

# Déphasage des isolants biosourcés et impact sur le confort d'été dans les bâtiments

-

## Cadrage des notions associées et éléments d'évaluation de son influence effective

*Action soutenue par :*



*Edité en avril 2026*

## Table des matières

Avant-propos.....	3
Synthèse sur l'influence du déphasage vis-à-vis du confort d'été.....	4
Etude détaillée .....	6
<b>1. Notions préliminaires .....</b>	<b>6</b>
1.1. Déphasage, dans le bâtiment, de quoi parle-t-on exactement ? .....	6
1.2. Déphasage de la température intérieure par rapport à la température extérieure .....	7
1.3. Déphasage du flux de chaleur transmis depuis l'extérieur vers l'intérieur .....	8
<b>2. Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu .....</b>	<b>8</b>
2.1. Déphasage à l'échelle des parois .....	8
2.2. Déphasage à l'échelle bâtiment.....	10
<b>3. Le déphasage, son importance, ses limites et son domaine de pertinence.....</b>	<b>11</b>
3.1. L'importance de l'atténuation liée au déphasage.....	11
3.1.1. La chaleur transmise dépend surtout de l'atténuation .....	11
3.1.2. Et l'atténuation augmente plus rapidement que le déphasage avec l'épaisseur .....	11
3.1.3. L'impact thermique de la contribution des parois est généralement à nettement relativiser .....	12
3.2. Le déphasage global à l'échelle du bâtiment s'explique plus par l'inertie interne que par le déphasage de ses parois.....	14
3.3. Le déphasage doit intégrer les différentes couches de matériaux.....	14
3.4. Le déphasage ne quantifie que les variations des flux et pas leur niveau moyen .....	14
3.5. Les formules ont des domaines de validité restreints qui ne représentent pas forcément les conditions réelles .....	18
3.5.1. Représentativité des conditions limites.....	18
3.5.1.1. Formules simplifiées.....	18
3.5.1.2. Formules « détaillées ».....	21
3.5.2. Représentativité des sollicitations thermiques .....	23
3.5.2.1. Sollicitations sinusoïdales .....	23
3.5.2.2. Variabilité du coefficient d'échange externe .....	26
3.5.3. Détail sur le calcul réglementaire .....	26
3.6. Le déphasage ne se mesure pas simplement en conditions réelles.....	28

---

## Avant-propos

Le *déphasage* est couramment présenté comme un avantage majeur des isolants biosourcés<sup>1</sup>, par opposition aux isolants conventionnels, d'origine minérale ou issus de produits pétroliers, permettant d'assurer un bon confort d'été. Toutefois, l'impact réel de ce phénomène est critiqué et questionné<sup>2</sup>.

L'objectif de la présente note n'est pas tant d'orienter le débat d'un côté ou de l'autre, mais plutôt, de faire la part du « vrai » et du « faux » en précisant les « domaines de validité » des différentes assertions couramment lues ou entendues (dans quelles conditions sont-elles vraies ou fausses), afin d'éviter les conclusions trop hâtives et d'apporter les nuances qui font la richesse de ce sujet !

**Avertissement :** *bien que le but de ce document soit de vulgariser des notions relativement complexes, il n'en reste pas moins assez « technique ». Le lecteur trouvera une synthèse en début de document, qu'il pourra approfondir en suivant les renvois indiqués.*

*De plus, la vulgarisation impliquant des simplifications dans le discours, un lecteur averti pourrait relever des imprécisions ou des formulations critiquables. L'auteur et le commanditaire de l'étude sont évidemment ouverts à tous retours constructifs pouvant permettre d'améliorer le propos.*

Rédaction : Loïc Frayssinet, consultant indépendant en thermique du bâtiment

Relecture et mise en page : Nicolas Guignard, Hannah Höfte, Carlos Vazquez, EnvirobatBDM

---

<sup>1</sup> Voir notamment la publication « [confort d'été : l'atout des biosourcés](#) » de l'Association des Industriels de la Construction Biosourcée ou [la synthèse du groupe de travail « Isolant bio-sourcés et confort d'été »](#) d'Envirobat méditerranée (2013).

<sup>2</sup> Par exemple : voir la section « 8.4.2.2. Faut-il privilégier des isolants à fort déphasage ? » du [projet RESILIANCE](#), la section « et le déphasage thermique ? » de [la fiche pratique « l'inertie thermique : comment en faire un atout majeur pour des bâtiments performants et confortables ? »](#) du cercle Promodul, le résumé de cette [fiche PRORENO](#), le [guide métier « isolation des murs »](#) édité par Dorémi « le véritable impact du déphasage » p15, cet [article](#), ou encore ce [billet](#) ou l'[échange](#) sur ce forum d'un outil de Simulation Thermique Dynamique ou enfin sur ce [forum](#) ;

# Synthèse sur l'influence du déphasage vis-à-vis du confort d'été

Cette première partie vise à répondre de manière synthétique aux questions courantes qui se posent au sujet du déphasage en lien avec les isolants, notamment biosourcés, et le confort d'été dans le bâtiment.

***Avertissement :** s'agissant d'une synthèse, nous conseillons vivement au lecteur de lire les détails fournis dans la suite du document pour bien saisir les notions et les termes associés, et bien intégrer les nuances.*

## Les isolants biosourcés ont-ils un meilleur déphasage que les autres types d'isolant ?

Si l'on compare les isolants à épaisseur comparable, **généralement oui**, grâce à leur densité et surtout leur capacité calorifique généralement plus importante (voir section « 3.5.1.1. Formules simplifiées »).

## Comparativement à un autre type d'isolant, le meilleur déphasage des isolants biosourcés contribue-t-il à apporter un meilleur confort d'été ? <sup>3</sup>

Oui si :

- **leur capacité calorifique est meilleure** (c'est généralement le cas grâce à une plus forte densité, et/ou à une capacité calorifique massique<sup>4</sup> plus importante et/ou une épaisseur souvent plus importante pour être à résistance thermique égale - voir Figure 7, section « 3.5.1.1. Formules simplifiées ») ;
- **et que la comparaison se fait toutes choses égales par ailleurs** (taux de vitrage, protections solaires, usages, etc.), et notamment à résistance thermique égale (pour se placer à flux moyen transmis égal – voir « Le déphasage ne quantifie que les variations des flux et pas leur niveau moyen »).

Sinon (notamment si la résistance thermique n'est pas égale<sup>5</sup>), il n'est pas évident de conclure a priori (voir Figure 4 et Figure 5), et il conviendra alors d'étudier cela en détail à l'aide d'outils de modélisation thermique détaillés.

Il ne faut donc pas regarder le déphasage seul d'un matériau, mais aussi ses autres propriétés thermiques, notamment d'isolation (sa résistance thermique).

(Par ailleurs, pour les isolants non biosourcés, une estimation plus réaliste de leur déphasage, montre que, à épaisseur courante de mise en œuvre, ceux-ci sont encore moins performant que ce que n'indiquent les formules simplifiées couramment utilisées (voir Figure 7, section 3.5.1.1. Formules simplifiées)).

## Le déphasage engendré par les matériaux isolants de l'enveloppe joue-t-il un rôle important pour le confort d'été ?

**Plutôt non** car l'effet relatif est faible dans les configurations courantes des bâtiments récents (voir « 3.1.3. L'impact thermique de la contribution des parois est généralement à nettement relativiser »).

