

LES BONNES
PRATIQUES
DE L'ISOLATION

LE CONFORT D'ÉTÉ : les solutions fraîcheur



édito

Le confort chez soi, l'hiver, est obtenu dans une maison bien isolée et chauffée juste ce qu'il faut.

À lire de nombreuses publications, nous aurions gagné la bataille du confort, l'hiver, mais perdu celle de l'été.

Nombreux sont ceux qui vantent la douce fraîcheur des bâtiments anciens les jours les plus chauds en oubliant de dire combien ils étaient frais l'hiver aussi...

L'isolation est devenue le symbole du confort, l'hiver, mais qu'en est-il l'été ?

Les études sur le confort d'été sont en général partielles et les analyses qui en sont faites sont pour la plupart fausses, tout du moins en ce qui concerne certains paramètres. Si la conception bioclimatique (l'intérêt de l'orientation de la maison, des protections solaires...) n'est plus discutée, trop d'approximations pilotent le choix de l'isolation, l'été.

Dans ce guide, nous allons donc apporter des clarifications sur les paramètres qui gèrent le confort d'été au niveau de la maison et vous recommander de travailler sur les paramètres les plus importants.

Vous découvrirez pourquoi l'isolation isole du froid et du chaud pour votre confort toute l'année.

sommaire

- PAGE **04** Qu'est ce que le confort ?
- PAGE **05** Le confort, l'été
- PAGE **06** Étude d'une maison
- PAGE **08** Les résultats de l'étude d'une maison
- PAGE **12** Conclusions sur l'étude d'une maison
- PAGE **14** Étude sur un comble aménagé
- PAGE **15** Conclusions sur un comble aménagé
- PAGE **16** Étude d'une paroi
- PAGE **18** Annexe 1 : définitions
- PAGE **22** Annexe 2 : détails des résultats des simulations

Qu'est ce que le confort ?



La notion de confort est d'abord culturelle. Chaque société a su au cours de son histoire, développer les stratégies vestimentaires et les formes d'habitat les plus adaptées à son climat et à son mode de vie. Mais la perception du confort est fortement soumise à des facteurs psychologiques et physiques, c'est-à-dire liés à chaque individu.

Il n'est pas inutile de rappeler que l'âge, le sexe, l'état de santé ou de fatigue ainsi que l'activité au cours de la journée font varier considérablement la capacité des individus à s'adapter aux variations des paramètres liés au confort : température, rayonnement solaire, humidité, vitesse de l'air, ...

Nous passons beaucoup de temps à l'intérieur. Si la climatisation a pris une place parfois importante dans nos bâtiments, cela tient à **l'évolution de nos modes de vie et à la confiance "trop grande" accordée à la technologie au détriment de règles de conception des bâtiments.**

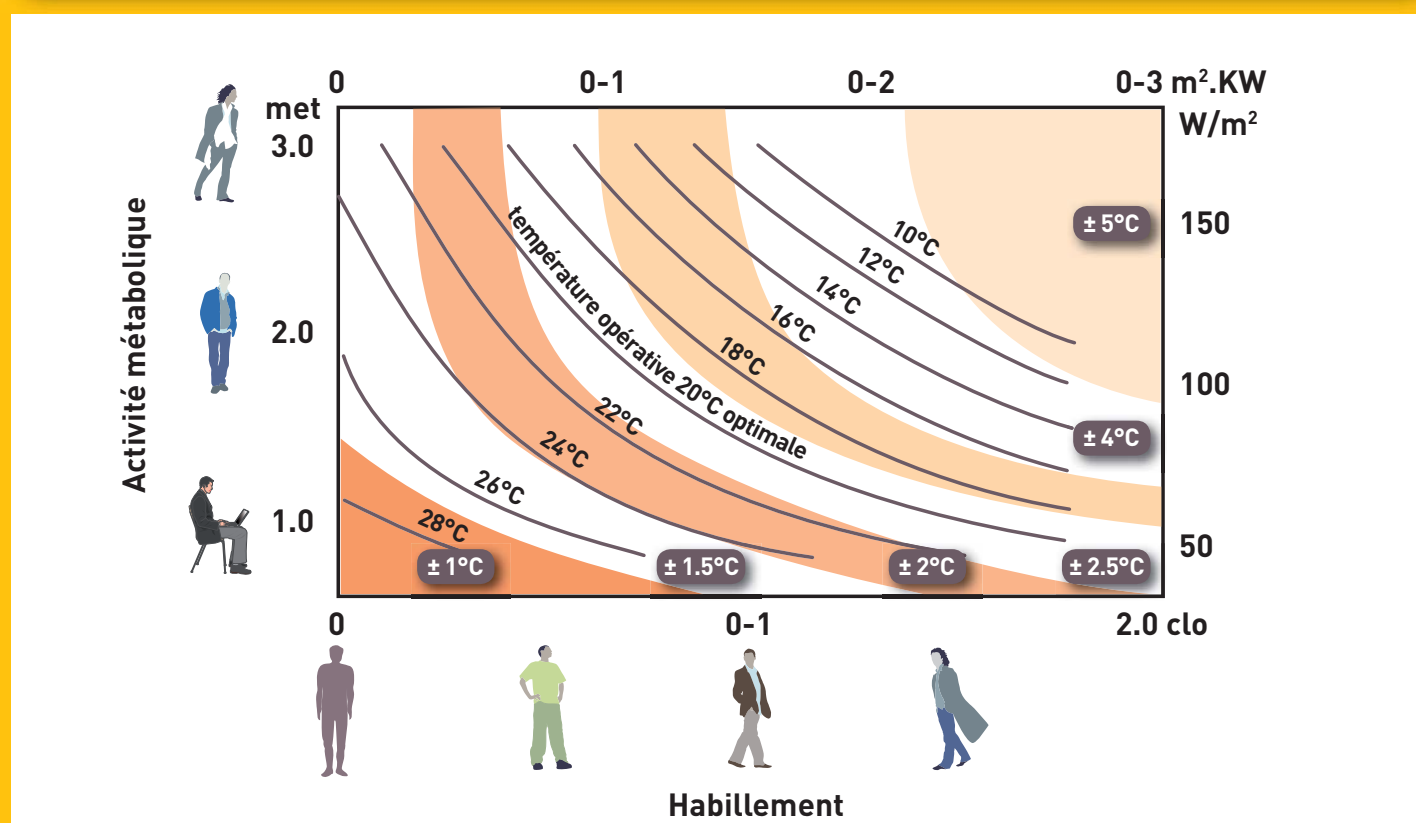
 **Les principaux paramètres scientifiques qui influent sur le confort d'été dans le bâtiment sont :**

- La température de l'air et la température des parois,
- L'humidité de l'air,
- La vitesse de l'air,
- Le renouvellement de l'air du local occupé.

Le confort résulte de la capacité à maîtriser l'ensemble de toutes ces composantes pour que les personnes se sentent bien.

La conception des bâtiments (orientation, protection des façades et des vitrages, ...) a un impact sur la variation de ces paramètres mais l'occupation (nombre de personnes et activités), l'usage des équipements (éclairage artificiel, ordinateurs, ...) et la gestion des conditions d'ambiance (gestion de la ventilation et des températures de consigne en fonction de l'occupation) sont autant d'éléments qui concourent à la réalisation effective des conditions de confort.

La température optimale d'une pièce en fonction des activités et de l'habillement des occupants selon la norme EN ISO 7730 est représentée à gauche sur la figure.



Dans les documentations ou ouvrages traitant de la question du confort d'été, l'intérêt de l'orientation de la maison, de l'inertie de la structure et des protections solaires font consensus. Par contre, au niveau de **l'isolation**, les conclusions sont en général hâtives.

Nous avons donc voulu réétudier le sujet à tous les niveaux de la construction : le bâtiment entier, un comble aménagé et une paroi simple.

Pour apporter des réponses, les adhérents du FILMM ont conduit plusieurs études* en faisant varier tous les paramètres possibles pour en tirer des enseignements quant à leur influence (sens et importance de la variation) sur le confort d'été.

Conclusion et recommandations

Les facteurs influents

L'ensemble des études permet de mettre en évidence les paramètres les plus influents sur la température intérieure en été dans une maison :

- La présence de protections solaires
- La présence d'une ventilation nocturne
- L'inertie du plancher intermédiaire
- Le niveau d'isolation thermique

La clé du confort d'été passe par la combinaison de protections solaires extérieures sur les fenêtres, la mise en place d'une ventilation la nuit, dont le débit dépend des conditions climatiques extérieures, la présence de plancher intermédiaire (et haut) avec une forte inertie et un très bon niveau d'isolation de la toiture (résistance thermique de l'isolant > 8 m².K/W).

Le déphasage : un paramètre secondaire

Au niveau de la paroi, le calcul permet d'obtenir des déphasages très différents en fonction de la masse volumique et la nature de l'isolant (de 1 à 5 heures) (page 17).

Mais ces déphasages ne se retrouvent pas quand on prend en compte le comble ou la maison.

Un écart de déphasage d'environ 3h20 sur une paroi peut se résumer à un écart de 2h40 sur une maison (page 8).

De plus, dans ce même exemple, ce déphasage n'apporte qu'un gain de température de 0,2°C dans l'ambiance intérieure de la maison (page 9).

Une isolation haute performance

La toiture est la partie du bâtiment qui reçoit le plus de rayonnement solaire. Une isolation haute performance ($U_p < 0,14$) est connue pour limiter les déperditions l'hiver mais elle permet aussi de limiter la pénétration de la chaleur dans les combles. Elle ne doit donc pas être négligée dans le Sud de la France.

Il est très intéressant de noter qu'il n'y a pas de contradiction dans la stratégie d'économies d'énergie et le confort d'été (pages 12 et 13).

* Les études sont disponibles sur le site www.filmm.org.

Étude d'une maison

SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE DANS UNE MAISON DU SUD DE LA FRANCE

Le but de la présente étude est d'analyser les différentes variables qui peuvent avoir une incidence sur le confort d'été dans une maison non climatisée ainsi que sur les économies d'énergie possibles dans des bâtiments climatisés.

Une maison individuelle, dans le sud de la France, avec combles aménagés a été choisie pour que les conclusions puissent être applicables sur l'ensemble du territoire français.



 **La méthodologie et les principales hypothèses sont décrites ci-dessous :**

> MÉTHODE

*La méthode choisie est la modélisation numérique à l'aide du logiciel ENERGY+ (validé selon ASHRAE 140)
Deux cas sont étudiés :*

- Pour les bâtiments non climatisés, la modélisation est faite pour trouver la température en oscillation libre (sans aucun système de climatisation). On cherche les températures maximales de l'air intérieur dans l'étage du comble dans chaque simulation et on comptabilise les heures au cours desquelles la température est supérieure à 26°C (température minimale pour installer une climatisation).
- Pour les bâtiments climatisés, un calcul sur les besoins en énergie (à ne pas confondre avec la consommation énergétique) est fait pour une période d'une année avec les températures de consigne à 20°C pour les mois d'octobre à mai et une consigne de 26°C pour les mois de juin à septembre. Les résultats retenus sont les besoins de chauffage, climatisation et total pour la partie « combles » du bâtiment.

> PÉRIODE DE CALCUL

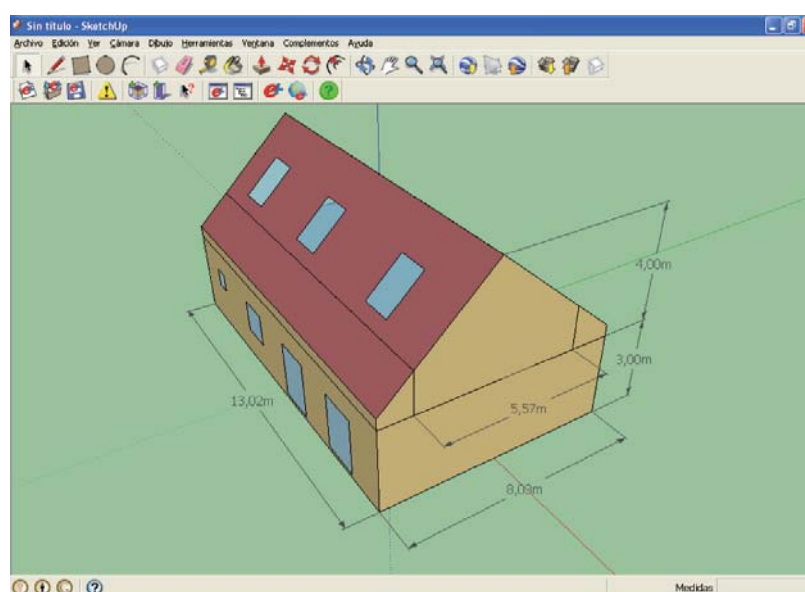
- Pour les bâtiments non climatisés, c'est la période du 01-07 au 07-07 qui a été prise pour toutes les modélisations (168 heures) d'une année typique (une semaine chaude mais pas forcément la semaine la plus chaude).
- Pour les bâtiments climatisés, on a pris la période de calcul d'une année (8 760 h).

> FICHER CLIMATIQUE

- Fichier climatique disponible sur le site ENERGY+ pour Marseille (www.energyplus.gov).

> GÉOMÉTRIE

- La géométrie de la maison M12 RdC+Combles (voir annexe)



Façade Sud et Est

> PROFILS D'OPÉRATION

- La moyenne journalière totale des apports internes est de 5,457 W/m².

> VENTILATION / INFILTRATION D'AIR

- Le renouvellement d'air par la ventilation est pris à 0,5 volume par heure. Pendant l'été, lorsque la température intérieure est supérieure à l'extérieur (free cooling), les calculs ont été menés avec un renouvellement d'air supplémentaire à une hauteur de 5 volumes par heure (ouverture des fenêtres). Par contre, la ventilation par ouverture des fenêtres n'est pas possible si l'air extérieur monte à une température supérieure à 27°C. On considère que la ventilation du rez-de-chaussée et du comble sont indépendantes l'une de l'autre.

> PROTECTION SOLAIRE

- La maison dispose de volets qui peuvent se fermer à 70% et ils sont utilisés dans la période chaude (mai à septembre) dès que le rayonnement incident sur une fenêtre arrive à 75 W/m².

> INERTIE THERMIQUE INTERNE

- L'inertie thermique interne est considérée à un niveau de 20 kJ/m².K.

> CARACTÉRISTIQUES CONSTRUCTIVES DU CAS DE BASE

■ FAÇADES

MAÇONNERIE + DOUBLAGE :

	Epaisseur cm	Lambda W/m.K	Masse volumique Kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K
Enduit	1,5	1	1 700	1 000
Bloc Béton	20	0,87	1 000	1 000
Isolant R=2,85	10	0,035	20	1 030
Pare-Vapeur	--	--	--	--
Plaque de plâtre	1,5	0,25	800	1 000

■ PLANCHER BAS

DALLE SUR LE TERRAIN AVEC ISOLANT SOUS LE DALLAGE

	Epaisseur cm	Lambda W/m.K	Masse volumique Kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K
Béton	1,5	2	2 400	1 000
Isolant R=1,50	5	0,034	35	1 400
Mortier	4	0,7	1 700	1 000
Grès céramique	2	1,9	2 300	1 000

■ TOITURE

ISOLATION EN RAMPANT

	Epaisseur cm	Lambda W/m.K	Masse volumique Kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K
Tuiles	1,5	1,9	2 300	1 000
Lame d'air	3	0,19	1,2	1 008
Ecran de sous toiture	--	--	--	--
Isolant R=5	17,5	0,035	20	1 030
Pare-vapeur	--	--	--	--
Plaque de plâtre	1,2	0,25	800	1 000

■ PLANCHER INTERMÉDIAIRE

PLAFOND LÉGER

	Epaisseur cm	Lambda W/m.K	Masse volumique Kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K
Grès céramique	2	1,9	2 300	1 000
Panneaux bois	3	0,15	600	1 700
Isolant R=2,50	10	0,04	12	1 030
Plaque de plâtre	1,5	0,25	800	1 000

■ FENÊTRES

Les fenêtres sont considérées en double vitrage classique 4-6-4 avec menuiserie en bois (U dormant = 2,2 W/m².K)

Les résultats de l'étude d'une maison



Résumé des cas traités

Toutes les variations de paramètres sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

CAS	
1	Cas de base (résistance thermique de l'isolant R=5, masse volumique 20 kg/m ³ , chaleur spécifique 1030 kJ/kg.K, ventilation nocturne n=5, protection solaire)
2	Augmentation de la masse volumique de l'isolant dans la toiture (50 kg/m ³ , chaleur spécifique 1600 kJ/kg.K)
3	Elimination de la ventilation (pas d'ouverture des fenêtres n=0)
4	Réduction de la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres n=3)
5	Elimination de la protection solaire
6	Réduction de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=1,65)
7	Augmentation de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=8)
8	Augmentation de l'inertie du plancher intermédiaire
9	Vitrage « argon »
10	Façade en bloc béton cellulaire

Les résultats ainsi que les analyses que l'on peut faire suite aux variations des conditions de calcul sont résumés dans les tableaux suivants :












Impact sur le déphasage des différentes solutions traitées

On constate qu'une augmentation de la masse volumique de l'isolant de la toiture de 20 à 50 kg/m³ apporte un déphasage de 2h37 (4h26 à comparer à 1h49) pour le comble mais n'apporte réellement dans la pièce qu'une diminution de 0,22°C sur la température maximale. De plus, le nombre d'heures au dessus de 26°C passe de 106 à 108 heures comme on peut le voir dans les tableaux ci-après. Cela n'a donc aucune incidence sur le confort.

