés, sur le choix simple et adéquat des critères de la bonne isolation. Nous serions jugés que sur la consommation thermique du bâtiment et le confort des occupants.

Dans la réalité il faut savoir faire le grand écart entre ces deux extrêmes. Il faudrait obtenir des λ mesurés à 50% HR, à 0°C, 10°C, 23°C et 30°C. A titre d'exemple une de mes sœurs habite dans le nord du Canada et chez elle il est ridicule voir dangereux de porter un bonnet en tissu, seules les toques en fourrure remplissent leur office par grand froid. Il en va de même pour les isolants, dans des conditions difficiles refaisons confiance aux isolants biosourcés.

Les raisons pour lesquelles les constructions isolées en biosourcés sont si confortables et économes en énergie sont les suivantes :

- 1. Le λ d'un isolant biosourcé ne fluctue que très peu sur la plage de λ 0 et λ 30, contrairement à une laine minérale qui peut voir son λ multiplié par 2 à λ 0.
- 2. Les caractéristiques hygrophiles et de perspirance d'un biosourcé permettent de diffuser la vapeur d'eau uniformément dans la masse de l'isolant et ainsi d'accélérer son rejet à l'extérieur du bâtiment. Ainsi le λ est moins impacté que dans un isolant qui retient l'eau localement et plus longtemps.
- 3. Concernant la ouate de cellulose, la technique de mise en œuvre qu'utilise iLanga est le projeté humide. C'est une technique nécessitant beaucoup de savoir-faire, est plus lente que les techniques d'insufflation ou de soufflage mais qui présente beaucoup d'intérêt. Le projeté humide ne se tasse pas, car lors de la pose, l'humidité fait ressortir l'amidon des fibres qui en séchant constitue une colle. Le produit est alors stabilisé et donc le λ ne varie pas par changement de densité.
- 4. Les biosourcés sont stables dans le temps. A titre d'information une de ses plus anciennes utilisations et des plus célèbres aussi est la résidence de Thomas Jefferson, $3^{\text{ème}}$ président des Etats Unis d'Amérique à Monticello, Virginie qui date de 1770. L'isolation en ouate de cellulose en projeté humique ne s'est jamais tassée donc le λ ne s'en trouve pas perturbé.



3 Complément de Bibliographie

J'ai utilisé d'autres publications scientifiques listées ici

Kenneth E. Wilkes is a research staff member and Phillip W. Childs is a research technician at Oak Ridge National Laboratory, Ridge, TN.

HUMAISH Hussein Hafudh Thèse de Doctorat « Etude de techniques de mesure pour la caractérisation thermique de matériaux isolants du bâtiment » Université de Picardie Jules Verne

Mohammad Aghahadi Thèse de Doctorat "Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-Humidité dans un isolant bio-sourcé. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. NNT:2019UBFCA007

Umberto Berardi & Matteo Naldi "The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance" Engineering and Architectural Science, Ryerson University, 325 Church Street, Toronto, ON M5B 2K3, Canada

Nakisa Alborz ^a **and Umberto Berardi** ^b "A post occupancy evaluation framework for LEED certified U.S. higher education residence hall" a) Wentworth Institute of Technology, 550 Huntington Avenue, Boston, MA, 02109, USA. B) Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, M5B2K3, Canada.

K.E. Wilkes, Ph.D., P.E. and P.W. Childs "Thermal Performance of Fiberglass and Cellulose Attic Insulations"

4 To_see

Exemple pour la laine de cellulose,

 $\lambda(10, \text{à sec}) = 0.0375 \,\lambda\text{D}(23,50) = 0.039 \,\lambda\text{D}(23,80) = 0.040 \,\lambda(\text{utile}) = \text{ISO } 10456:2007$