<sup>3</sup> Les potentiels phénomènes hygro-thermiques ne sont pas pris en compte ici.

<sup>4</sup> Certains experts interrogés questionnent la représentativité des bases de données couramment utilisées (Th-bat notamment), qui se baseraient sur peu de campagnes de mesures et dont le protocole de mesures ne serait pas toujours représentatif de l'échelle de mise en œuvre.

<sup>5</sup> Ce qui est couramment le cas par exemple lorsqu'on est limité en épaisseur (sous rampant ou en isolation de sol par-dessus par exemple), et que l'arbitrage va porter entre un isolant biosourcé (généralement avec une moins bonne résistance thermique mais un meilleur déphasage) et un isolant non-biosourcé (avec une meilleure résistance thermique mais un déphasage plus faible).

Mais l'impact tend à devenir sensible lorsque :

- Le bâtiment n'est pas ou peu isolé ;
- L'inertie interne est faible ;
- Les autres sources de chaleur sont faibles (peu d'apports internes, peu d'apports solaires transmis par les vitrages et faible renouvellement d'air ; exemple : cellier, cave, hangar de stockage, combles non aménagés, etc.).

Précisons par ailleurs que c'est plus le phénomène d'atténuation (ou d'amortissement) de l'onde de chaleur transmise, associé au déphasage, qui contribue au confort d'été que le déphasage lui-même (voir « L'importance de l'atténuation liée au déphasage »).

Aussi, l'inertie interne (ou d'absorption) du bâtiment joue généralement un rôle plus important dans la réponse thermique du bâtiment l'été (voir « Le déphasage global à l'échelle du bâtiment s'explique plus par l'inertie interne que par le déphasage de ses parois ») et c'est surtout elle qui « explique » le déphasage mesuré entre température extérieure et intérieure (voir différence entre « Déphasage à l'échelle bâtiment » et « Déphasage à l'échelle des parois »).

### **Le déphasage engendré par les composants de l'enveloppe joue-t-il un rôle important pour faire face aux vagues de chaleur ?**

**Plutôt non** car, pour les matériaux courants, à épaisseurs courantes de mise en œuvre, la variation (dite « séquentielle », s'étalant sur plusieurs *séquences* de jours) du niveau de chaleur moyen extérieur a largement le temps de pénétrer dans les matériaux sur des périodes suffisamment longues (quelques jours - voir « Figure 11 »).

Le déphasage des composants courants d'enveloppe ne contribue quasiment qu'à atténuer les variations quotidiennes des sources de chaleur (voir « Figure 7 »).

### **Les outils de simulation thermiques modélisent-ils correctement le déphasage ?**

**Oui, s'il intègre un calcul suffisamment détaillé.**

Le phénomène de déphasage est directement lié à la physique régissant les transferts de chaleur dynamiques à travers des éléments solides (conduction – équation de la chaleur). Il est tout à fait possible d'intégrer ces équations dans les outils de calcul numérique (c'est d'ailleurs l'intérêt des outils dit « dynamiques »).

La capacité d'un outil de calcul à prendre en compte ce phénomène de déphasage dépendra uniquement des hypothèses simplificatrices de modélisation retenues dans celui-ci.

### **L'outil de calcul réglementaire (RE2020) intègre-t-il le déphasage ?**

**Oui**, le phénomène de déphasage est pris en compte physiquement dans le calcul réglementaire, mais les hypothèses simplificatrices de modélisation retenues peuvent être critiquables quant à leur représentativité (voir « 3.5.3. Détail sur le calcul réglementaire »).

### **Peut-on mesurer simplement le déphasage d'un matériau dans un bâtiment en conditions réelles ?**

**Non**, car il est difficile en pratique d'isoler la contribution d'une paroi de celle des autres et impossible en pratique de dissocier contribution de l'inertie par transmission et interne (voir « Le déphasage ne se mesure pas simplement en conditions réelles » et « Les formules ont des domaines de validité restreints qui ne représentent pas forcément les conditions réelles »).

---

# Etude détaillée

## 1. Notions préliminaires

### 1.1. Déphasage, dans le bâtiment, de quoi parle-t-on exactement ?

D'un point de vue physique, le **déphasage** quantifie le **décalage temporel entre deux "ondes"** (plus précisément le décalage entre deux points similaires de ces courbes, par exemple, généralement, les maximums). Par « onde » on entend les variations cycliques d'une grandeur physique.

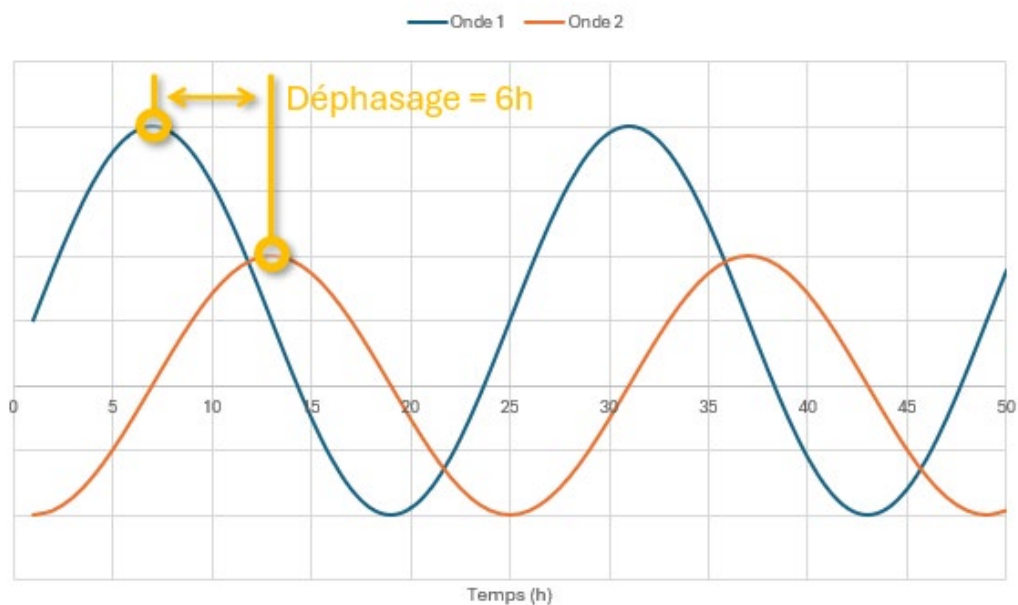


Figure 1- Illustration du déphasage

Lorsque cette notion est utilisée en lien avec le confort d'été dans le bâtiment, les ondes s'étudient par rapport à leur *oscillation quotidienne* (jour-nuit/chaud-froid), donc sur une période de 24h, et les grandeurs étudiées sont :

- 1) soit les **températures extérieure et intérieure au bâtiment** ; dans ce cas on se place à l'échelle globale du bâtiment ;