Par contre, un plancher intermédiaire lourd apporte un déphasage d'environ 5h (7h30 au lieu de 2h42).

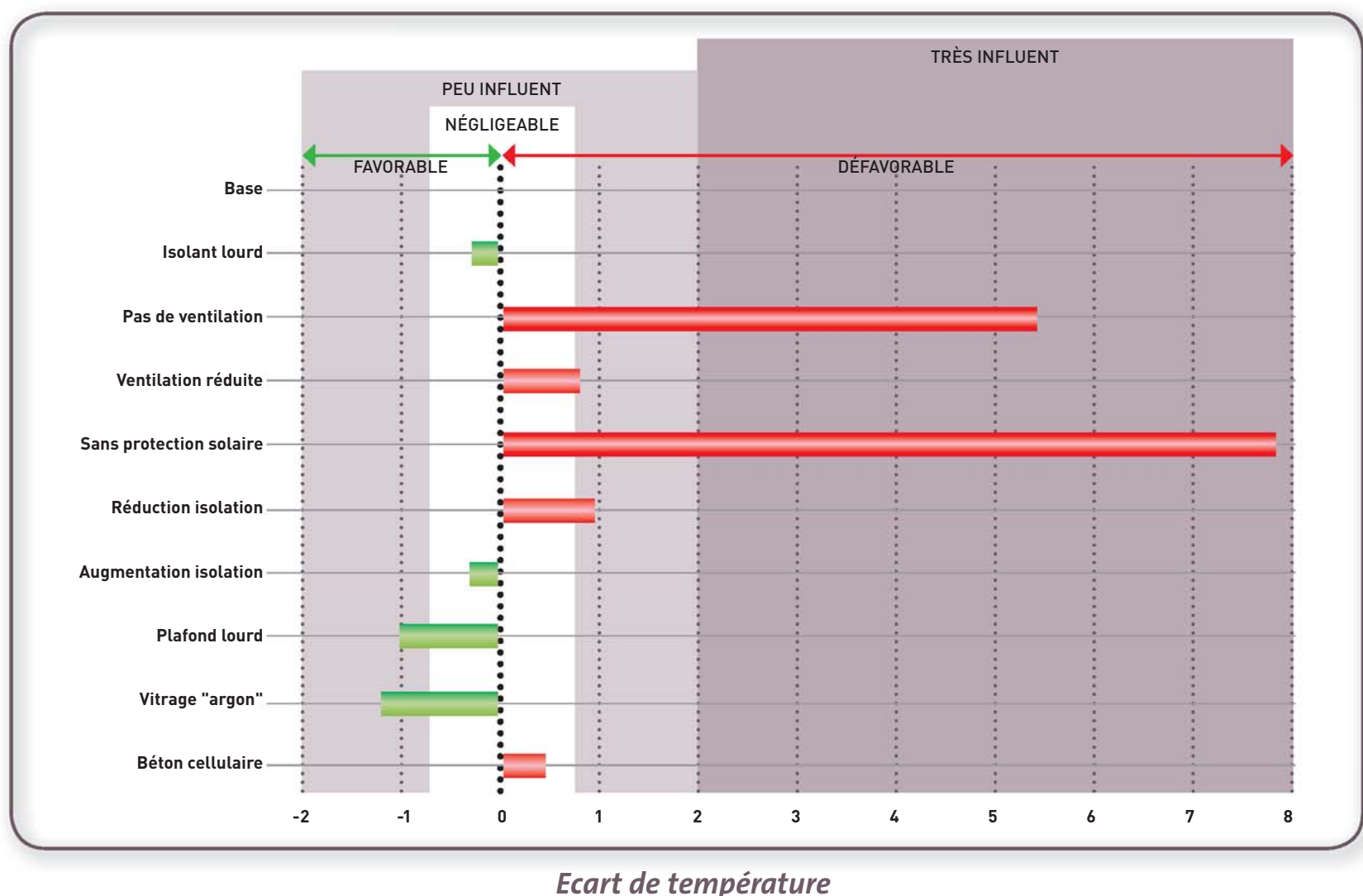
CAS	Façade	Toiture	Plancher
1	6h30'	1h49'	2h42'
2		4h26'	
3			
4			
5			
6		0h59'	
7		3h08'	
8			7h30'
9			
10	8h56'		

 **Impact sur la température maximale et le nombre d'heures supérieures à 26°C dans la maison non climatisée (résultats pour la partie « combles »)**

CAS	Tmax °C (D°C)	Heures > 26°C (%)	Analyse
1 Cas de base	33,26	106 (63 %)	
2 Augmentation de la masse volumique de l'isolant dans la toiture	33,04 (-0,22)	108 (64 %)	
3 Elimination de la ventilation (pas d'ouverture des fenêtres n=0)	37,96 (+4,70)	168 (100 %)	
4 Réduction de la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres n=3)	33,93 (+0,67)	124 (74 %)	
5 Elimination de la protection solaire	40,09 (+6,83)	132 (79 %)	
6 Réduction de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=1,65)	34,07 (+0,81)	107 (64 %)	
7 Augmentation de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=8)	33,02 (-0,24)	107 (64 %)	
8 Augmentation de l'inertie du plafond intermédiaire	32,40 (-0,86)	97 (59 %)	
9 Vitrage « argon »	32,21 (-1,05)	106 (63 %)	
10 Façade en bloc béton cellulaire	33,59 (+0,33)	107 (64 %)	

 Défavorable Très influent
  Défavorable Peu influent
  Négligeable
  Favorable Peu influent

Les effets sur la température des différents cas étudiés peuvent aussi être illustrés de cette façon :



✿ Impacts sur les besoins annuels d'énergie de la maison climatisée (résultats pour la partie « combles »)

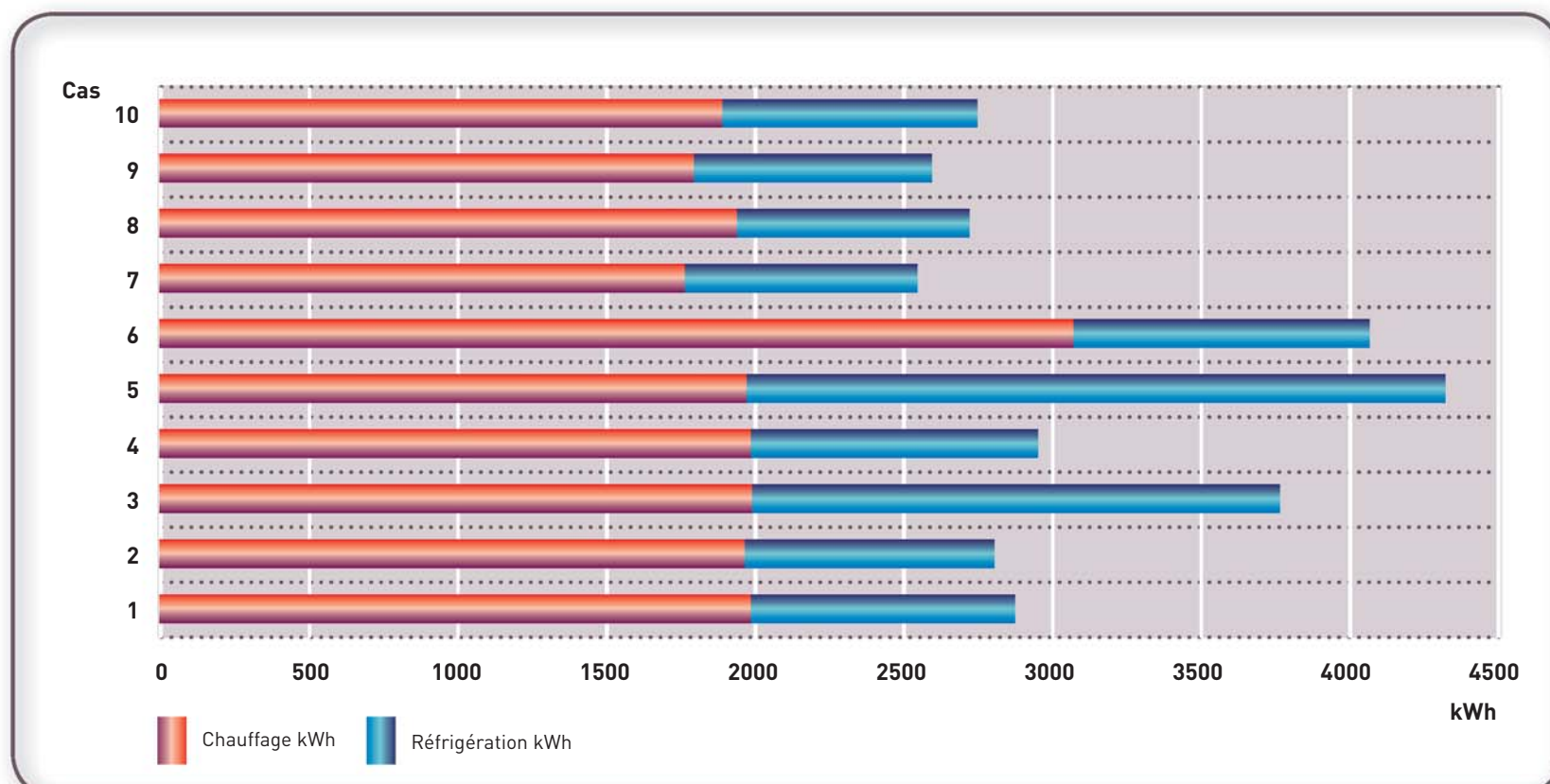
Les températures intérieures étant fixées à 20°C en hiver et 26°C en été, on étudie les besoins de chauffage et de climatisation pour respecter ces températures de consigne.

CAS	Chauffage kWh	Réfrigération kWh	Total kWh	Analyse	
				hiver	été
1 Cas de base	1 986	842	2 828		
2 Augmentation de la masse volumique de l'isolant dans le comble	1 968 (-1 %)	800 (-5 %)	2 768 (-4 %)	✿	✿
3 Elimination de la ventilation (pas d'ouverture des fenêtres n=0)	1 986 (=)	1 767 (+110 %)	3 753 (+33 %)		✿✿✿
4 Réduction de la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres n=3)	1 986 (=)	969 (+15 %)	2 955 (+5 %)		✿✿
5 Elimination de la protection solaire	1 968 (=)	2 304 (+174 %)	4 272 (+51 %)		✿✿✿
6 Réduction de l'épaisseur de l'isolant de la toiture (R=1,65)	3 039 (+53 %)	1 024 (+22 %)	4 063 (+44 %)	✿✿✿	✿✿
7 Augmentation de l'épaisseur de l'isolant de la toiture (R=8)	1 740 (-12 %)	793 (-6 %)	2 532 (-10 %)	✿✿	✿✿
8 Augmentation de l'inertie du plafond intermédiaire	1 930 (-3 %)	782 (-7 %)	2 713 (-4 %)	✿	✿✿
9 Vitrage « argon »	1 769 (-11 %)	825 (-2 %)	2 594 (-8 %)	✿	✿
10 Façade en bloc béton cellulaire	1 891 (-5 %)	851 (+1 %)	2 742 (-3 %)	✿	✿

✿✿✿ Défavorable Très influent ✿✿ Défavorable Influent ✿ Négligeable ✿ Favorable Peu influent ✿✿ Favorable influent

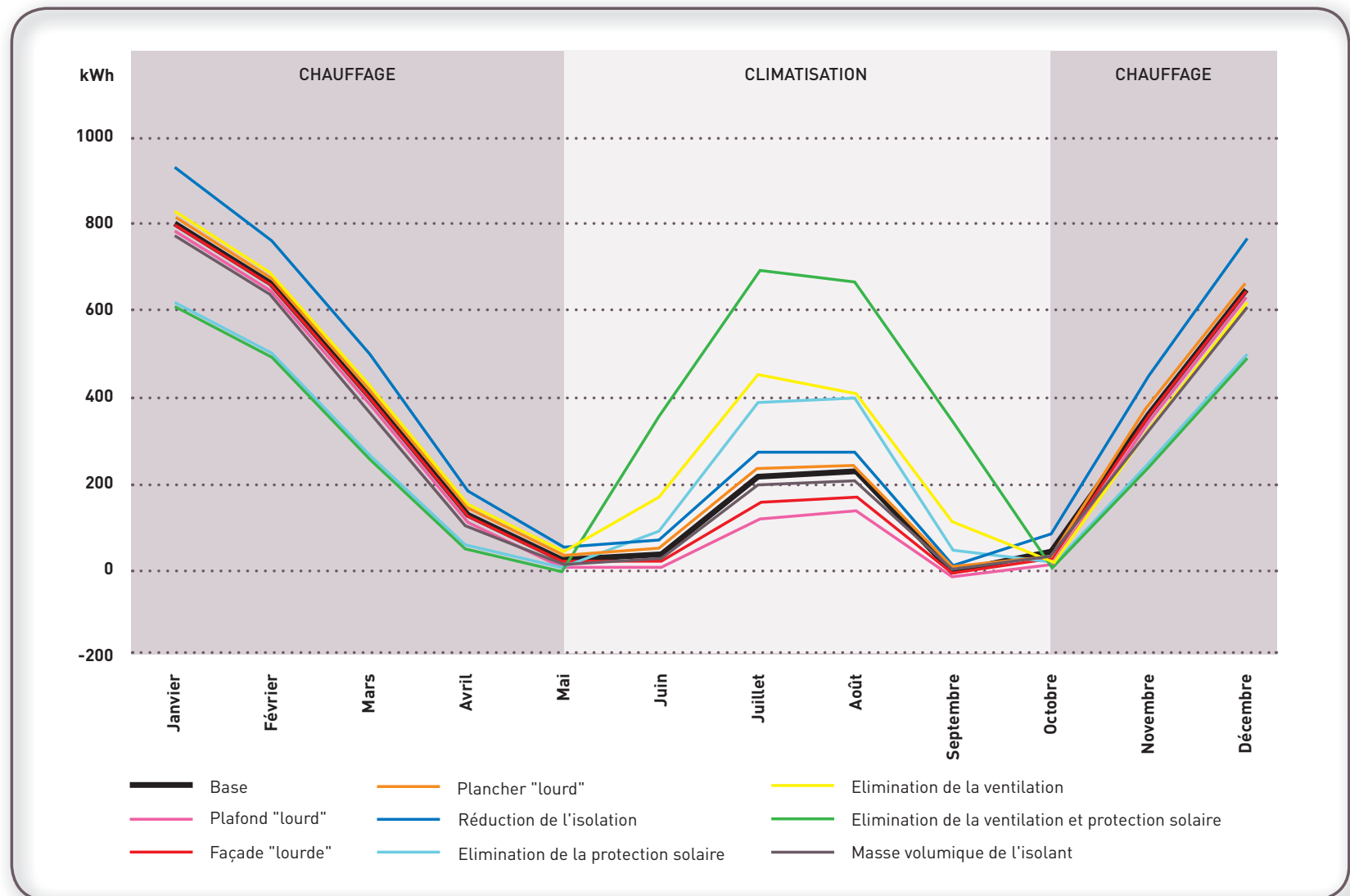
Les effets sur les consommations des différents cas étudiés peuvent être présentés comme ci-dessous :

■ BESOINS ANNUELS D'ÉNERGIE DE LA MAISON CLIMATISÉE



■ BESOINS MENSUELS D'ÉNERGIE DE LA MAISON CLIMATISÉE

Une analyse mois par mois permet de voir les effets des paramètres tout au long de l'année.



La solution de base est strictement conforme à la RT 2005. Pour limiter les besoins en toutes saisons, il faut améliorer la conception bioclimatique, augmenter le niveau d'isolation, mettre des protections solaire l'été et ne pas négliger la ventilation.



Conclusions sur l'étude d'une maison

Confort d'été (bâtiments non climatisés) :

Il est possible dans la plupart des cas d'obtenir le confort l'été sans climatisation. Pour cela, la ventilation nocturne et la protection solaire, associées à un bon niveau d'isolation sont les paramètres indispensables.

- On peut constater que la réduction (voire élimination) de la ventilation nocturne et la réduction de la protection solaire sont les paramètres défavorables clés pour le confort d'été.
- L'augmentation de la masse volumique de l'isolant de la toiture, la sur-isolation de la toiture (au delà d'une certaine limite) n'ont qu'un impact négligeable.
- La réduction de l'isolation de la toiture a un effet défavorable.

Economies d'énergie en été (bâtiments climatisés) :



















- On retrouve encore que la réduction ou élimination de la ventilation nocturne et de la protection solaire sont les paramètres clés.
- L'augmentation de la masse volumique de l'isolant de la toiture aussi bien que l'utilisation du béton cellulaire ou des vitrages « argon » restent négligeables.
- Le niveau de performance de l'isolation de la toiture a un impact important sur la consommation l'hiver mais également sur les consommations de rafraîchissement l'été. Une faible isolation a des conséquences négatives sur les consommations d'énergie alors qu'une isolation soignée (de l'ordre de $R = 8$ à 10) permet de limiter les consommations hiver comme été.







Pour les bâtiments climatisés et non climatisés les paramètres les plus influents sont les mêmes :

Les mesures à prendre pour le confort d'été sont :

- L'occultation des ouvrants (protection solaire)
- La ventilation
- L'inertie de la structure
- Le niveau d'isolation

Elles sont efficaces été comme hiver.

CAS	Bâtiments Non climatisés	Bâtiments Climatisés
1 Cas de base		
2 Augmentation de la masse volumique de l'isolant dans la toiture		
3 Elimination de la ventilation (pas d'ouverture des fenêtres n=0)		
4 Réduction de la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres n=3)		
5 Elimination de la protection solaire		
6 Réduction de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=1,65)		
7 Augmentation de la résistance thermique de l'isolant de la toiture (R=8)		
8 Augmentation de l'inertie du plafond intermédiaire		
9 Vitrage « argon »		
10 Façade en bloc béton cellulaire		

 Défavorable Très influent
  Défavorable Influent
  Défavorable Peu influent
  Négligeable
  Favorable Peu influent
  Favorable influent

Conclusion générale

- Il n'existe pas de contradiction entre stratégie d'économies d'énergie en hiver et en été, et le confort d'été.
- Même si certains paramètres dynamiques changent significativement (par exemple : capacité thermique des parois, déphasage, inertie thermique intérieure...), leur impact sur le confort d'été ou les économies d'énergie reste assez faible.
- En rénovation, une augmentation significative de l'isolation des toitures des maisons existantes a le double avantage d'économiser l'énergie l'hiver et d'apporter du confort d'été (si elle est couplée à une protection solaire des ouvrants).

Étude sur un comble aménagé

SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE D'UN COMBLE AMÉNAGÉ D'UNE CONSTRUCTION EN BOIS

Hypothèses de l'étude

La pièce présente un plafond mansardé, deux parois donnant sur l'extérieur, dont l'une comporte une fenêtre de taille modérée, et deux parois en contact avec d'autres pièces de la construction.

> STATIONS CLIMATIQUES

- Zurich-Kloten (altitude 425 m), Trappes, Carpentras.

Les simulations ont été réalisées sur une période estivale allant du 15 juillet au 15 août.

L'évaluation des résultats et l'analyse du comportement thermique de la pièce sous combles ont été réalisées sur la période de grande chaleur du 25 juillet au 6 août.

Lieux	Juillet - Août °C	Juillet - Août W/m ²	Nombre de jours de grande chaleur
Zurich-Kloten	18,2	211	5
Trappes	19,5	210	2
Carpentras	22,2	277	14

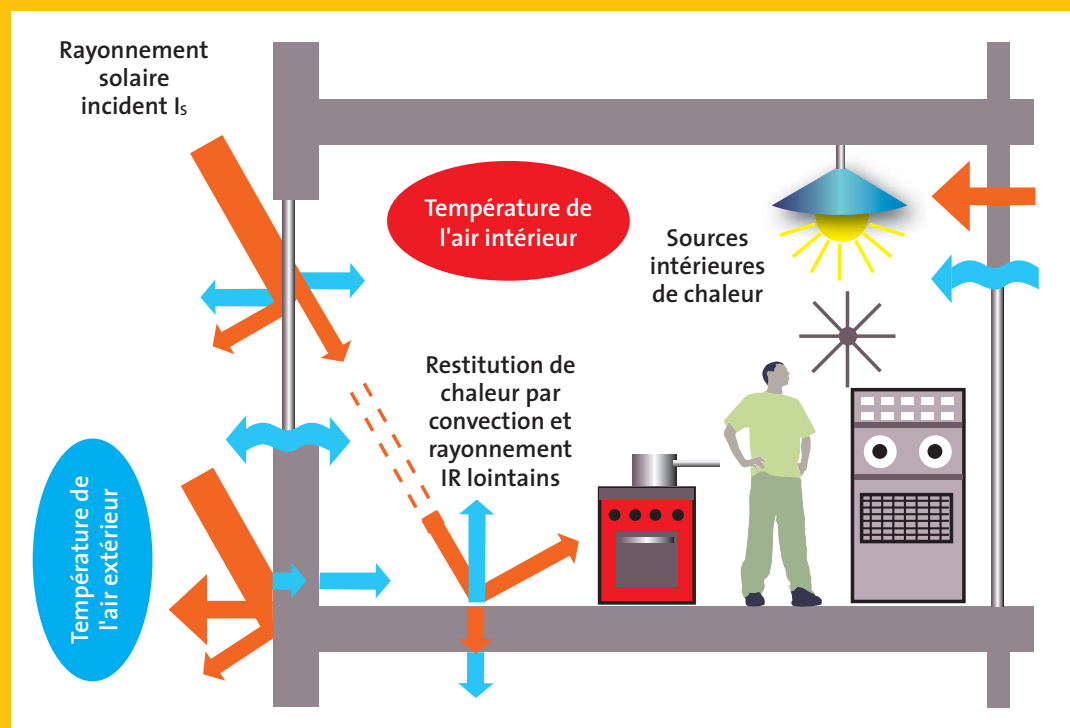
Comparaison des données climatiques aux mois de juillet et août sur les trois sites

> MODÈLE DE CALCUL









- Les calculs de simulation thermique ont été réalisés à l'aide du programme de calcul HELIOS6XP développé par l'EMPA (Centre de recherche spécialisé dans la science des matériaux et les technologies appliquées en Suisse). Ce modèle dynamique monozone établit le bilan horaire de tous les flux thermiques entrant et sortant en tenant compte du bilan de rayonnement sur l'enveloppe du bâtiment. Il permet la détermination des charges de réfrigération et de chauffage, ainsi que celle des températures superficielles des éléments de construction et de la température intérieure, en tenant compte des processus d'accumulation thermique dans toutes les parties de la construction. La conduction thermique, à travers les parois opaques, est déterminée par la méthode des facteurs de réponse. La température de l'air intérieur est considérée comme homogène dans chaque zone. La figure, ci-dessous, donne une représentation schématique des effets thermiques agissant sur une pièce modulaire et de leur prise en compte dans le modèle de simulation des bâtiments HELIOS.

Toutes les conditions (climat extérieur, charges internes et ventilation) sont saisies sous forme de valeurs horaires.

Effets thermiques sur un module de pièce

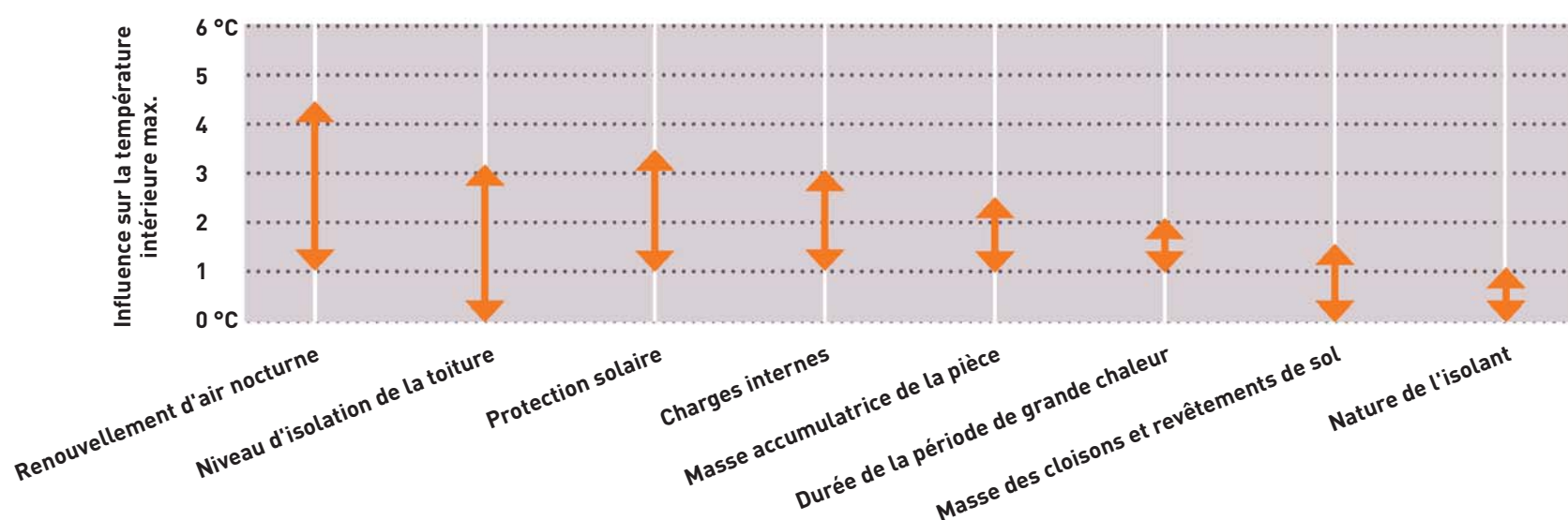


Conclusions sur l'étude d'un comble aménagé

CAS	Analyse
1 Cas de base	
2 Nature de l'isolant (laine minérale, fibre de bois, cellulose)	
3 Réduction du renouvellement d'air nocturne (de 3 à 1 volume/heure)	
4 Elimination de la protection solaire (facteur solaire entre 0,15 et 0,6)	
5 Augmentation des charges internes (entre 90 et 270 Wh/m²)	
6 Augmentation de la masse accumulatrice de la pièce (entre 41 et 100 Wh/m²)	
7 Augmentation de la masse des cloisons et revêtements de sol (entre 31 et 53 Wh/m²)	
8 Augmentation de la durée de la période de grande chaleur (entre 3 et 11 jours)	
9 Augmentation du niveau d'isolation de la toiture (de Up 0,44 à Up 0,14)	

 Défavorable Très influent
  Défavorable Influent
  Négligeable
  Favorable Peu influent
  Favorable influent
  Favorable très influent

Les écarts sur la température maximale entre les différentes variantes sont présentés ci-dessous :



Conclusion et recommandations

Cette étude par calcul de la protection thermique estivale de combles présentant une proportion modérée de surface de fenêtre montre qu'une attention particulière doit être apportée aux facteurs de construction de la toiture suivants :

- Une forte isolation thermique ($U < 0,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) est nécessaire sur les toitures de construction légère pour réduire les effets de la charge thermique solaire sur l'ambiance intérieure.
- Dans le cas de nuits tropicales (températures nocturnes de l'air extérieur $> 20^\circ\text{C}$), il est nécessaire d'appliquer des stratégies d'aération nocturnes adéquates (par exemple : l'aération transversale) car c'est un facteur prépondérant. Le taux de renouvellement horaire doit être obligatoirement supérieur à 3 volumes par heure.
- En été, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe n'exerce qu'une influence négligeable sur l'évolution de la température intérieure (aucune incidence sur la température maximale) contrairement à l'hiver. Le renouvellement d'air par ouverture des fenêtres (aération) peut s'utiliser de manière ciblée pour évacuer la chaleur.

Étude

d'une paroi

ILLUSTRATION DE L'INFLUENCE DES COMPOSANTS AU NIVEAU D'UNE PAROI SIMPLE

En général, tous ceux qui parlent du confort d'été se basent sur des calculs très simplifiés : comme par exemple, la capacité thermique surfacique de deux solutions pour les comparer. D'autres font un calcul de déphasage en prenant uniquement en compte la nature et la masse volumique de l'isolant sur une paroi simple et l'extrapolent au bâtiment.

Dans une paroi, la chaleur est plus ou moins vite diffusée. La vitesse de propagation dépend de la capacité de cette paroi à emmagasiner la chaleur (dépendant de la capacité thermique des matériaux traversés) mais également de la conductivité thermique de ces mêmes matériaux constitutifs.

La variation de température du côté intérieur de la paroi surviendra avec un certain décalage dans le temps (déphasage), mais la température maximale observée à l'intérieur sera plus faible, plus la paroi est isolée (atténuation) - voir figure page 20.

Calcul de la capacité thermique surfacique

Attention, il ne faut pas confondre :

- la capacité thermique massique (C_p) appelée aussi chaleur massique ou chaleur spécifique, qui est déterminée par la quantité d'énergie à apporter pour élever la température de 1 degré de l'unité de masse d'une substance.
- la capacité thermique surfacique de la paroi qui représente la quantité d'énergie à apporter pour élever d'1 degré, un m^2 de paroi. Les capacités thermiques surfaciques s'additionnent.

La relation entre les deux est :

$$\text{Capacité thermique surfacique (J/m}^2\cdot\text{K)} = (\text{Épaisseur} \times \text{Masse volumique}) \times C_p$$

Voici quelques exemples de calcul :

CAS 1	Panneau de laine minérale	Parement BA13
Épaisseur	200 mm	12,5 mm
Capacité thermique massique (C_p)	1 030 J/kg.K	1 000 J/kg.K
Masse volumique	18 kg/m ³	825 kg/m ³
Masse surfacique	3,6 kg/m ²	10,3 kg/m ²
Capacité thermique surfacique	3 708 J/m ² .K	10 315 J/m ² .K
Paroi : isolant et BA13 • Masse surfacique : 13,9 kg/m ² • Capacité thermique surfacique : 14 023 J/m ² .K		

CAS 2	Panneau de laine minérale	Parement BA13
Épaisseur	200 mm	12,5 mm
Capacité thermique massique (C_p)	1 030 J/kg.K	1 000 J/kg.K
Masse volumique	50 kg/m ³	825 kg/m ³
Masse surfacique	10 kg/m ²	10,3 kg/m ²
Capacité thermique surfacique	10 300 J/m ² .K	10 315 J/m ² .K
Paroi : isolant et BA13 • Masse surfacique : 20,3 kg/m ² • Capacité thermique surfacique : 20 615 J/m ² .K		

CAS 3	Panneau de fibre de bois	Parement BA13
Épaisseur	200 mm	12,5 mm
Capacité thermique massique (C_p)	1 600 J/kg.K	1 000 J/kg.K
Masse volumique	55 kg/m ³	825 kg/m ³
Masse surfacique	11 kg/m ²	10,3 kg/m ²
Capacité thermique surfacique	17 600 J/m ² .K	10 315 J/m ² .K
Paroi : isolant et BA13 • Masse surfacique : 21,3 kg/m ² • Capacité thermique surfacique : 27 915 J/m ² .K		

La capacité thermique surfacique dépend des composants de la paroi. Afin de relativiser les variations des cas étudiés, il ne faut pas oublier qu'une paroi béton de 20 cm (mur ou plancher) a une capacité thermique surfacique d'environ 350 000 J/m².K.