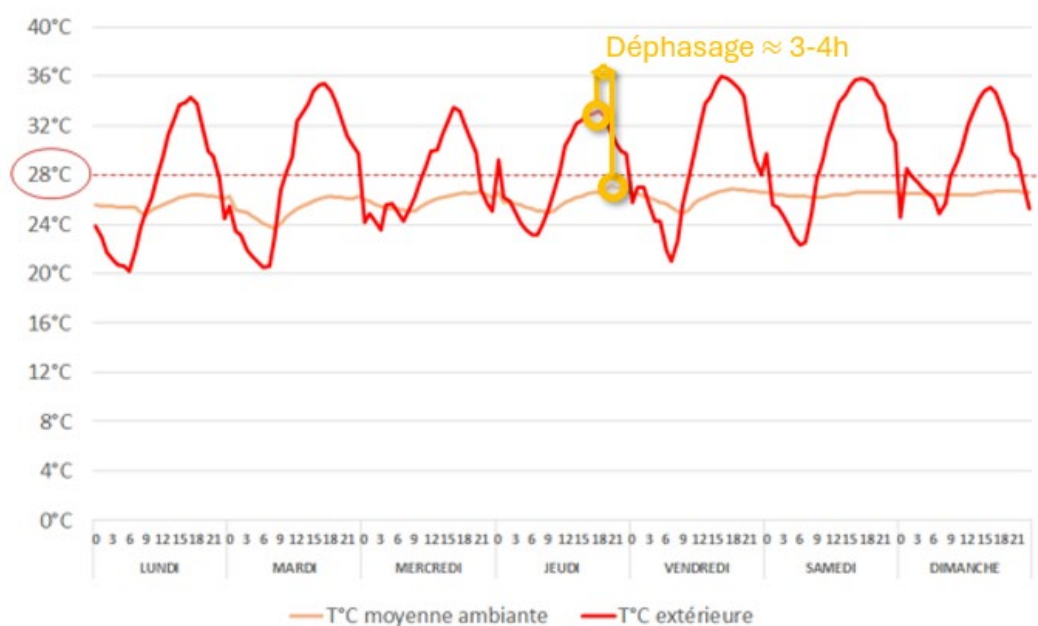


Figure 2 - Exemple de températures intérieure et extérieure mesurée sur un cas d'étude réel.  
Source : [Rapports APR LowCal](#) - Enertech

2) soit **les flux de chaleur** (« quantité de chaleur » par unité de temps) transmis en faces **externe** et **interne** ; on se place à alors à l'échelle d'un élément de parois.

## 1.2. Déphasage de la température intérieure par rapport à la température extérieure

Dans ce premier cas, on cherche à quantifier le temps que prendra la température intérieure pour atteindre son maximum après que la température extérieure l'ait atteinte et donc la **capacité du bâtiment, dans son ensemble, à retarder son échauffement diurne** (on cherche à retarder<sup>6</sup> le plus possible le pic de chaleur à l'intérieur du bâtiment pour qu'il ait lieu la nuit, lorsque la température extérieure est plus faible, et au moment où la potentielle sur-ventilation nocturne peut « s'opposer » à cette surchauffe).

Nous verrons que ce déphasage à l'échelle globale du bâtiment, pour être quantifié, nécessite l'estimation de tous les apports de chaleurs dans le bâtiment au cours du temps et au niveau de tous ses constituants (apports solaires à travers les fenêtres, apports de chaleur à travers les parois, apports internes, etc.) en intégrant les phénomènes liés à l'inertie aussi bien par transmission que par absorption (dite également inertie interne)<sup>7</sup>.

Il ne peut donc pas être estimé « simplement », comme étant notamment la somme des déphasages des constituants pris individuellement. Il nécessite d'effectuer un bilan thermique dynamique intégrant les flux transmis par toutes les sources de chaleur du bâtiment (pour cela, on recourt généralement à des outils de simulation thermique dynamique).

<sup>6</sup>Mais surtout atténuer (voir L'importance de l'atténuation liée au déphasage)

<sup>7</sup> Voir plus de détail sur ces différentes inerties par exemple dans la publication « [l'inertie thermique dans le bâtiment](#) » de Jean-Louis Izard.

## 1.3. Déphasage du flux de chaleur transmis depuis l'extérieur vers l'intérieur

Dans le second cas, on cherche à quantifier le temps que prend la chaleur pour traverser une paroi (composée d'un ou plusieurs matériaux) et donc sa **capacité à freiner/retarder le transfert de chaleur de l'extérieur** (source de chaleur en journée) **vers l'intérieur** (ambiance que l'on cherche à préserver de la chaleur).

Ce déphasage caractérise donc un matériau (ou un complexe de matériaux) et permet de donc de comparer ses performances (en termes de capacité à ralentir le transfert de chaleur en son sein) par rapport à d'autres.

	« Déphasage des températures »	« Déphasage des flux »
<b>Échelle</b>	Bâtiment (pièce)	Composant (parois)
<b>Ce qu'on cherche à estimer</b>	Capacité du bâtiment dans son ensemble à retarder son échauffement diurne	Capacité à freiner/retarder le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur
<b>Comment l'estime-t-on ?</b>	Est une résultante du bilan thermique global du bâtiment (intégrant notamment les déphasages des flux des différentes parois), mais aussi l'inertie interne, les autres apports de chaleurs, etc.	A partir des caractéristiques thermiques des matériaux du composant
<b>Grandeurs associés</b>	Inertie interne (par absorption), inertie par transmission, apports de chaleurs internes et transmis, etc.	Inertie par transmission

C'est ce second déphasage, celui des flux, qui fera l'objet de la présente note, car c'est celui-ci qui est (et qui doit) être utilisé lorsque l'on cherche à caractériser les performances individuelles des différents composants d'un bâtiment (rôle des isolants notamment), vis-à-vis du confort d'été, même si, au final, c'est le premier que l'on cherche à obtenir.

## 2. Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu

### 2.1. Déphasage à l'échelle des parois

La chaleur dans un matériau solide se propage de proche en proche. En l'absence d'inertie, les fluctuations thermiques à l'extérieur se répercuteraient instantanément côté intérieur (on peut considérer que c'est notamment le cas pour des vitrages par exemple, à cause de leur faible épaisseur comparativement aux parois opaques).

Le transfert de chaleur peut être réduit ou freiné (et donc déphasé) :

- soit parce que le matériau est isolant (pour obtenir un flux de chaleur donné, l'échauffement doit être d'autant plus important que le matériau est isolant) ;
- soit parce que le matériau est (thermiquement) inertiel (plus il est inertiel, plus la quantité de chaleur à lui apporter pour obtenir une montée en température donnée est importante).

Évidemment, ces conditions peuvent se cumuler.

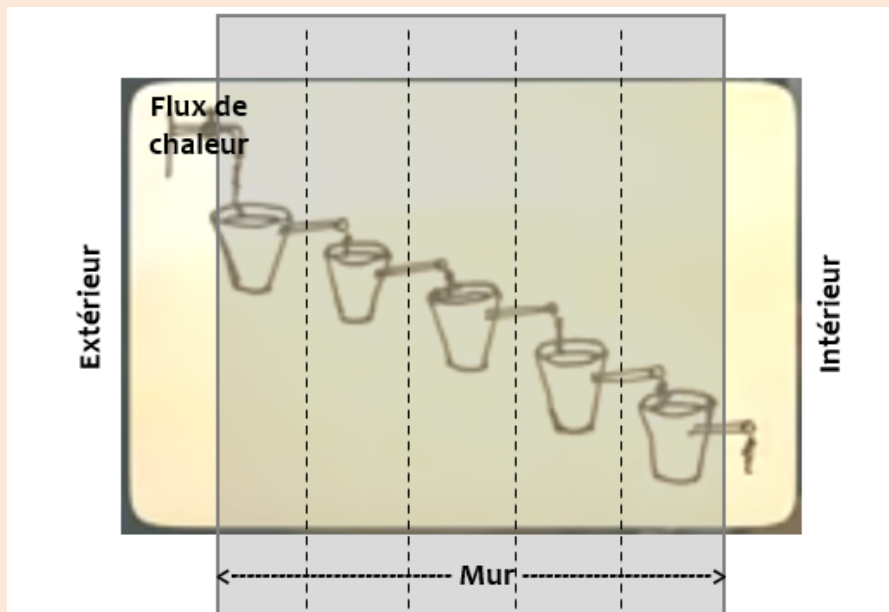
La capacité d'un matériau à freiner une fluctuation thermique (son inertie par transmission) se caractérise par sa diffusivité ( $a$  en  $m^2/s$ ), qui se calcul comme suit :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c}$$

avec  $\lambda$  sa conductivité thermique (en  $W/m/K$ ) ;  $\rho$  sa masse volumique (en  $kg/m^3$ ) et  $c$  sa capacité calorifique massique (en  $J/K/kg$ ).

A épaisseur égale, un matériau plus diffusif (faible inertie par transmission) transmettra avec moins de retard une fluctuation thermique qu'un matériau moins diffusif (forte inertie par transmission).

L'analogie suivante aide à se représenter l'influence de ces deux paramètres :



Analogie pour le transfert de chaleur dynamique inspirée d'une représentation de [Papy Claude](#).

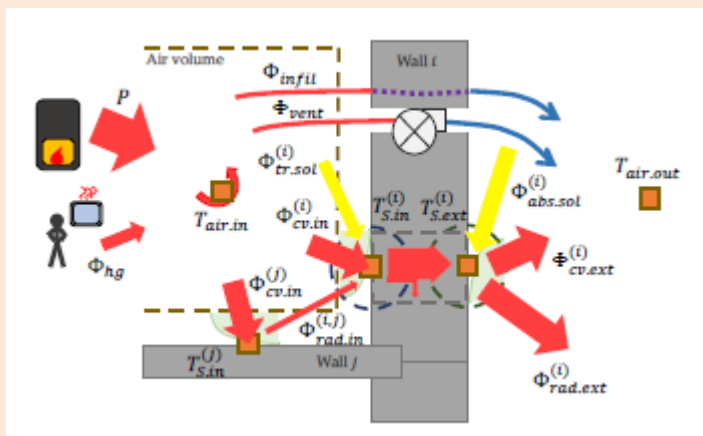
- le flux de chaleur s'apparente au débit d'eau ;
- la capacité isolante ( $\lambda$ ) à la taille des fuites des seaux ;
- la capacité inertiel ( $\rho \times c$ ) à la taille des seaux.

L'inertie par transmission augmente (« l'eau » transite moins vite et en faible quantité) :

- plus le matériau est isolant ( $\lambda$  faible, diminue la diffusivité) ;
- plus le matériau est inertielle ( $\rho \times c$  important, diminue la diffusivité) ;
- plus le matériau est épais (augmente la « distance » à parcourir par la chaleur).

## 2.2. Déphasage à l'échelle bâtiment

Comme indiqué précédemment, pour estimer le déphasage des températures à l'échelle du bâtiment, il convient de déterminer l'évolution dans le temps de l'ensemble des flux thermiques auxquels l'intérieur du bâtiment est soumis, en intégrant la réponse « dynamique » des parois, due à leur inertie.



Représentation schématique des flux de chaleur intervenant dans un bilan thermique d'un bâtiment

Nous avons vu que les flux transitant via les parois sont déphasés (inertie par transmission – le flux de chaleur passe de l'extérieur vers l'intérieur), mais aussi les flux absorbés par les parois internes : ils ne réchauffent pas directement l'ambiance, ils sont « temporisés » par l'inertie des parois internes.

Dans ce dernier cas, l'inertie mise en jeu est appelée inertie interne (ou par absorption – le flux rentre et sort alternativement des parois internes)<sup>8</sup>. Celle-ci est caractérisée par l'effusivité ( $e$  en  $J/m^2/K/s^{1/2}$ ) qui se calcule comme suit :

$$e = \sqrt{\lambda \times \rho \times c}$$

L'inertie par absorption augmente :

- plus le matériau est conducteur ( $\lambda$  important, augmente l'effusivité) – il a alors une plus grande capacité à transmettre, on pourrait dire « absorber », « facilement » la chaleur en son sein ;
- plus le matériau est inertiel ( $\rho \times c$  important, augmente l'effusivité) – il a alors une plus grande capacité à stocker de la chaleur en montant peu en température ;

**En résumé, on ne peut donc pas estimer le déphasage à l'échelle du bâtiment directement à partir du déphasage de ses constituants, car il est la résultante de plusieurs phénomènes (inertie par transmission et par absorption, dynamique des flux instantanés, etc.). Un bilan thermique dynamique global est nécessaire.**

<sup>8</sup> Pour approfondir la distinction entre ces deux aspects de l'inertie, voir par exemple la publication « [l'inertie thermique dans le bâtiment](#) » de Jean-Louis Izard.

## 3. Le déphasage, son importance, ses limites et son domaine de pertinence

### 3.1. L'importance de l'atténuation liée au déphasage

#### 3.1.1. La chaleur transmise dépend surtout de l'atténuation

Le déphasage caractérise donc le temps que prend une onde de chaleur à traverser une paroi de l'extérieur vers l'intérieur.

Mais, ce qui est rarement mentionné, et pourtant bien plus important dans un bilan thermique, c'est que ce phénomène de déphasage est associé à un phénomène d'atténuation<sup>9</sup> des amplitudes des flux, c'est-à-dire que le flux de chaleur transmis à l'intérieur est moins important que le flux de chaleur reçu à l'extérieur.

En effet, c'est avant tout la quantité de chaleur qui rentre qui nous intéresse pour estimer l'échauffement intérieur (voir « Déphasage à l'échelle des parois »). Il est en effet attendu d'un composant de paroi « performant » vis-à-vis du confort d'été qu'il limite le plus possible les apports de chaleur (pas nécessairement qu'il les décalent seulement dans le temps).

**C'est donc plus le phénomène d'atténuation qu'il faudrait regarder pour comparer deux compositions de parois, plutôt que le déphasage.**

#### 3.1.2. Et l'atténuation augmente plus rapidement que le déphasage avec l'épaisseur

Il convient de remarquer que, pour les matériaux courant de construction, l'atténuation atteint assez rapidement des valeurs importantes sur les premiers centimètres d'épaisseur (flux de chaleur transmis tendant vers zéro) avant d'évoluer plus lentement.

Ainsi, par exemple (voir figure 3 ci-dessous) en doublant l'épaisseur d'une paroi de béton de 10 cm on multiplie le déphasage par 2 et on augmente l'atténuation de 56 %. En multipliant encore par deux cette épaisseur, on multiplie toujours le déphasage par 2 mais on augmente l'atténuation de seulement 30 %.

---

<sup>9</sup> On parle aussi d'amortissement.