Influence de la nature et de la masse volumique de l'isolant sur le déphasage de la paroi en rampant de combles

Evaluation de la variation de déphasage de la paroi en rampant de combles aménagés, en fonction de la variation de la masse volumique de la laine minérale et la nature de l'isolant pour une résistance thermique de $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

> PAROI ÉTUDIÉE

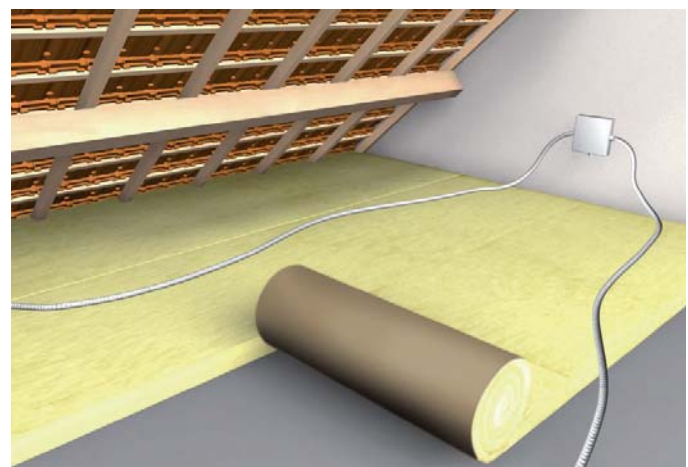
- Rampant de combles aménagés, avec parement intérieur en plaque de plâtre BA13 et charpente traditionnelle à chevrons. Le calcul est mené uniquement sur l'élément de construction.

> LOGICIEL DE CALCUL

- BAUPHYSIK - calculs réalisés suivant la NF EN ISO 13786

> VARIANTES DES CALCULS RÉALISÉS

- nature de l'isolant (laine minérale, cellulose ou fibres de bois)
- masse volumique de l'isolant
- conductivité thermique de l'isolant
- capacité thermique de l'isolant



Les cas étudiés correspondent aux produits mis en œuvre le plus communément en France :

laines minérales :

- masse volumique la plus élevée (50 kg/m^3 , $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$),
- le plus léger correspondant au CPT 3560 (18 kg/m^3 , $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$),
- produit intermédiaire (30 kg/m^3 , $\lambda = 0,032 \text{ W/m.K}$).

fibres de bois : les produits les plus utilisés en comble aménagé :

- masse volumique 55 kg/m^3 , $\lambda = 0,038 \text{ W/m.K}$,
- masse volumique 40 kg/m^3 , $\lambda = 0,039 \text{ W/m.K}$.

cellulose : masse volumique la plus basse 38 kg/m^3 , la plus haute 65 kg/m^3 et $\lambda = 0,040 \text{ W/m.K}$.

Résultats

Caractéristiques	Laine minérale			Fibre de bois		Cellulose	
Masse volumique Kg/m^3	18	30	50	40	55	38	65
Conductivité W/m.K	0,035	0,032	0,035	0,039	0,038	0,04	0,04
Chaleur massique J/Kg.K	1030	1 030	1 030	1600	1600	1600	1600
Déphasage heures	1,20	1,64	2,65	3,46	4,38	3,38	5,19

Conclusion

Les calculs à ce stade permettent d'obtenir une caractéristique de la paroi constituée uniquement de l'isolant et son parement de finition (hors structure porteuse). L'augmentation de la masse volumique de l'isolant se traduit par une augmentation du déphasage thermique de la paroi simple.

Pour obtenir un déphasage de l'ordre de 10 heures sur une paroi simple, il faudrait mettre en œuvre des isolants qui ne sont pas utilisés pour cette application (isolation de combles).

Mais on ne peut pas retenir cette valeur en heure de la paroi obtenue pour la maison ou un volume comme cela a été démontré dans les études sur la maison et le comble aménagé.

De plus, le déphasage n'a qu'une incidence mineure sur la température intérieure et donc le confort d'été. C'est l'isolation qui apporte réellement une atténuation de la montée en température à travers la paroi.

Annexe 1

DÉFINITIONS DES CARACTÉRISTIQUES NÉCESSAIRES POUR LA DÉTERMINATION DES CONDITIONS PRÉVISIONNELLES DE CONFORT

Définitions concernant les matériaux et produits

> MASSE VOLUMIQUE ρ (en kg/m³)

Quotient de la masse apparente d'un matériau (en kg), à l'état sec conventionnel par son volume (en m³).

> CONDUCTIVITÉ THERMIQUE OU LAMBDA λ (en W/m.K)

Flux de chaleur, par mètre carré, traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour une différence de température d'un degré entre les deux faces du matériau.

> RÉSISTANCE THERMIQUE R (en m².K/W)

Inverse du flux thermique par unité de surface de la paroi, pour une différence de température d'un degré K, entre les deux faces.

Formule de calcul : $R = e/\lambda$

> CAPACITÉ THERMIQUE MASSIQUE C_p (en J/kg.K) appelée aussi chaleur massique ou chaleur spécifique

Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'un kilogramme du matériau.

> DIFFUSIVITÉ THERMIQUE d (en m²/s)

Vitesse à laquelle la chaleur se diffuse dans le matériau.

Formule de calcul : $d = \lambda / (\rho \cdot C_p)$

> EFFUSIVITÉ THERMIQUE E (en J/K.m².S^{1/2})

L'effusivité d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle est donnée par : $E = \sqrt{\lambda \rho C_p}$

- Où λ est la conductivité thermique du matériau (en W/m.K)
- ρ la masse volumique du matériau (en kg/m³)
- C_p la capacité thermique massique du matériau (en J/kg.K)



Ne pas confondre effusivité et diffusivité thermique

Ne pas confondre l'effusivité thermique avec la diffusivité thermique.

Les deux valeurs sont évidemment liées : $E = \sqrt{d \rho C_p}$

Toutes deux sont les grandeurs essentielles pour quantifier l'inertie thermique.

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories (phénomène de contact). Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie en surface sans se réchauffer dans la masse (et inversement). Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

Exemple : sens physique et paradoxe du marbre froid

Le théorème essentiel dit « théorème du contact thermique » est le suivant :
Soit un matériau 1, d'effusivité E_1 à la température T_1 , mis en contact avec un matériau 2 d'effusivité E_2 et de température T_2 . Le contact se fait par une surface plane parfaitement lisse.

Quelle est immédiatement après le contact la température de surface des deux matériaux ?

$$T = \frac{(E_1 T_1 + E_2 T_2)}{(E_1 + E_2)}$$

avec T, T_1, T_2 dans la même unité de température qui peut être le Kelvin ou le degré Celsius.

Par exemple, si l'on pose la main sur du bois et de l'acier de même température (20°C), l'acier paraîtra plus froid car son effusivité est de $14\,000\text{ J/K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{S}^{1/2}$ et celle de la peau 400 .
La température alors ressentie par la peau est : $(14\,000 \times 20 + 400 \times 37) / 14\,400 = 20.47^\circ\text{C}$.
Par contre, pour le bois d'effusivité de l'ordre de 400 également, la température ressentie $(400 \times 20 + 400 \times 37) / 800 = 28.5^\circ\text{C}$: le bois est senti comme une matière «chaude», alors que sa température est la même que celle de la pièce, 20°C .

Définitions concernant les parois

> ÉPAISSEUR e (en m)

> MASSE SURFACIQUE (en kg/m^2)

Dans le cas de parois composées de plusieurs couches, elle s'obtient en additionnant les masses surfaciques de chaque couche.

> RÉSISTANCE THERMIQUE R (en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)

Inverse du flux thermique par unité de surface de la paroi, pour une différence de température d'un degré K, entre les deux faces.

La résistance thermique totale s'obtient par addition des résistances de chaque couche ainsi que des résistances superficielles des deux faces.

> COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE SURFACIQUE U (en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

Flux thermique, en régime stationnaire par unité de surface de la paroi, pour une différence de température d'un degré K, entre les milieux situés de part et d'autre de la paroi.

U_c est le coefficient de transmission surfacique de la paroi en partie courante (sans les ponts thermiques intégrés).

$$U_c = 1 / (\text{résistance thermique } R + \text{résistance superficielle } R_s)$$

- R est la somme des résistances thermiques de toutes les couches de la paroi.
- R_s est la somme de la résistance superficielle côté intérieur (R_{Si}) et de la résistance superficielle côté extérieur de la paroi (R_{Se}).

U_p est égal à U_c majoré pour prendre en compte les éventuels ponts thermiques intégrés dans la paroi (fixations).

Le coefficient global U_p de la paroi se calcule en fonction du coefficient surfacique en partie courante U_c et des coefficients linéiques et ponctuels des ponts thermiques intégrés selon la formule :

$$U_p = U_c + \Delta U$$

$$\Delta U = \sum_i \Psi_i L_i + \sum_j X_j / A$$

- Ψ_i est le coefficient linéique du pont thermique intégré i (en W/m.K)
- L_i est le linéaire du pont thermique i (en m)
- X_j est le coefficient ponctuel du pont thermique intégré j (en W/K)
- A est la surface totale de la paroi (en m²)

U_{24} ou U_T selon norme SIA 180/1999 ou Y_{mn} selon norme EN ISO 13786

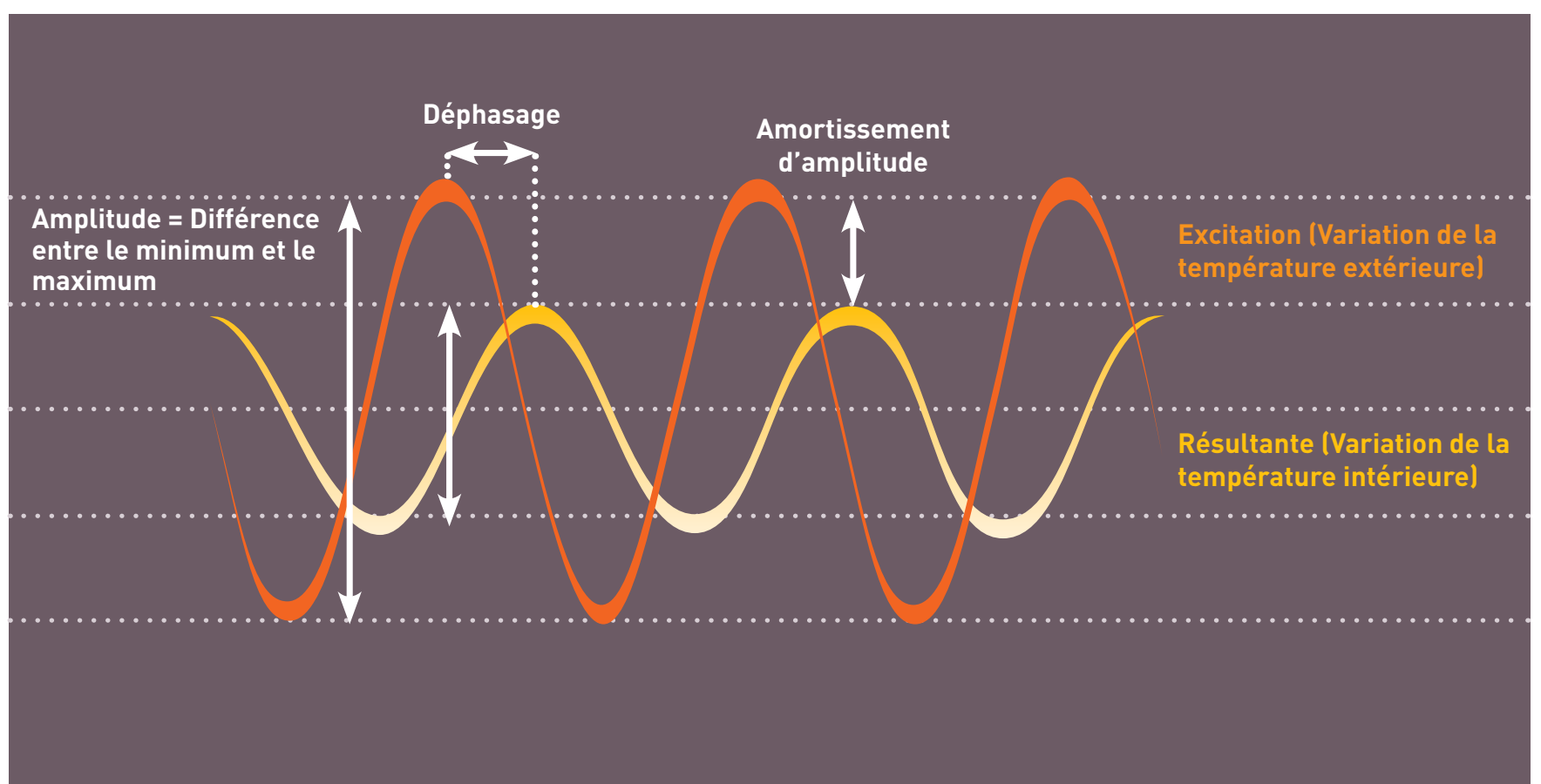
Le coefficient de transmission thermique dynamique ou harmonique en W/m².K sur la période de temps T.

T est couramment pris à 24, on obtient donc U_{24} . Si le temps est différent, par exemple : T = 15 alors, U ou Y_{mn} devient U_{15} ou Y_{mn15} .

C'est donc l'inverse de la résistance dynamique, qui elle est le rapport entre l'amplitude des variations de température d'un côté d'un élément de construction soumis à des variations sinusoïdales de température à l'amplitude des variations de flux de chaleur de l'autre côté de cet élément.

> DÉPHASAGE DE PAROI (en h)

Durée de passage d'une onde de chaleur à travers la paroi, entre le moment de son absorption sur une face de la paroi et sa restitution sur la face opposée de la paroi. Se calcule suivant la NF EN ISO 13786.



> CAPACITÉ THERMIQUE DE LA PAROI (en $J/m^2.K$)

Se calcule à partir de la masse surfacique en kg/m^2 et de la capacité thermique du matériau. Dans le cas d'une paroi multicouche, elle s'obtient par addition des capacités thermiques de chaque couche.

> INERTIE THERMIQUE

C'est la propension d'un matériau à conserver sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de cet équilibre thermique. Plus les matériaux sont denses à C_p identique, plus ils sont inertes, c'est la raison pour laquelle on parle aussi de masse thermique. Elle est quantifiée par la diffusivité thermique (d) et l'épaisseur (e). Le temps caractéristique associé à l'inertie thermique dépend de ces deux paramètres puisqu'il est de l'ordre de e^2/d .

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à emmagasiner puis à restituer la chaleur de matière diffuse. Plus l'inertie du bâtiment est forte, plus celui-ci se réchauffe et se refroidit lentement. L'inertie thermique permet d'obtenir un déphasage thermique, décalage dans le temps, de la température intérieure, par rapport aux températures extérieures.

Définitions concernant les parois vitrées

> LE COEFFICIENT DE DÉPERDITIONS THERMIQUES

Pour les fenêtres verticales, lanterneaux, fenêtres de toit, le coefficient de déperditions thermiques **U_w (ou U_{jn} avec fermeture)** prend en compte les pertes de chaleur par la fenêtre. Cependant, la capacité de la baie à capter la chaleur du soleil et la lumière du jour et celle des fermetures à améliorer la résistance thermique et/ou la protection solaire en été doivent être, en rénovation, impérativement considérées.