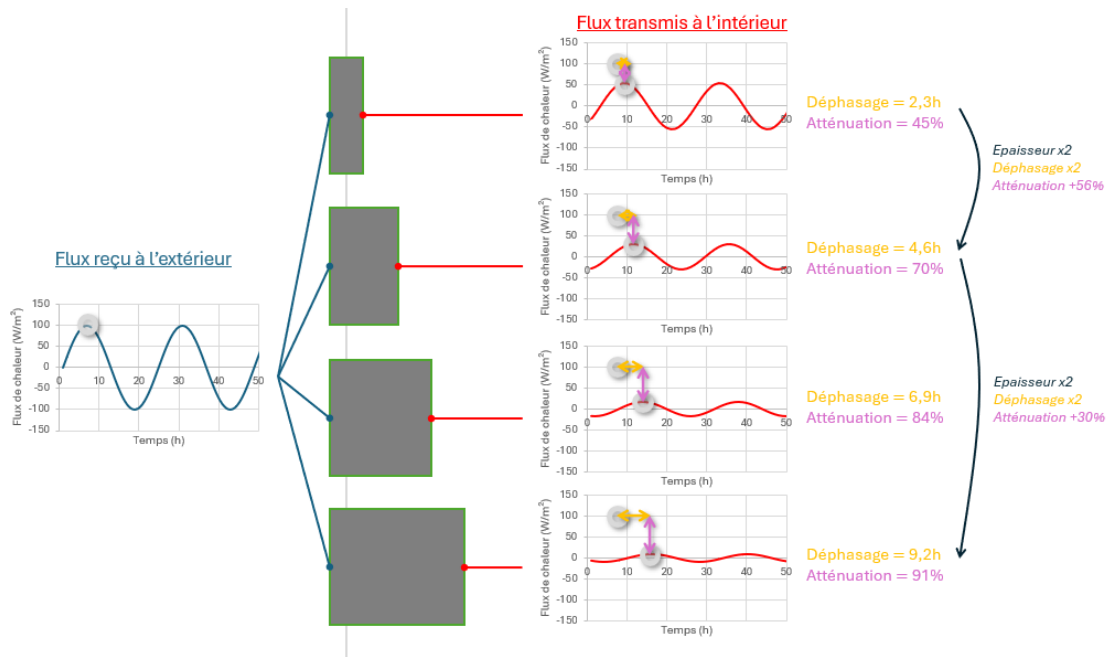


Figure 3 - Illustration de l'évolution du flux transmis en fonction de l'épaisseur de la paroi

Autrement dit à partir d'une certaine épaisseur, chercher à augmenter le déphasage (viser 12 h par exemple dans notre illustration) ne permettra de réduire les apports de chaleur qu'à la marge (déjà réduit de 91 % pour un déphasage de 9,2 h ; avec 12 h de déphasage on ne gagnera que 5 % d'atténuation supplémentaires en ayant augmenté l'épaisseur de 30 %).

Dit autrement, un composant de paroi ayant un déphasage 2 fois plus grand qu'un autre, ne sera pas 2 fois plus performant (plus performant, mais moins que deux fois plus), et ce d'autant moins que les déphasages considérés seront déjà relativement importants.

### 3.1.3. L'impact thermique de la contribution des parois est généralement à nettement relativiser

Comme indiqué précédemment, la quantification du confort d'été à l'échelle globale du bâtiment passe par l'intégration de toutes les contributions thermiques : les apports de chaleurs transmis par les parois opaques (celles qui nous intéressent ici), mais aussi la chaleur transmise par les fenêtres, avec notamment les apports solaires, et les apports internes.

La contribution des parois opaques n'est donc qu'un des éléments parmi d'autres qui explique le confort d'été.

Pour fixer des ordres de grandeurs, une paroi vitrée transmet de l'ordre de 600 W/m<sup>2</sup> au plus fort de la journée en été, et en moyenne sur la journée, autour de 300 W/m<sup>2</sup> pour les expositions les plus ensoleillées. Même une paroi orientée au Nord transmettra de l'ordre de 100 W/m<sup>2</sup> en moyenne sur la journée.

Les facteurs solaires (quantité d'énergie solaire transmise par rapport à celle reçue) des parois opaques varient approximativement entre 2 et 0,3 % selon leur niveau d'isolation. La chaleur transmise par les parois opaques due à l'ensoleillement<sup>10</sup> est donc inférieure d'un facteur 100 à 1000 par rapports aux parois vitrées, à surface égale.

Même en intégrant que les surfaces vitrées sont 5 à 10 fois moins importantes que les surfaces opaques, on a toujours un ou deux ordres de grandeur d'écart.

<sup>10</sup> Les apports de chaleurs par conducto-convection sont négligés, car les différences de température entre intérieur et extérieur sont généralement assez faibles l'été en moyenne (les flux engendrés sont bien moins importants que ceux générés par l'ensoleillement solaire) et de toute façon, les vitrages et le renouvellement d'air apporteront bien plus de chaleur que les parois opaques (facteur 5 à 2 en termes de coefficient de déperdition).

Et on ne parle pas ici en plus des autres sources de chaleur.

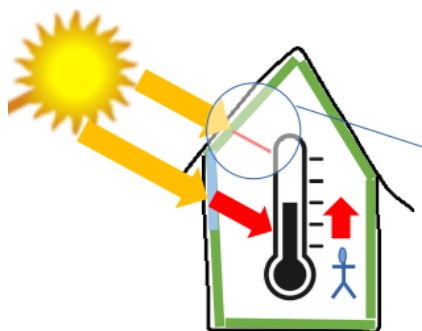
Autrement dit, les apports de chaleur via les parois opaques sont généralement minoritaires dans le bilan thermique estival d'un bâtiment courant (d'autant plus qu'il est isolé). Dans ces cas, leur réduction, notamment via un meilleur déphasage (une meilleure atténuation) aura donc un effet mineur à l'échelle globale du bâtiment (mais pas à l'échelle du composant !)

Ce point est à nuancer, dans des cas de figures particuliers, où l'influence du déphasage et de l'atténuation peut être sensible, tels que :

- pour des locaux ayant de très faibles surfaces vitrées (combles aménagés très peu vitrés, église, etc.)
- en présence de murs capteurs (murs d'enveloppe volontairement non isolés destinés à capter le rayonnement solaire pour le restituer à l'intérieur)

	Cas		
	courant	"limite"	"extrême" très favorable à l'influence des parois opaques
Taux de surface vitrée	20%	10%	5%
Orientation des fenêtres	Sud	Sud	Nord
Orientation des murs	Sud	Sud	Toiture plate
Type de vitrage	Double	Double	Double perf
Taux d'ombrage des fenêtres	75%	75%	90%
Isolation des murs	Moyenne	Faible	Faible
<b>Proportion des flux solaire transmis par</b>			
les fenêtres	87%	50%	5%
les parois opaques	13%	50%	95%
<b>Relativisé pour 10m<sup>2</sup> de façade et les apports internes d'un occupant</b>			
les fenêtres	29%	15%	2%
les parois opaques	4%	15%	34%

Note : pour obtenir des proportions inverses, il faut jouer sur tous les plans : réduire au maximum les apports des vitrages (orientation, masque, faible facteur solaire) et maximiser le captage des apports des surface opaques (orientation, faible isolation). Ce cas « sort de l'ordinaire ». Toutefois, même dans ce cas extrême, l'intégration d'apports internes permet de relativiser la contribution (d'autant plus si l'on ajoutait les contributions par renouvellement d'air).



### 3.2. Le déphasage global à l'échelle du bâtiment s'explique plus par l'inertie interne que par le déphasage de ses parois

Comme montré précédemment, les contributions thermiques des parois opaques d'un bâtiment isolé sont relativement négligeables devant les autres sources de chaleur. En conséquence, le déphasage observé à l'échelle du bâtiment (voir « Figure 11 ») ne peut être expliqué que par les déphasages engendrés par ces parois.

Il s'explique en réalité plus par la dynamique de l'inertie interne (la chaleur transmise dans le bâtiment est d'abord absorbée par parois intérieures qui, grâce à leur inertie interne, s'échaufferont donc progressivement, avec un certain retard/déphasage).

#### Illustration sur un cas concret

Par exemple, dans le cas d'étude de la « Figure 2 - Exemple de températures intérieure et extérieure mesurée sur un cas d'étude réel. Source : Rapports APR LowCal - Enertech », le déphasage observé à l'échelle de ce bâtiment en paille est de 3-4 h . Pourtant, le déphasage théorique de ses parois est de 12h. Rappelons que dans ce cas la grande majorité des flux provient des apports solaires et internes et que leur contribution sont instantanées (non-déphasées).

Même en intégrant le fait que 15 % des surfaces sont vitrées (donc sans déphasage), on ne parvient pas à aboutir à la valeur de déphasage observée.

En revanche, en estimant relativement grossièrement une « constante de temps intérieure » calculée comme le rapport de l'inertie interne quotidienne sur le coefficient d'échange superficiel intérieur, on trouve bien une valeur plus cohérente avec les observations, de l'ordre de 5 h.

C'est donc bien plus l'inertie interne qui explique le déphasage observé à l'échelle du bâtiment que le déphasage des constituants de son enveloppe.

### 3.3. Le déphasage doit intégrer les différentes couches de matériaux

Il est essentiel d'intégrer toutes les couches de matériaux constituant une paroi dans le calcul du déphasage. En effet :

- d'une part, chaque couche contribue à augmenter le déphasage (et l'atténuation) ;
- et d'autre part, l'effet cumulé est plus important que la somme des effets individuels.

Par exemple, une plaque de plâtre seule engendre un déphasage d'environ 12 min, mais placée en face interne d'une laine de verre, elle augmente de plus de 3 h le déphasage (initialement d'environ 3 h) et de presque 2 h pour une laine de bois (pour un déphasage initial d'environ 10 h).

### 3.4. Le déphasage ne quantifie que les variations des flux et pas leur niveau moyen

Il est essentiel de préciser, car cela est souvent omis, que les notions de déphasage et d'atténuation ne caractérisent que les amplitudes de variations des grandeurs observées (flux de chaleur ou température), mais nullement le niveau moyen de celles-ci.

Pour illustrer ce propos, prenons l'exemple fictif suivant de deux composants de parois :

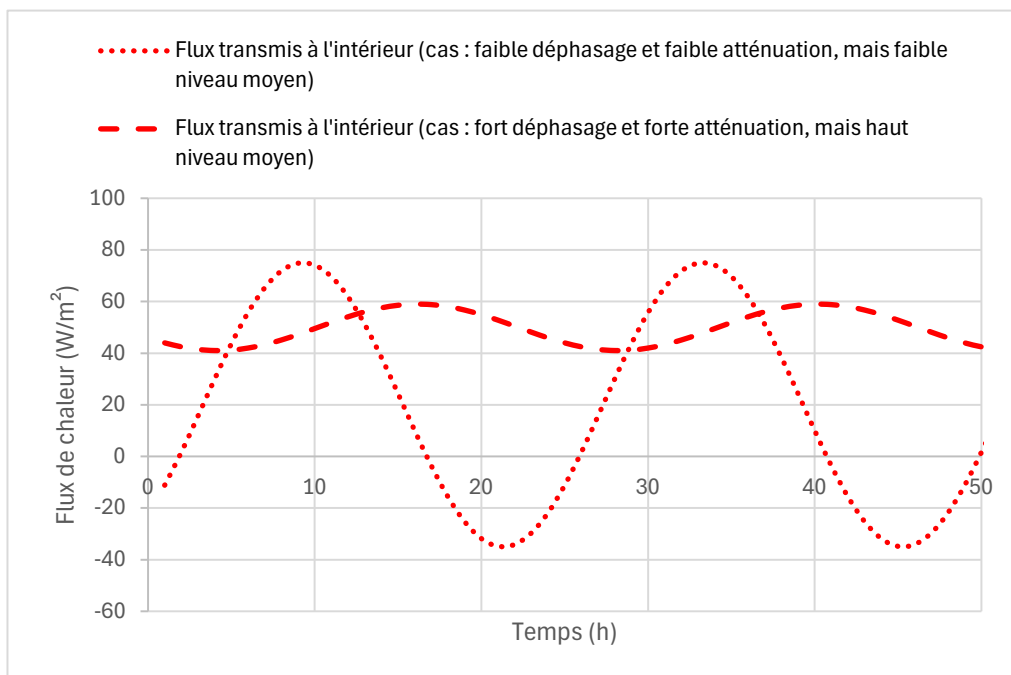


Figure 4 - Comparaison de flux de chaleur suivant différentes configurations intégrant les niveaux moyens

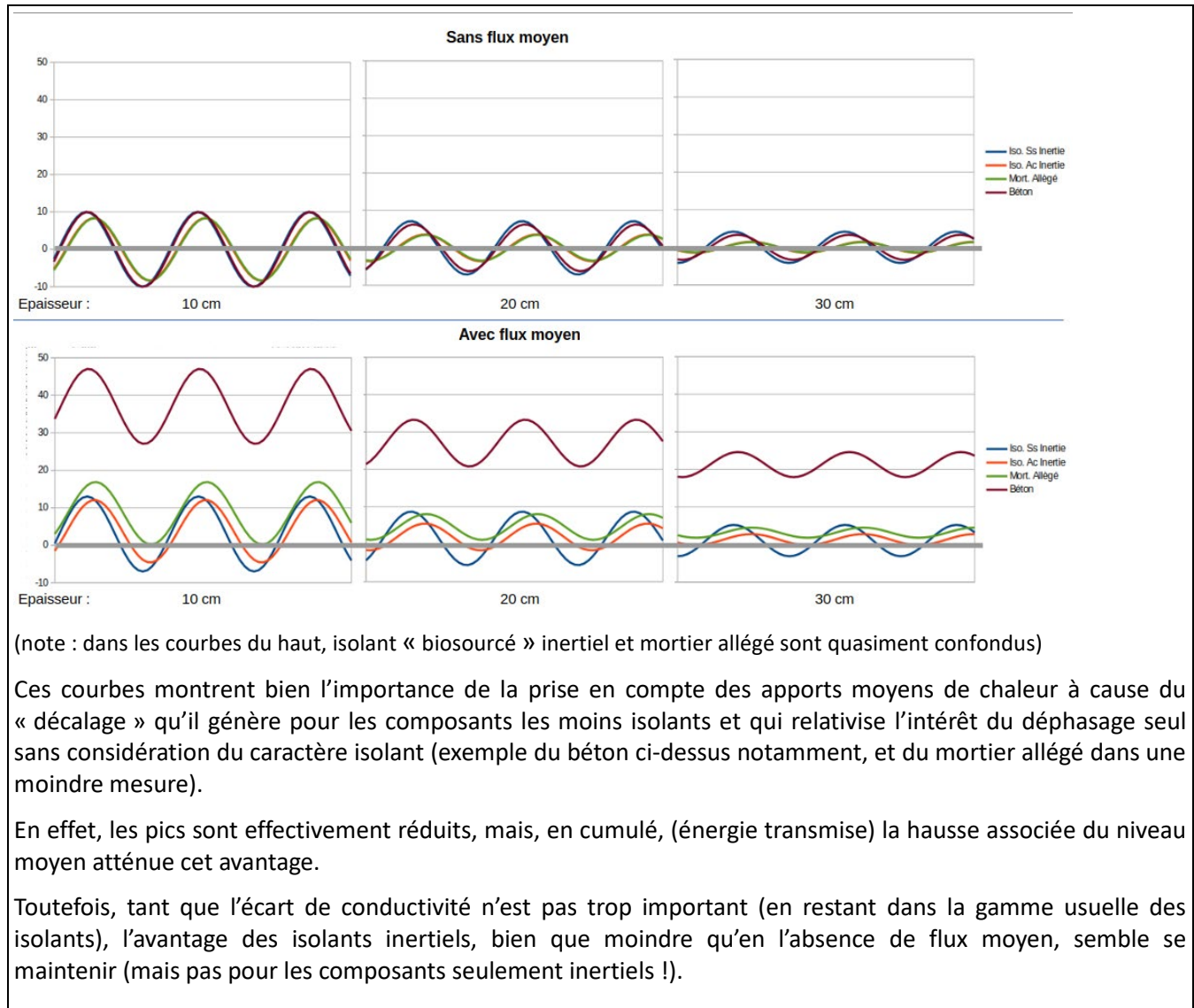
- Le premier correspond à un composant qui aurait un faible déphasage et une faible atténuation (défavorable a priori - matériaux diffusif), mais un faible niveau moyen (favorable a priori - lié, en valeur moyenne, à sa résistance thermique<sup>11</sup>) ;
- Le second correspond à un composant qui aurait un fort déphasage et une forte atténuation (défavorable a priori - matériaux peu diffusif), associé à un fort niveau moyen (défavorable a priori).