> PROTECTION SOLAIRE

On regroupe sous ce vocable, les protections telles que les stores toile à projection, les stores bannes, les volets roulants ou à persienne...

Définitions concernant le bâtiment ou un volume

> APPORTS INTERNES OU CHARGES INTERNES

Les apports internes sont les apports de chaleur dus aux occupants (selon leurs activités), au système d'éclairage ainsi que ceux fournis par les équipements de bureautique, médias électroniques, appareils de cuissons et ménagers. Les apports internes contribuent à diminuer la demande en énergie des locaux dans les conditions d'hiver mais ils contribuent aussi à l'élévation de la température des locaux en été. Il est donc essentiel de les maîtriser. On convient qu'ils peuvent représenter une élévation de température de 3 à 6 K en été.

> MASSE ACCUMULATRICE

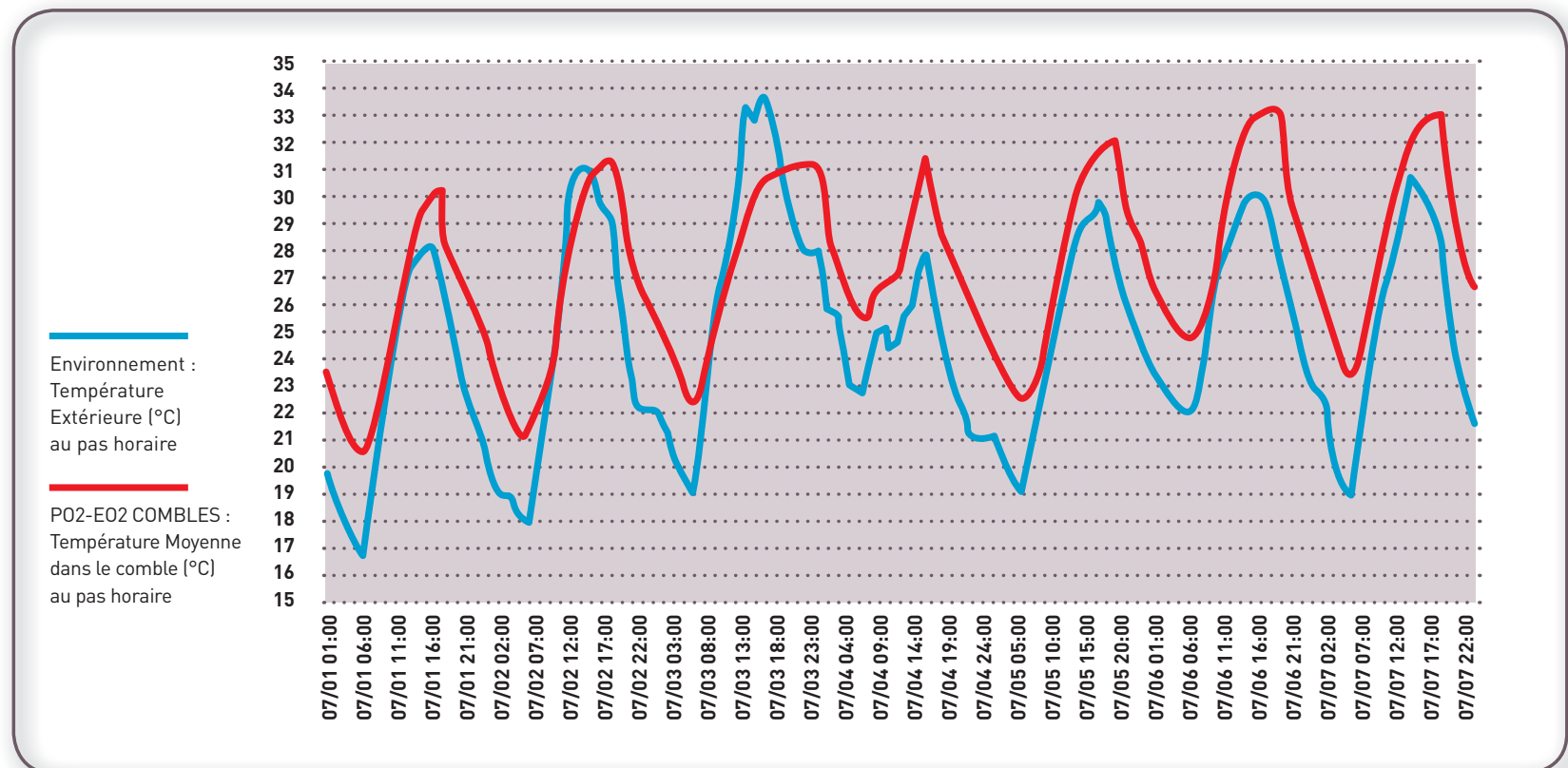
On entend communément par masse accumulatrice, l'apport d'un élément de forte masse qui pourra accumuler la chaleur (par exemple : une cage d'escalier en béton, colonne technique, mur trombe...).

Annexe 2

DÉTAILS DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS SUR MAISON R+ COMBLES À MARSEILLE

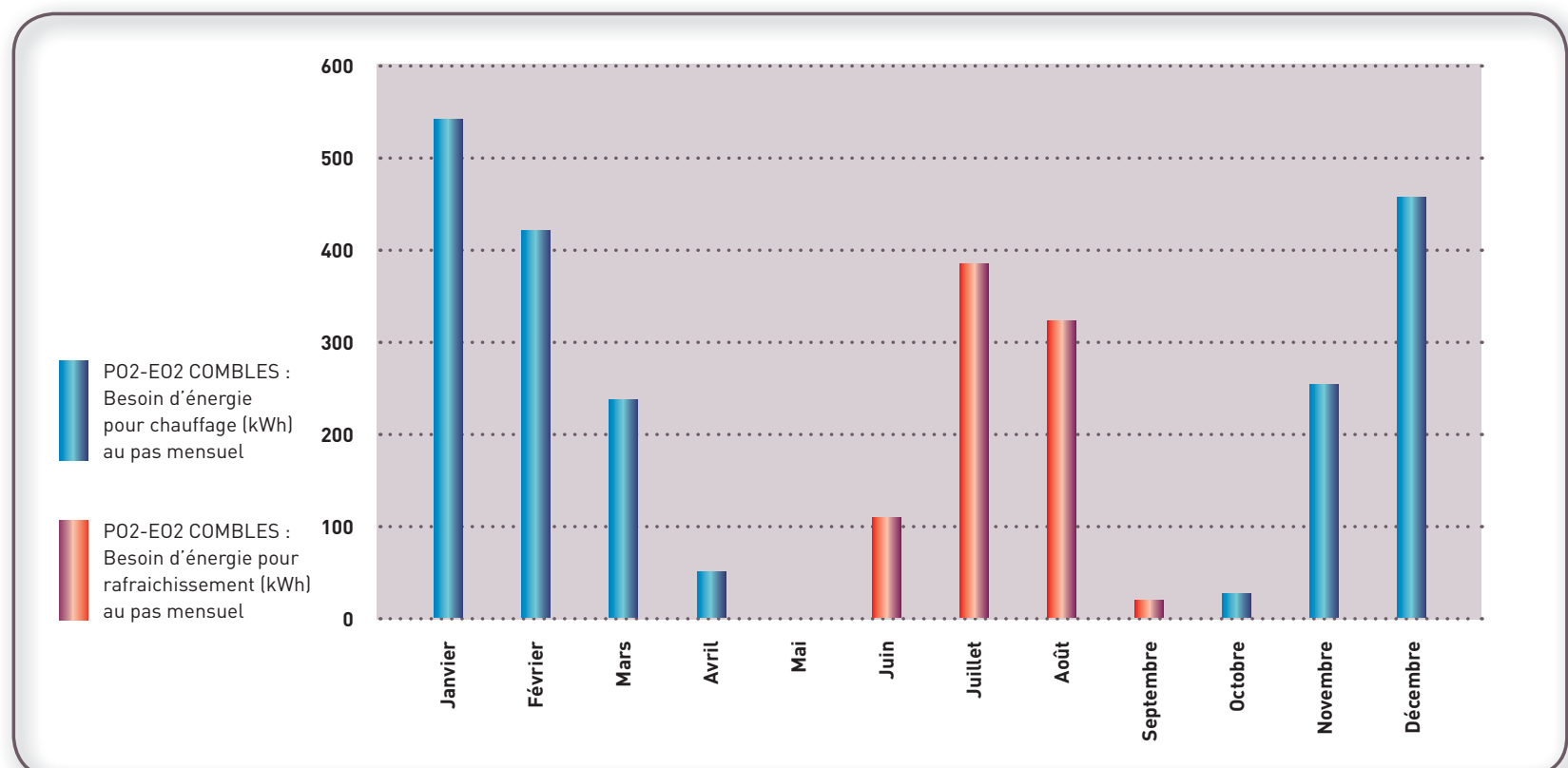
1- Cas de base

- Tmax dans le comble : 33,26°C
- Nombre d'heures avec T > 26°C : 106
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

- Total chauffage : 1 986 kWh
- Total réfrigération : 842 kWh
- Total annuel : 2 828 kWh



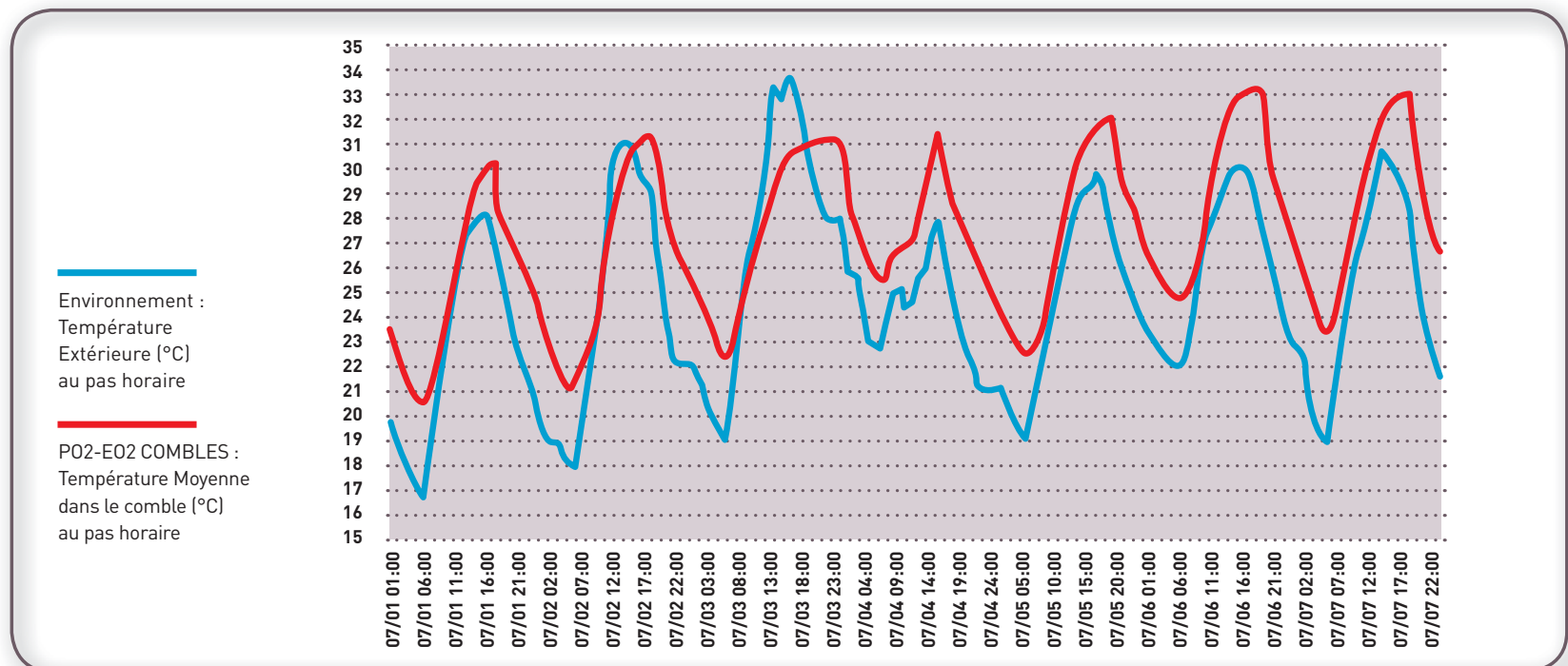
2- Augmentation de la masse volumique de l'isolant dans le comble

La masse volumique de l'isolant du plafond passe de 20 à 50 kg/m³ et de sa chaleur spécifique de 1 030 à 1 600 kJ/kg.K.

DONNÉES GÉNÉRALES	
Epaisseur	0,233 m
Masse surfacique	53,94 kg/m ²
Résistance thermique	5,388 m ² .K/W
Transmission thermique	0,186 W/m ² .K

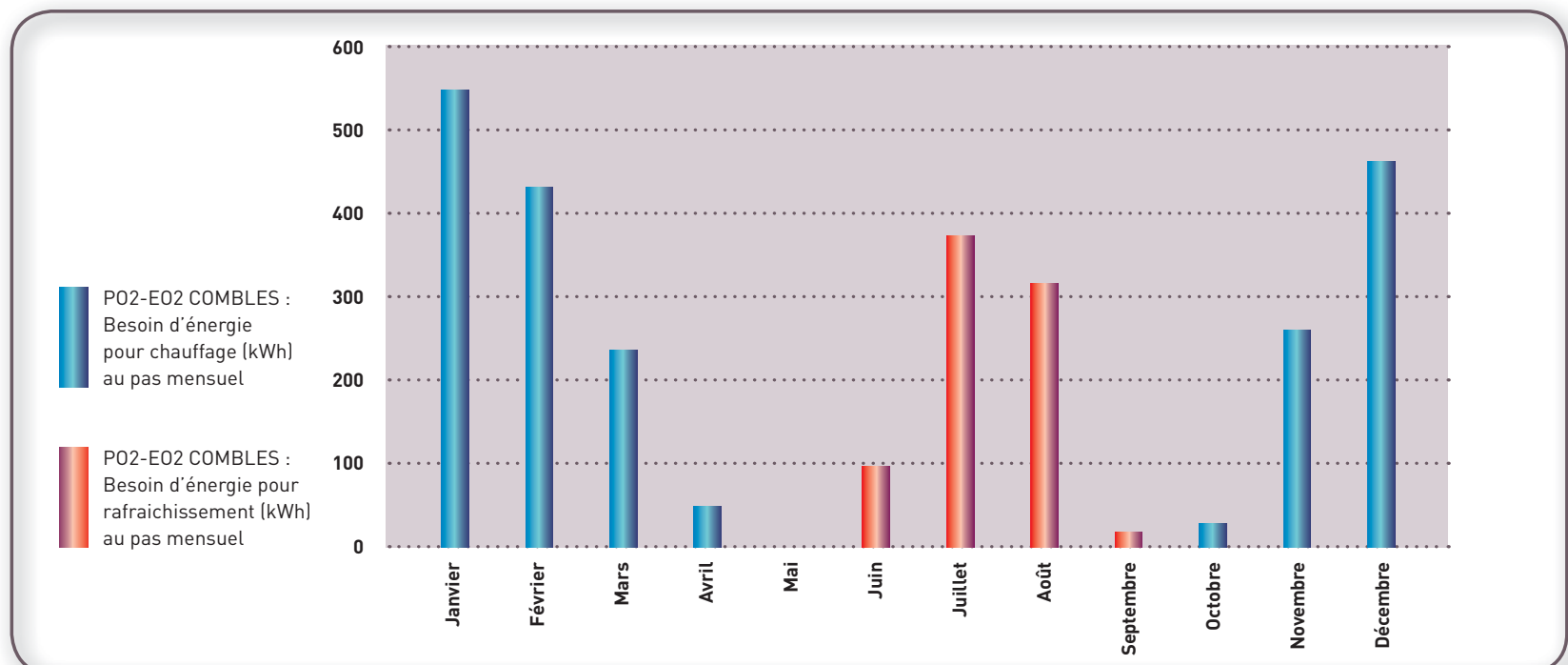
PARAMÈTRES DYNAMIQUES	
Transmission thermique périodique	0,153 W/m ² .K
Facteur d'amortissement	0,824
Déphasage	4h26'

- Tmax dans le comble : 33,04°C
- Nombres d'heures avec T > 26°C : 108
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

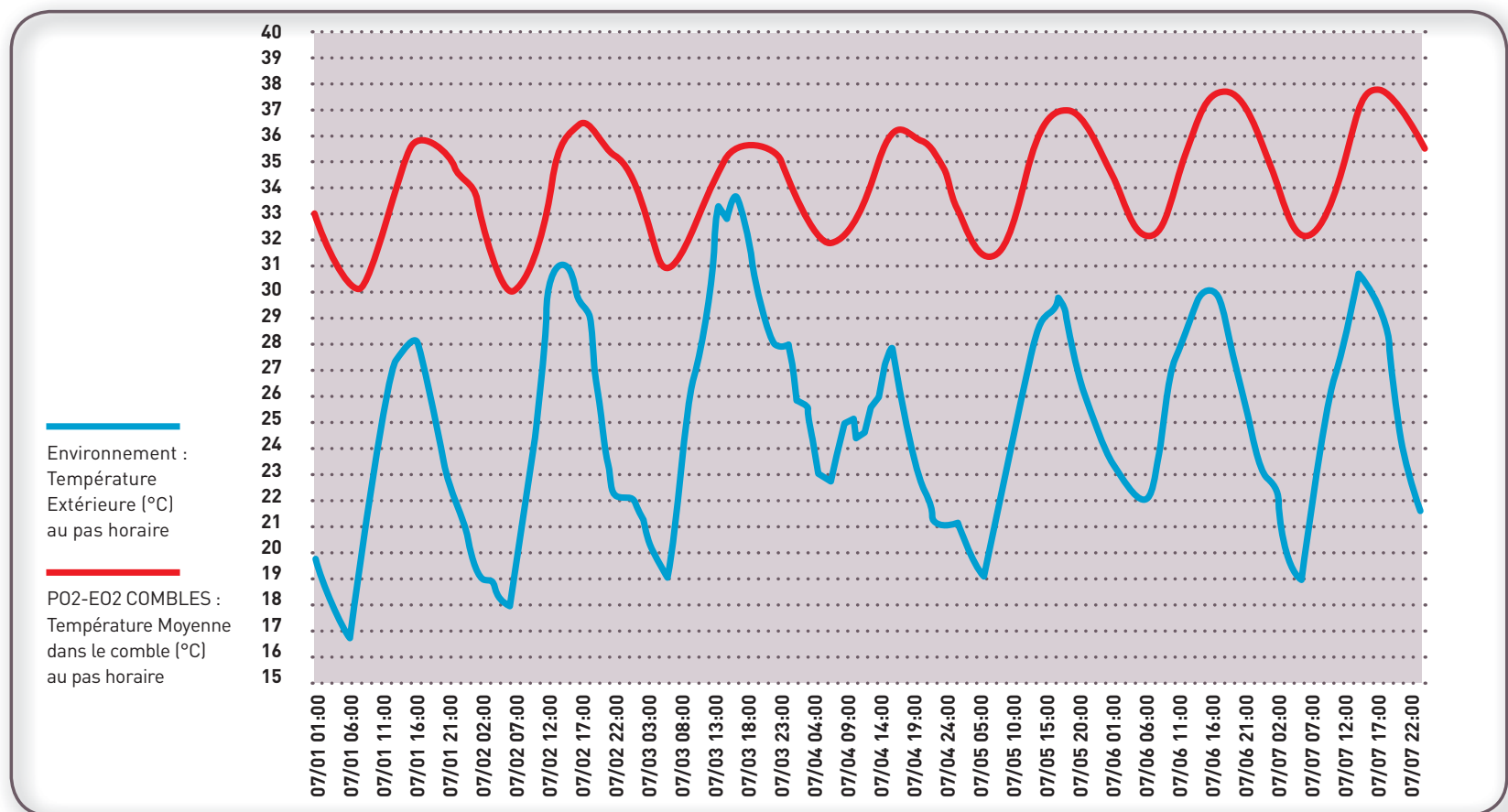
- Total chauffage : 1 968 kWh
- Total réfrigération : 800 kWh
- Total annuel : 2 768 kWh



3- Elimination de la ventilation (ouverture des fenêtres)

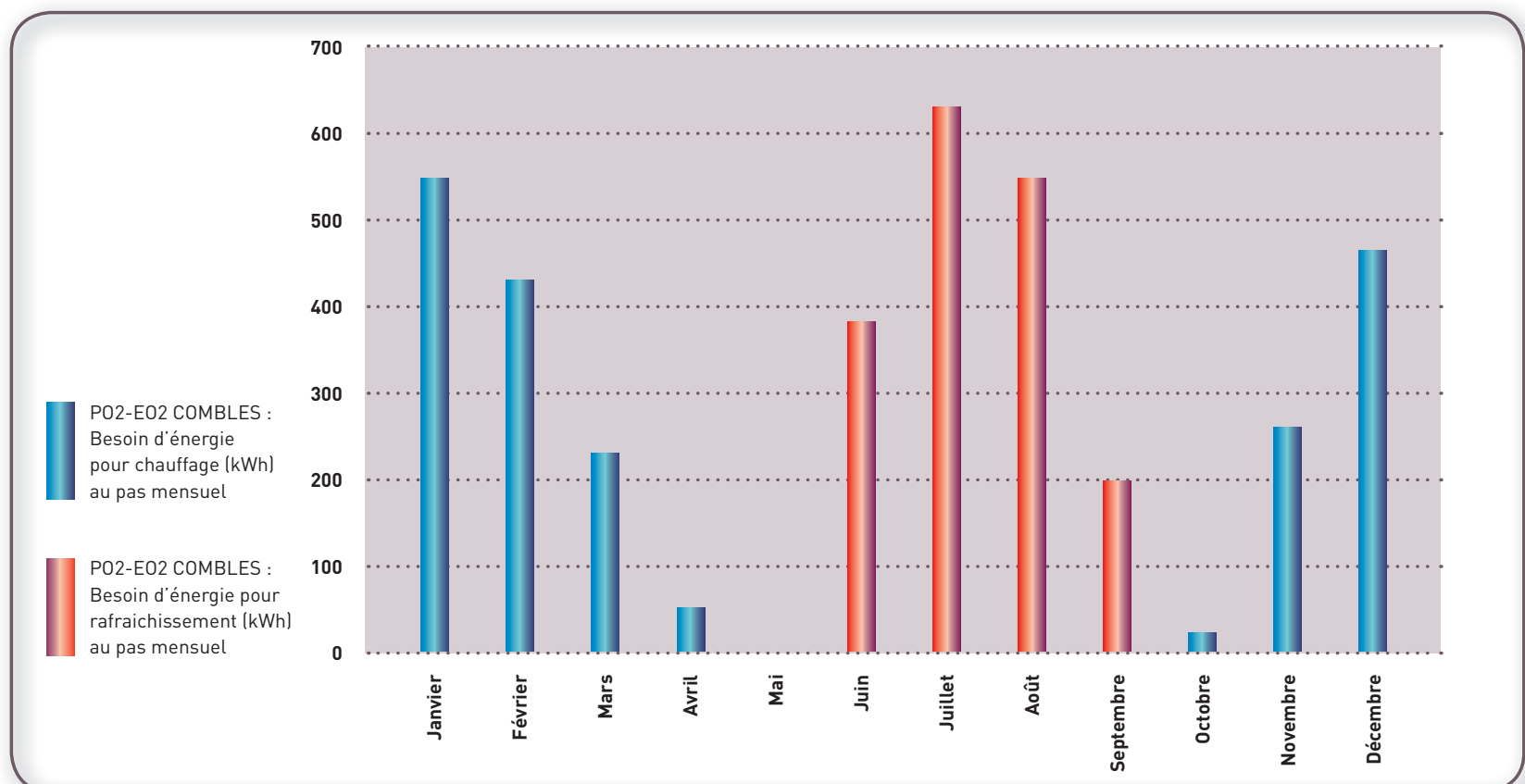
On retient exclusivement la ventilation minimale pour des raisons hygiéniques.

- Tmax dans le comble : 37,96°C
- Nombre d'heures avec T > 26°C : 168
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

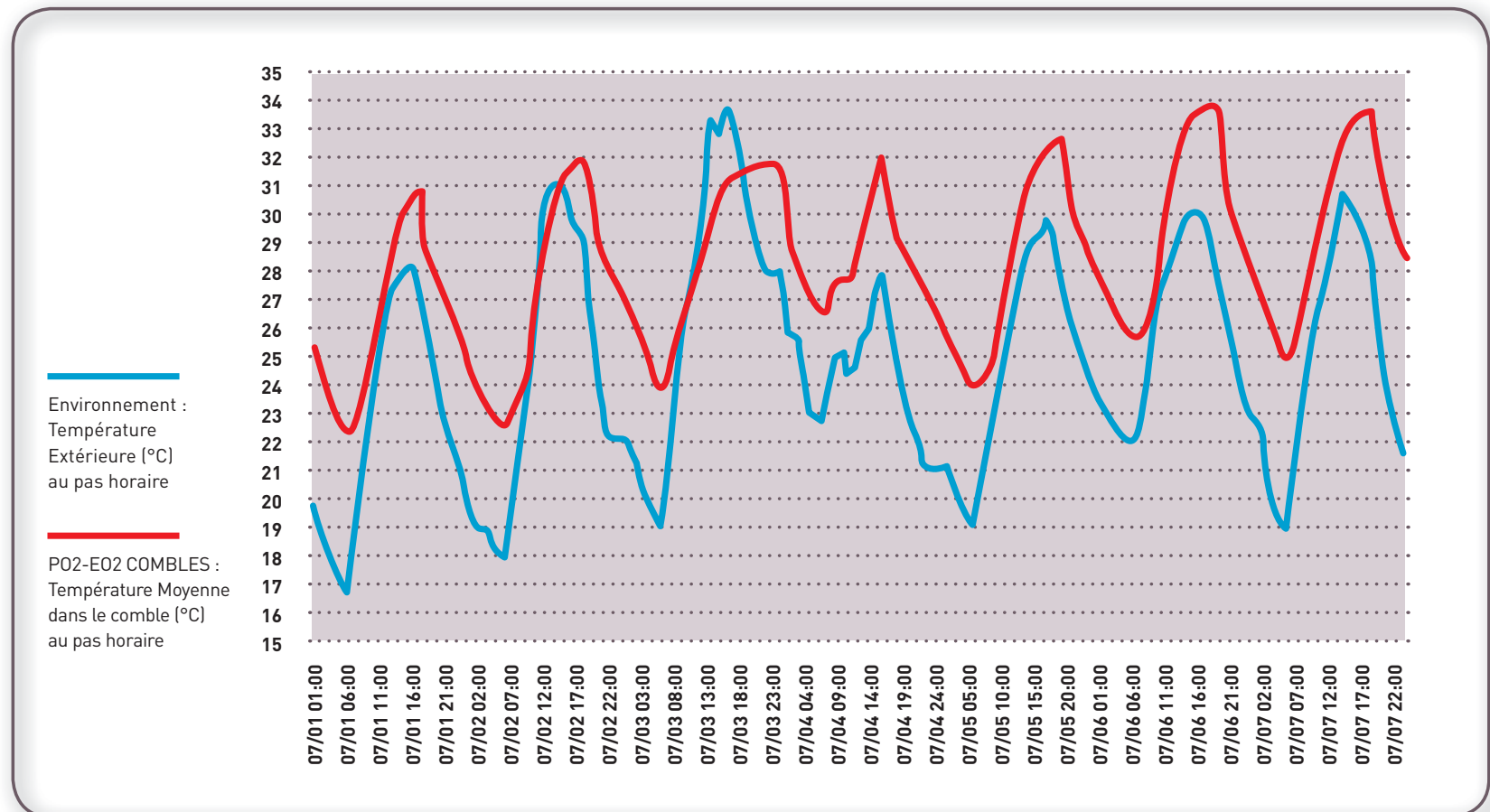
- Total chauffage : 1 986 kWh
- Total réfrigération : 1 767 kWh
- Total annuel : 3 753 kWh



4- Réduction de la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres)

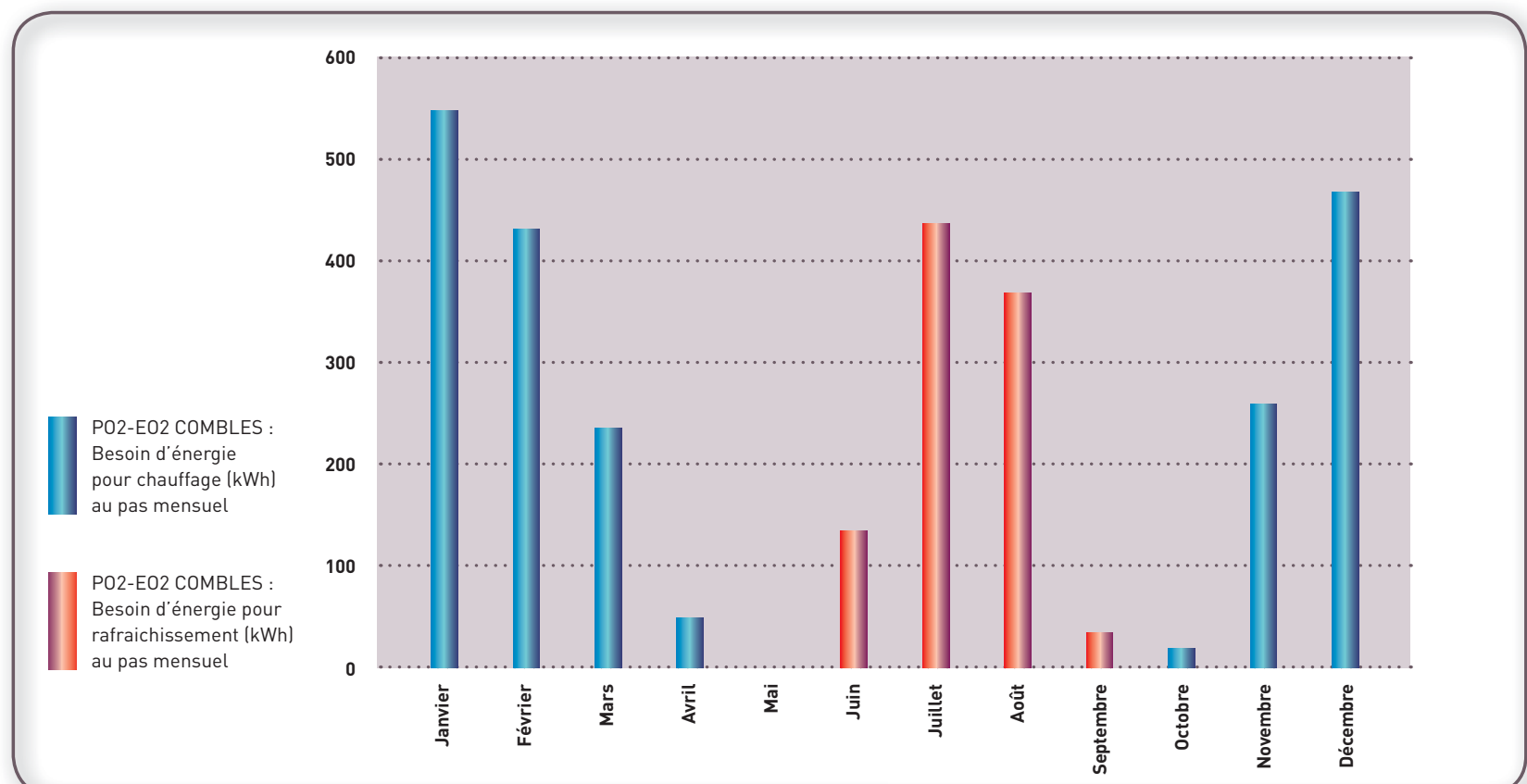
On réduit la ventilation nocturne à un taux de 3 renouvellements par heure (ventilation moins efficace).