On voit ici que les notions seules de déphasage et d'atténuation ne se suffisent pas. Il convient de considérer le bilan global du composant, sous ses aspects dynamiques (atténuation et déphasage des amplitudes) et statiques (transfert de chaleur moyen).

Même avec ces aspects pris en compte, en l'état, il n'est pas évident de déterminer quel composant est « meilleur » pour le confort d'été : le premier a des fortes variations (peut entraîner des surchauffes localisées en journée), mais un niveau moyen assez bas, assurant une décharge thermique en période favorable ; tandis que le second transmet bien moins les surchauffes mais maintient un flux moyen élevé.

Pour rendre le raisonnement plus appliqué et moins théorique, une estimation avec les formules simplifiées (sachant leurs limites détaillées Erreur : source de la référence non trouvée), pour des composants courants (isolant minéral peu inertiel –  $\lambda=0,032\text{W/m/K}$ , isolant « biosourcé » inertiel -  $\lambda=0,04$  ; mortier allégé -  $\lambda=0,1$  ; béton -  $\lambda=1$ ) donne les courbes suivantes :

<sup>11</sup> Pour plus de détails se référer aux publications suivantes « [Comprendre les inerties thermiques dans les bâtiments](#) » de Pierre Lavigne et « [Confort d'été dans l'habitat après rénovation](#) » section 2.4.



En définitive, seul un bilan thermique dynamique global à l'échelle du bâtiment en intégrant toutes les contributions des différents composants (parois opaques, mais aussi vitrées, inertie interne, apports interne, etc.) et la définition d'un indicateur de confort (temps au-delà d'un seuil de température ? cumul des dépassements ? etc.) permettra de comparer des composants entre eux.

A titre d'illustration, imaginons que le bilan thermique global de deux cas fictifs aboutisse aux évolutions des température suivantes :

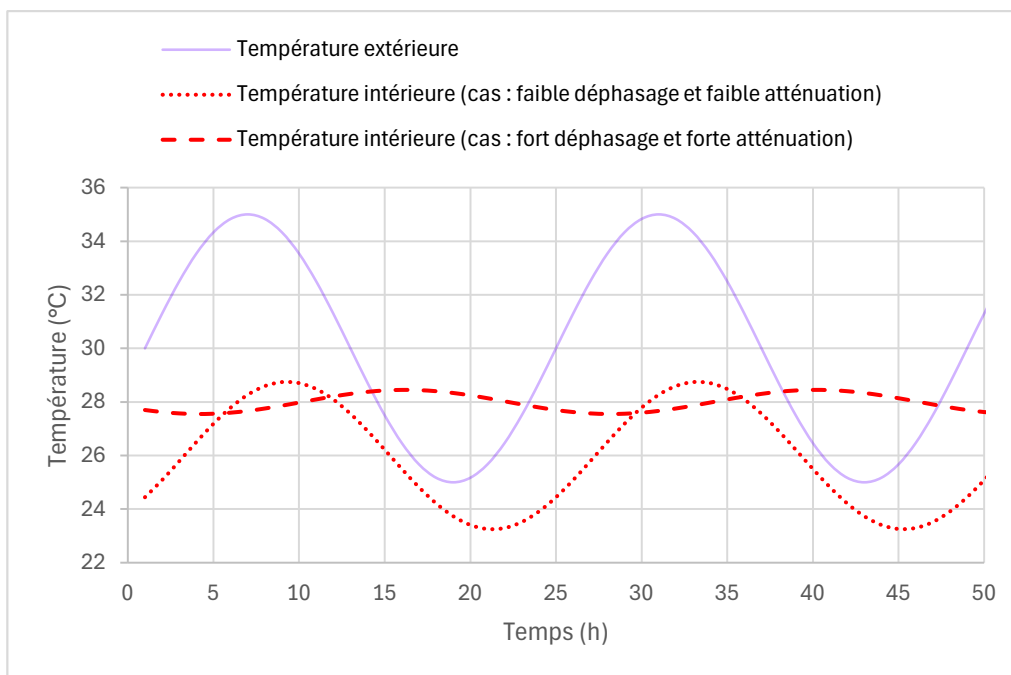


Figure 5 - Comparaison des températures intérieures résultantes suivant différentes configurations

- Dans le premier cas, les variations de température intérieure sont assez importantes ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) (dû potentiellement à des parois ayant un faible déphasage et une faible atténuation, mais aussi potentiellement à une mauvaise protection des apports solaires, une mauvaise maîtrise des apports internes et une mauvaise inertie interne), mais le niveau moyen de température résultant de  $26^\circ\text{C}$  permet de ne dépasser qu'occasionnellement le seuil de  $28^\circ\text{C}$  (potentiellement dû à une bonne résistance thermique ou surtout une bonne sur-ventilation nocturne);
- Dans le second cas, les variations de température intérieure sont faibles ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) (dû potentiellement à des parois ayant un fort déphasage et une forte atténuation, mais aussi potentiellement à une bonne protection des apports solaires, une bonne maîtrise des apports internes et une bonne inertie interne), mais le niveau moyen de température fait que la température oscille autour du seuil de  $28^\circ\text{C}$  (potentiellement dû à une mauvaise résistance thermique ou surtout une mauvaise sur-ventilation nocturne) ;

Difficile dans cette configuration de statuer sur le cas le plus inconfortable (en cumulé le dépassement de température est équivalent).