- Tmax dans le comble : 33,93°C
- Nombre d'heures avec $T > 26^{\circ}\text{C}$: 124
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

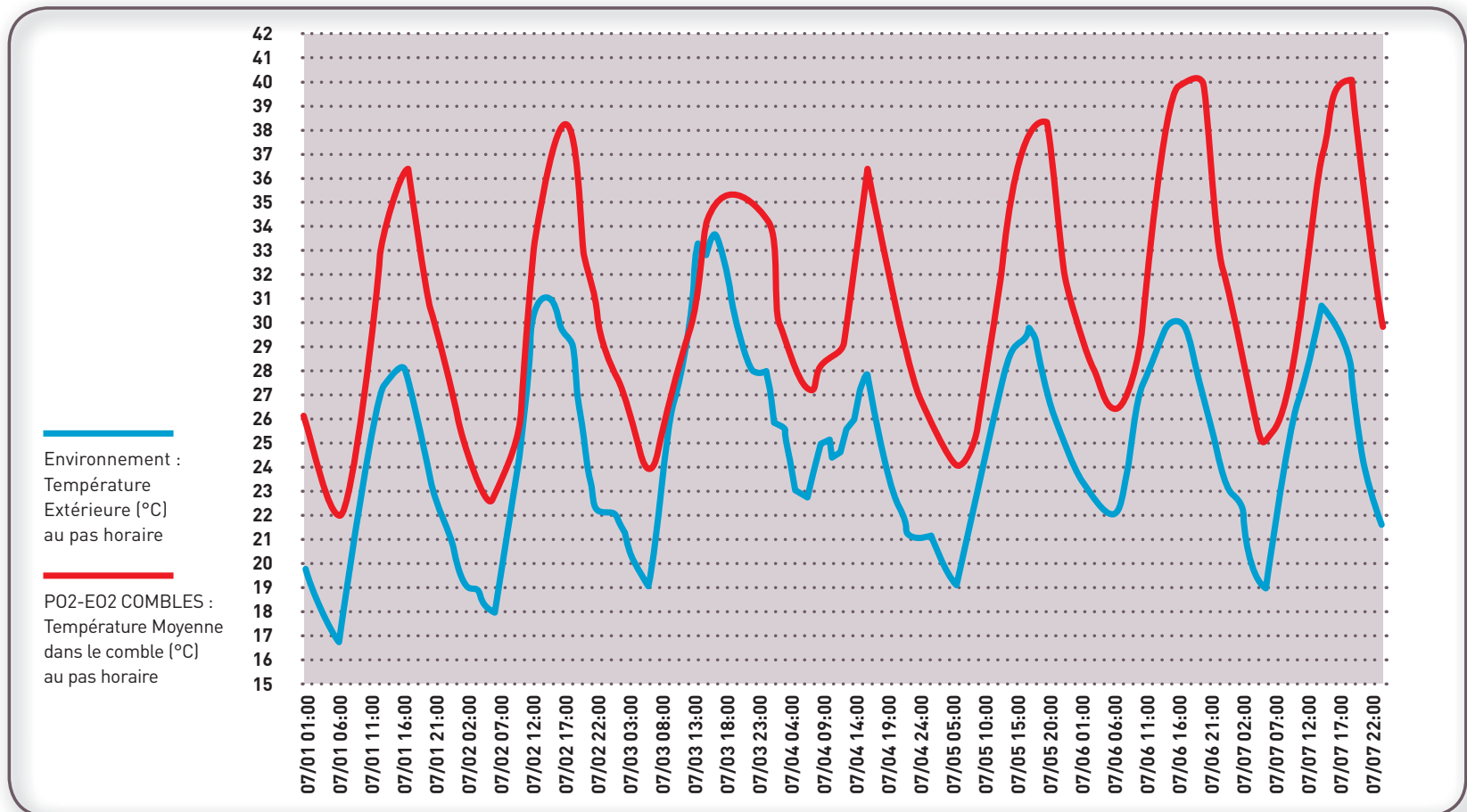
- Total chauffage : 1 986 kWh
- Total réfrigération : 969 kWh
- Total annuelle : 2 955 kWh



5- Elimination de la protection solaire

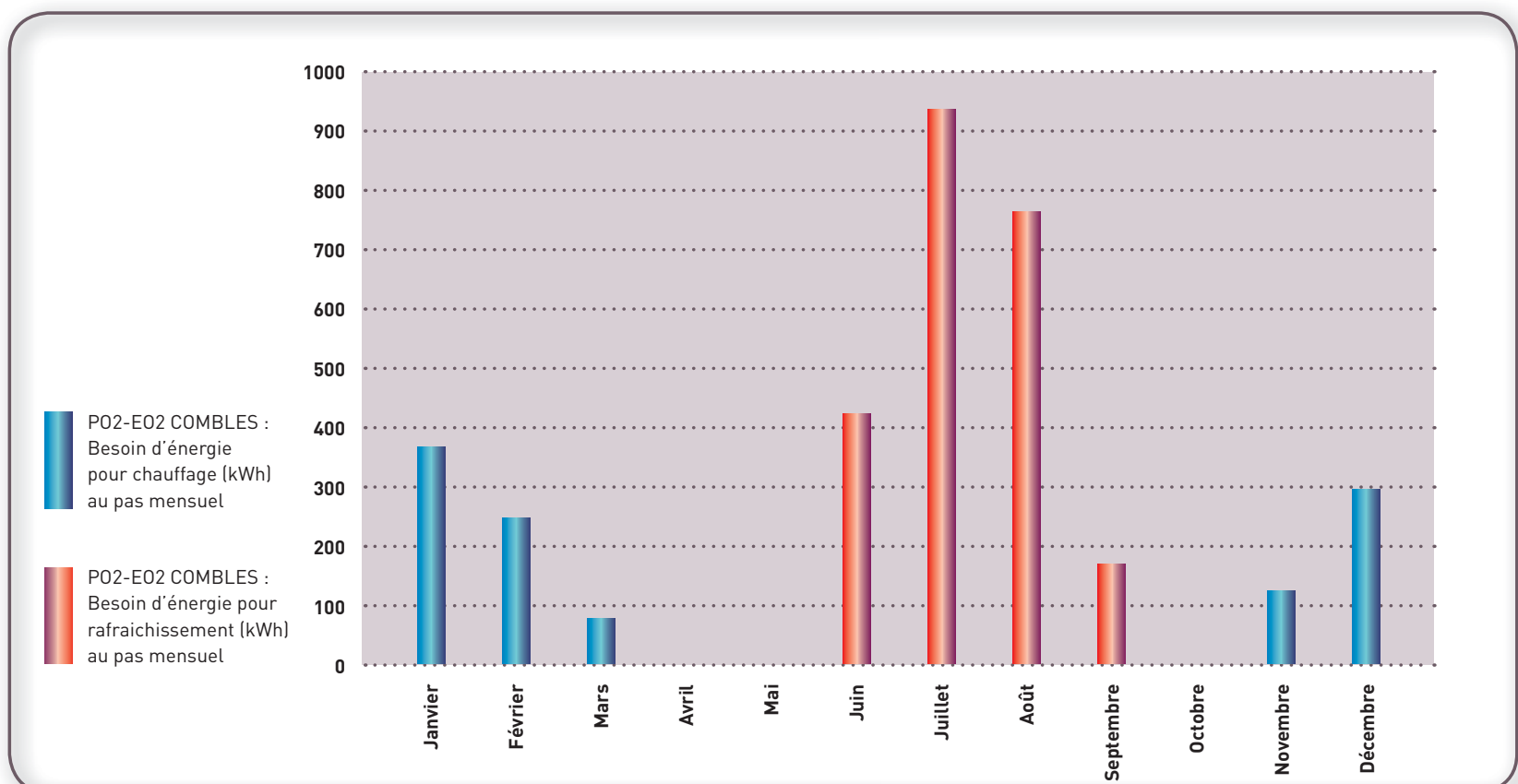
On estime qu'on ne dispose pas de la protection solaire.

- Tmax dans le comble : 40,09°C
- Nombre d'heures avec T > 26°C : 132
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

- Total chauffage : 1 968 kWh
- Total réfrigération : 2 304 kWh
- Total annuelle : 4 272 kWh



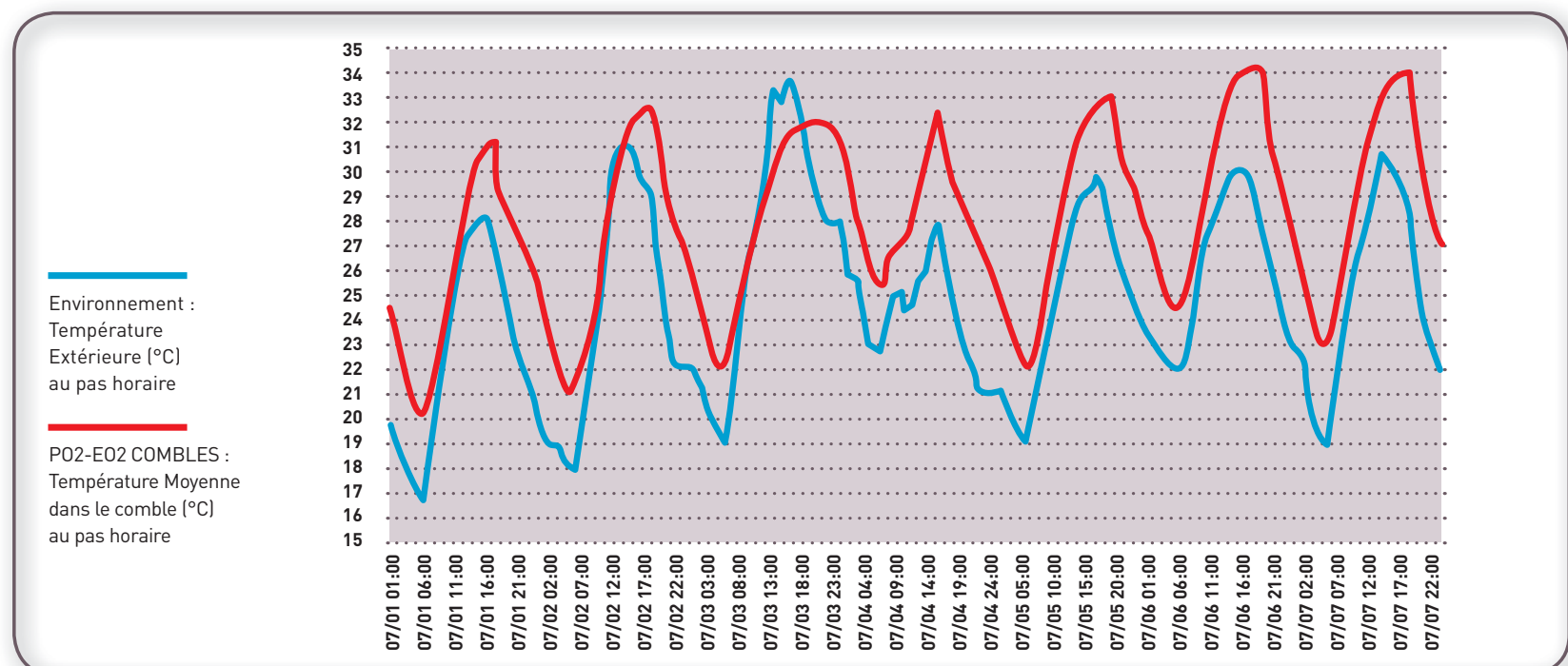
6- Réduction de l'épaisseur de l'isolant de la toiture

On réduit l'épaisseur de l'isolant pour rester seulement à une résistance thermique de 1,65 m².K/W (épaisseur 6 cm).

DONNÉES GÉNÉRALES	
Epaisseur	0,118 m
Masse surfacique	46,22 kg/m ²
Résistance thermique	2,102 m ² .K/W
Transmission thermique	0,476 W/m ² .K

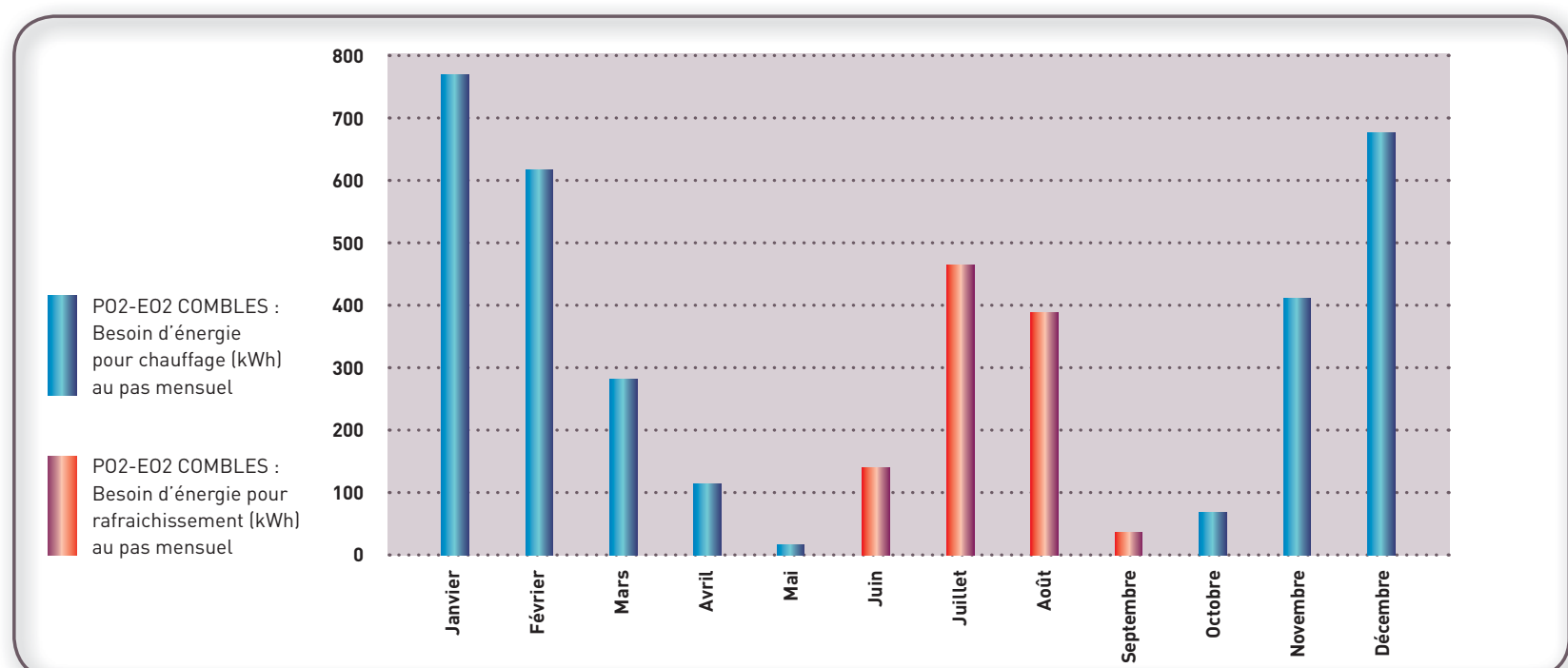
PARAMÈTRES DYNAMIQUES	
Transmission thermique périodique	0,470 W/m ² .K
Facteur d'amortissement	0,988
Déphasage	0h59'

- Tmax dans le comble : 34,07°C
- Nombres d'heures avec T > 26°C : 107
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

- Total chauffage : 3 039 kWh
- Total réfrigération : 1 024 kWh
- Total annuel : 4 063 kWh

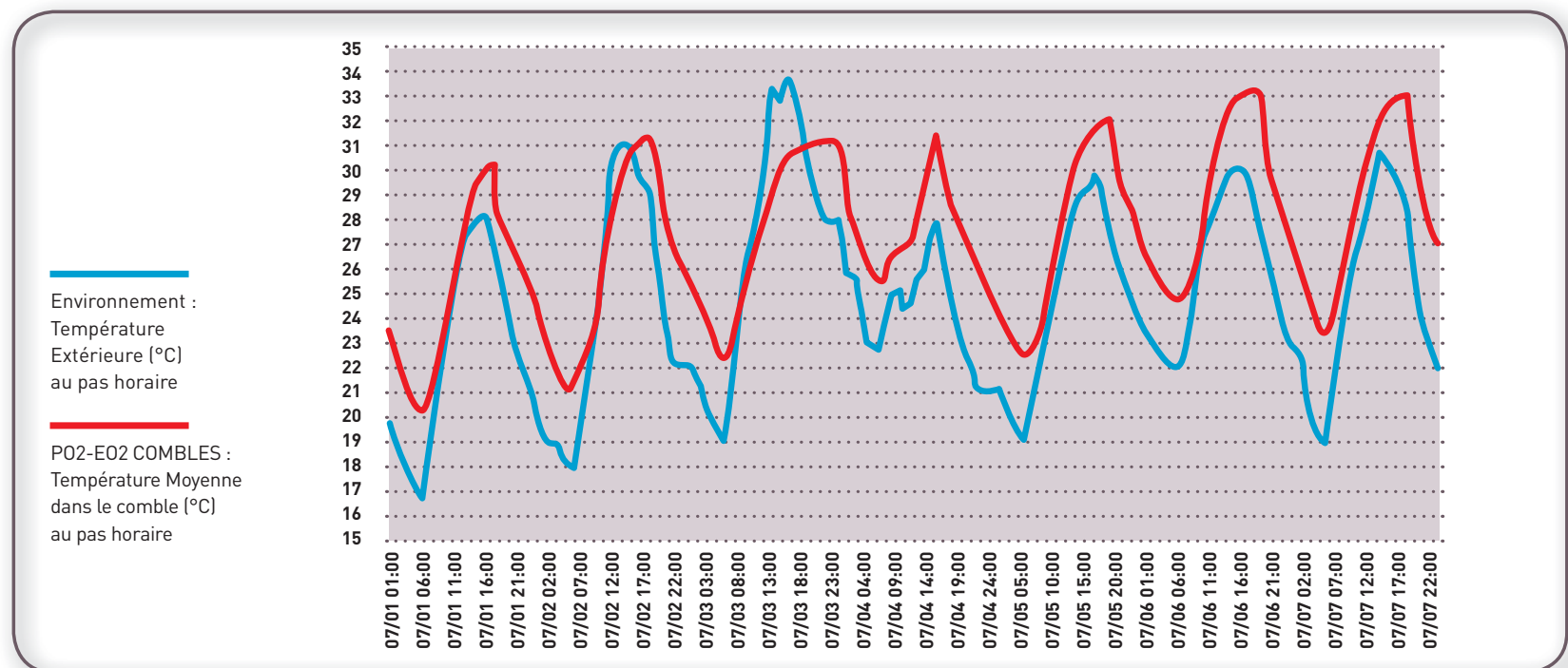


7- Augmentation de l'épaisseur de l'isolant de la toiture

On augmente l'épaisseur de l'isolant pour arriver à une résistance thermique de 8,4 m².K/W (épaisseur 34 cm).

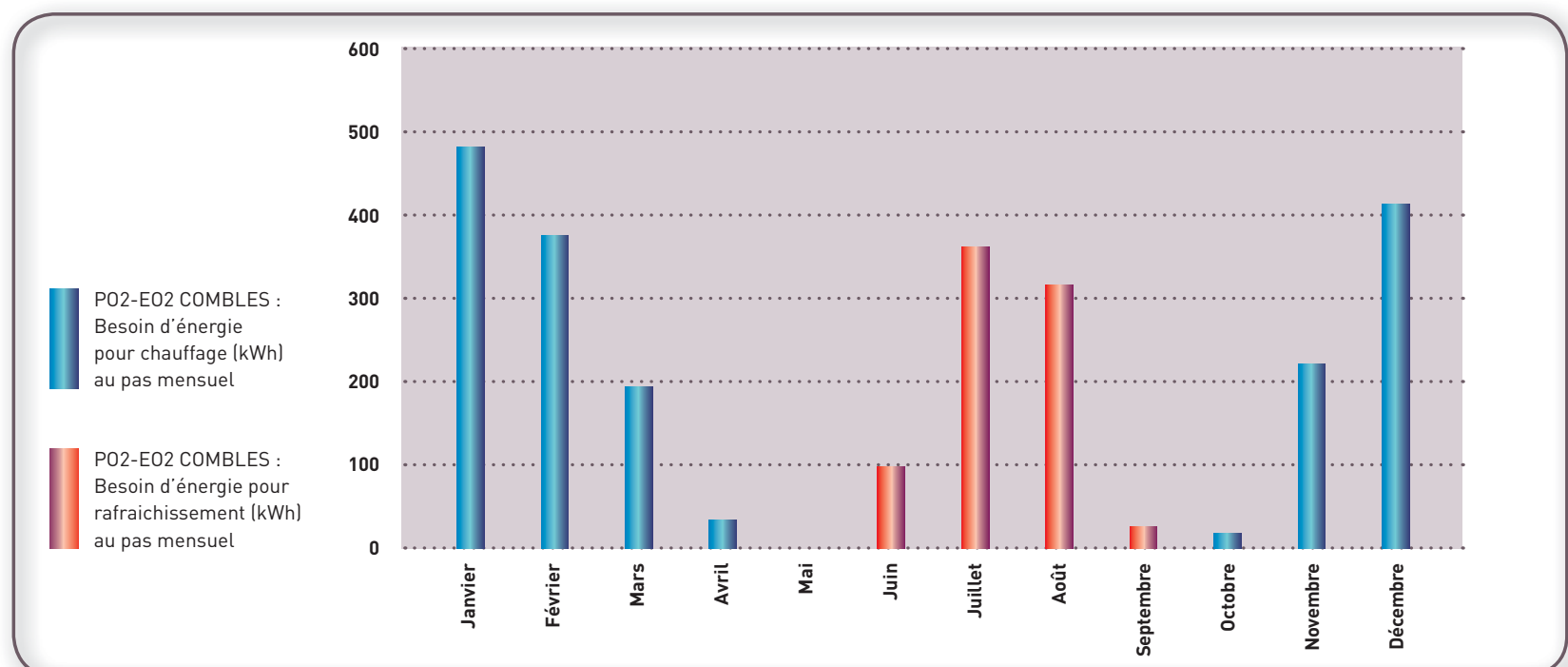
DONNÉES GÉNÉRALES		PARAMÈTRES DYNAMIQUES	
Epaisseur	0,338 m	Transmission thermique périodique	0,109 W/m ² .K
Masse surfacique	50,54 kg/m ²	Facteur d'amortissement	0,918
Résistance thermique	8,388 m ² .K/W	Déphasage	3h08'
Transmission thermique	0,119 W/m ² .K		

- Tmax dans le comble : 33,02°C
- Nombres d'heures avec T > 26°C : 107
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

- Total chauffage : 1 740 kWh
- Total réfrigération : 793 kWh
- Total annuel : 2 532 kWh



8- Augmentation de l'inertie du plafond intermédiaire

On utilise un plafond intermédiaire lourd (dalle béton de 16 cm), ce changement comporte non seulement le changement de l'inertie mais aussi de la transmission thermique entre comble et rez-de-chaussée (de la chaleur du comble est dissipée vers le rez-de-chaussée).

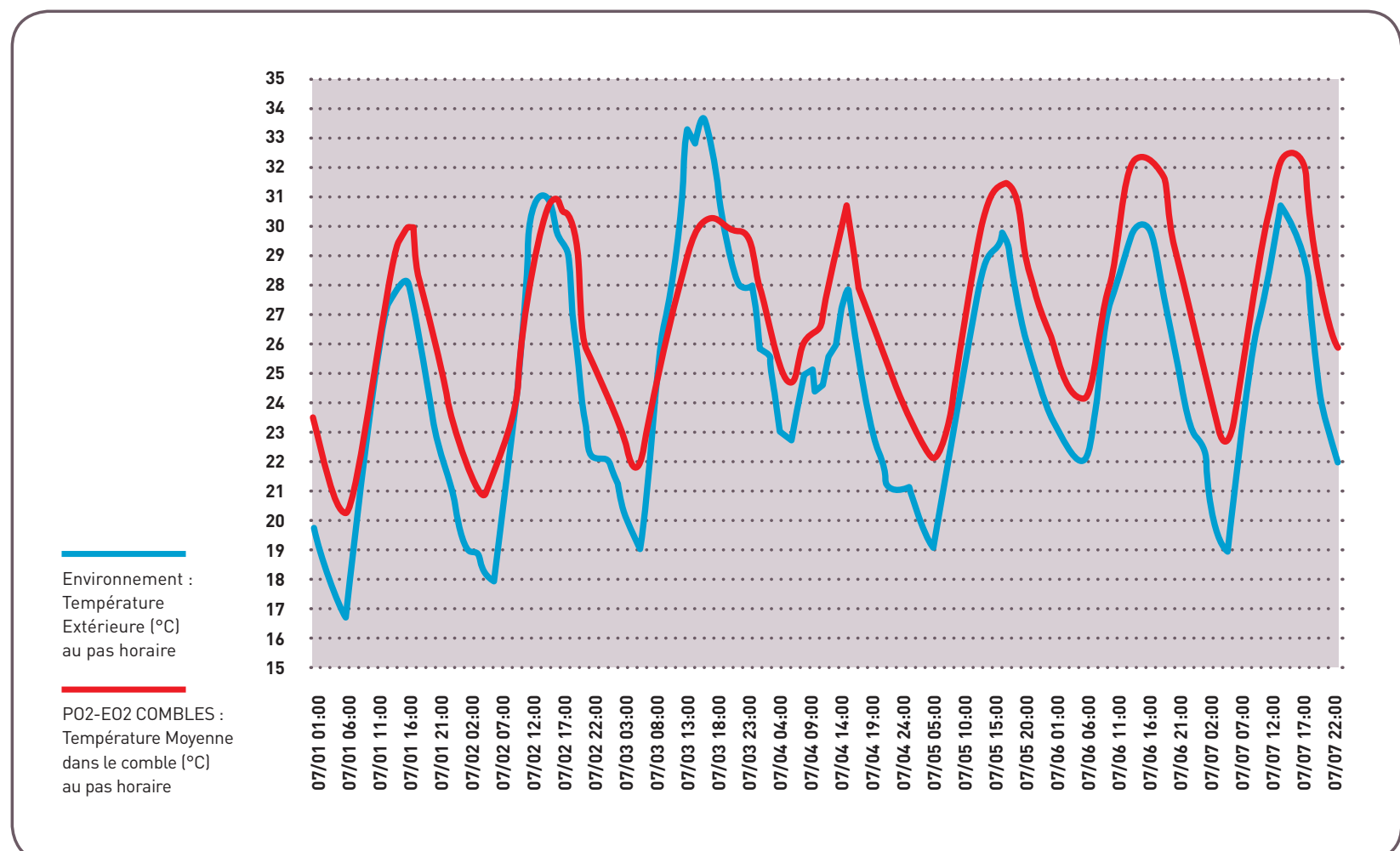
■ PLAFOND LOURD

	Epaisseur cm	Lambda W/m.K	Masse volumique Kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg.K
Grés céramique	2	1,9	2 300	1 000
Dalle Béton	16	2	2 400	1 000
Plaque de plâtre	1,5	0,25	800	1 000

DONNÉES GÉNÉRALES	
Epaisseur	0,223 m
Masse surfacique	458,40 kg/m ²
Résistance thermique	0,513 m ² .K/W
Transmission thermique	1,951 W/m ² .K

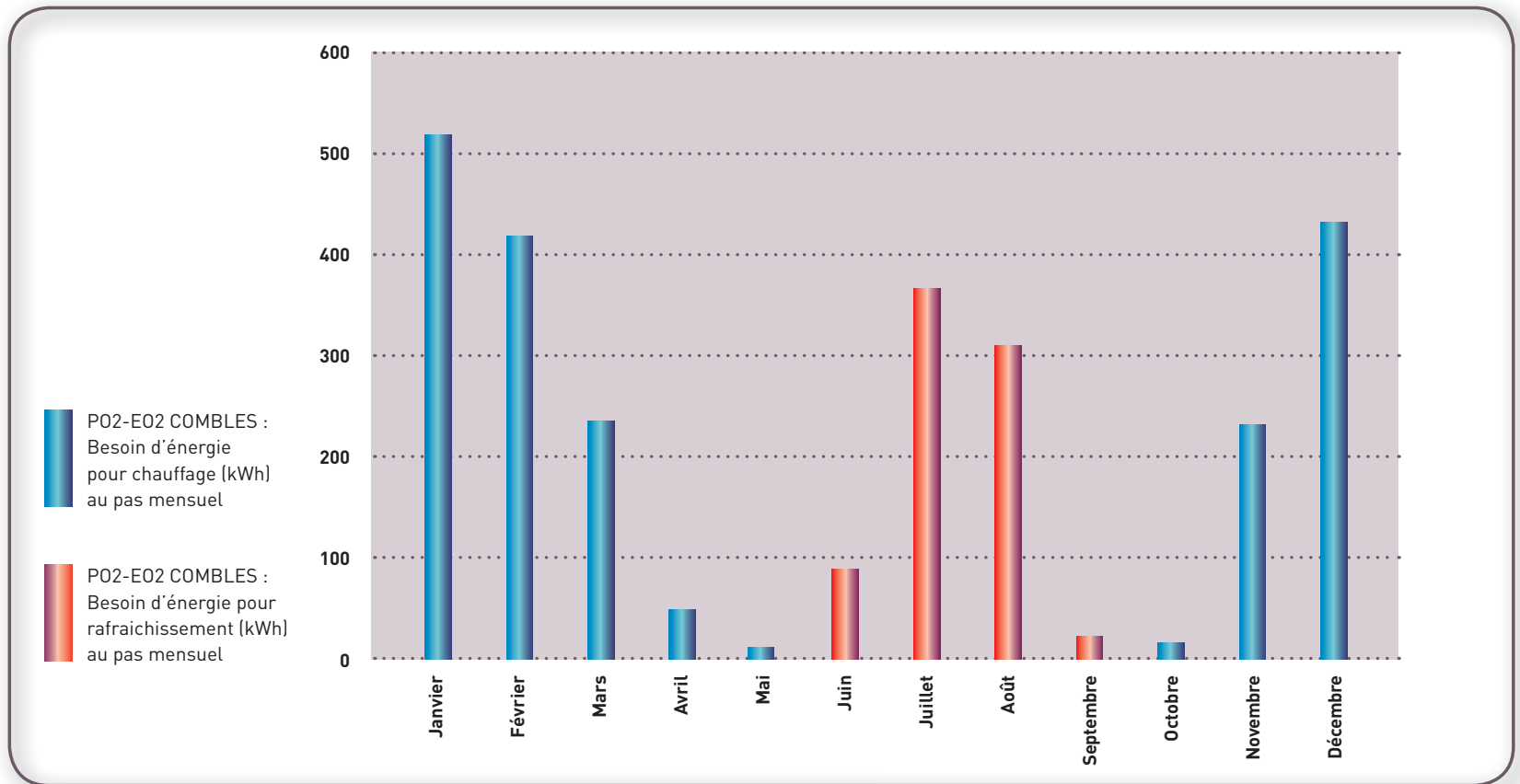
PARAMÈTRES DYNAMIQUES	
Transmission thermique périodique	0,652 W/m ² .K
Facteur d'amortissement	0,334
Déphasage	7h30'

- Tmax dans le comble : 32,42°C
- Nombres Heures avec T > 26°C : 97
- Evolution horaire des températures :



Besoins d'énergie mensuels Besoins d'énergie mensuels (20°C pendant hiver et 26°C pendant été)

- Total chauffage : 1 930 kWh
- Total réfrigération : 782 kWh
- Total annuelle : 2 713 kWh





*Syndicat National des Fabricants d'Isolants
en Laines Minérales Manufacturées*

1, rue du Cardinal Mercier - 75009 Paris
www.filmm.fr
lainesminerales@wanadoo.fr



imprimé sur papier recyclé avec des encres 100% végétale



01/2011 - © FILMM - Photos © FILMM - Conception