En conséquence, **il est difficile d'affirmer a priori qu'un composant ayant un meilleur déphasage (et surtout atténuation) est meilleur qu'un autre vis-à-vis du confort d'été si on ne les compare pas à résistance thermique égale** (niveau moyen égal), ou suffisamment proche (et toutes choses égales par ailleurs).

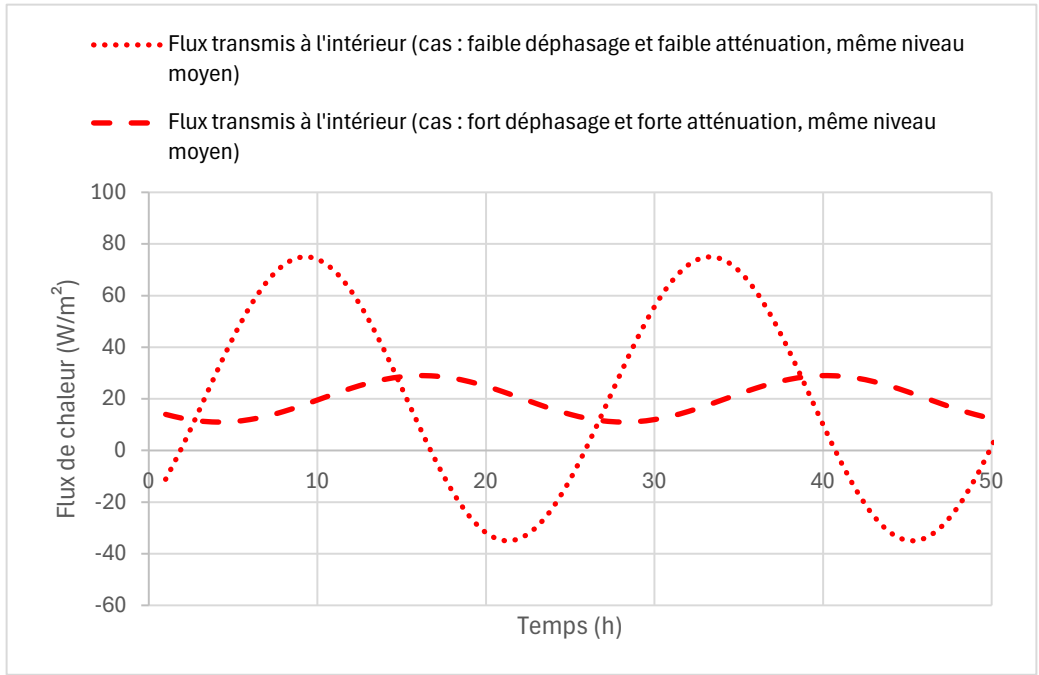


Figure 6 - Comparaison de flux de chaleur suivant différentes configurations pour des niveaux moyens identiques

Dans ces cas, seul un bilan thermique global à l'échelle du bâtiment permet réellement de trancher.

### 3.5. Les formules ont des domaines de validité restreints qui ne représentent pas forcément les conditions réelles

#### 3.5.1. Représentativité des conditions limites

##### 3.5.1.1. Formules simplifiées

Les formules les plus utilisées supposent un matériau dit « semi-infini ». Ce cas de figure est représentatif d'un sol par exemple, dont les variations de température (ou de flux) se font à sa surface et où l'on cherche à déterminer l'évolution des températures en profondeur (utile pour les puits climatiques par exemple).

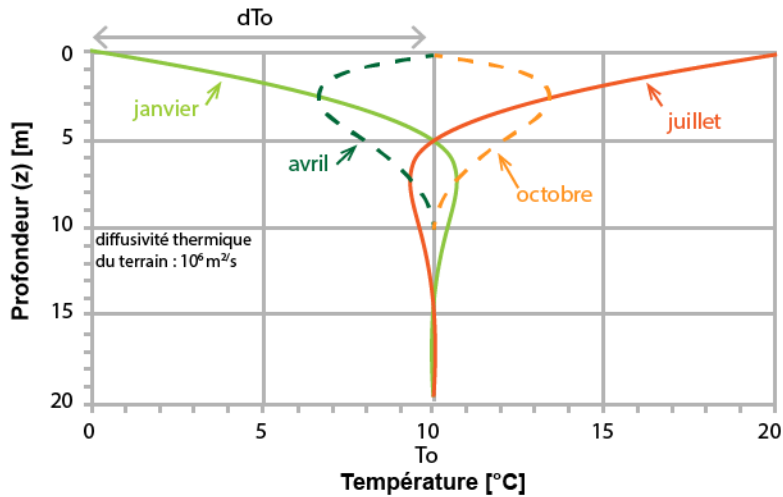


Figure 7 – Evolution saisonnière des températures dans un sol en fonction de la température (Source : [energieplus-lesite.be](http://energieplus-lesite.be))

Dans le cas d'une paroi, l'épaisseur étant finie, cette hypothèse est critiquable. D'une façon générale, on se rapproche de l'hypothèse « semi-infini » pour de fortes épaisseurs. De façon plus précise, l'hypothèse semi-infinie est valable lorsque l'épaisseur du matériau est de l'ordre de 4 fois l'épaisseur de pénétration<sup>13</sup> ( $\sqrt{\frac{\alpha \cdot T}{\pi}}$ , avec la  $\alpha$  diffusivité – voir « Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu » - et la période de la sollicitation  $T$ ). Celle-ci étant directement liée à la diffusivité du matériau.

Pour fixer les idées, le tableau ci-dessus présente les épaisseurs de pénétration pour différents matériaux :

Matériaux	Epaisseur de pénétration	Epaisseur courantes de mise en œuvre
<b>Béton</b> $\lambda = 2 \text{ W/m/K}$ $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 1000 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	15,5 cm	10-30 cm
<b>Terre crue</b> $\lambda = 1,1 \text{ W/m/K}$ $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 1500 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 3,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	16,2 cm	30-50 cm
<b>Laine de verre</b> $\lambda = 0,038 \text{ W/m/K}$ $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 1030 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 24,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	26,0 cm	10-20 cm
<b>Laine de bois (de même densité)</b> $\lambda = 0,038 \text{ W/m/K}$ $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 2100 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 12,06 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	18,2 cm	10-20 cm
<b>Laine de bois haute densité</b> $\lambda = 0,05 \text{ W/m/K}$ $\rho = 230 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 2100 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	5,3 cm	1-10 cm
<b>Paille</b> $\lambda = 0,058 \text{ W/m/K}$ $\rho = 120 \text{ kg/m}^3$ $c_p = 1300 \text{ J/kg/K}$ $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	10,1 cm	20-50 cm

Plus l'épaisseur de pénétration est faible (moins le matériau est diffusif), meilleur sera le déphasage et l'atténuation.

<sup>13</sup>Correspond à l'estimation théorique de l'épaisseur que peut atteindre une oscillation de température selon sa période de variation donnée. Par exemple le sol a couramment une épaisseur de pénétration vis-à-vis des variations annuelles de température de l'ordre de 10-15m, au-delà les variations annuelles ne sont plus sensibles, la température y est constante, car les oscillations de température n'ont pas eu le temps de pénétrer plus profondément (par diffusion de la chaleur) entre les deux saisons extrêmes. Une variation plus courte (jour-nuit) n'aura des répercussions sur les températures du sol que bien plus superficiellement (plus la période est courte, et/ou moins le matériau est diffusif, moins l'épaisseur de pénétration est importante.

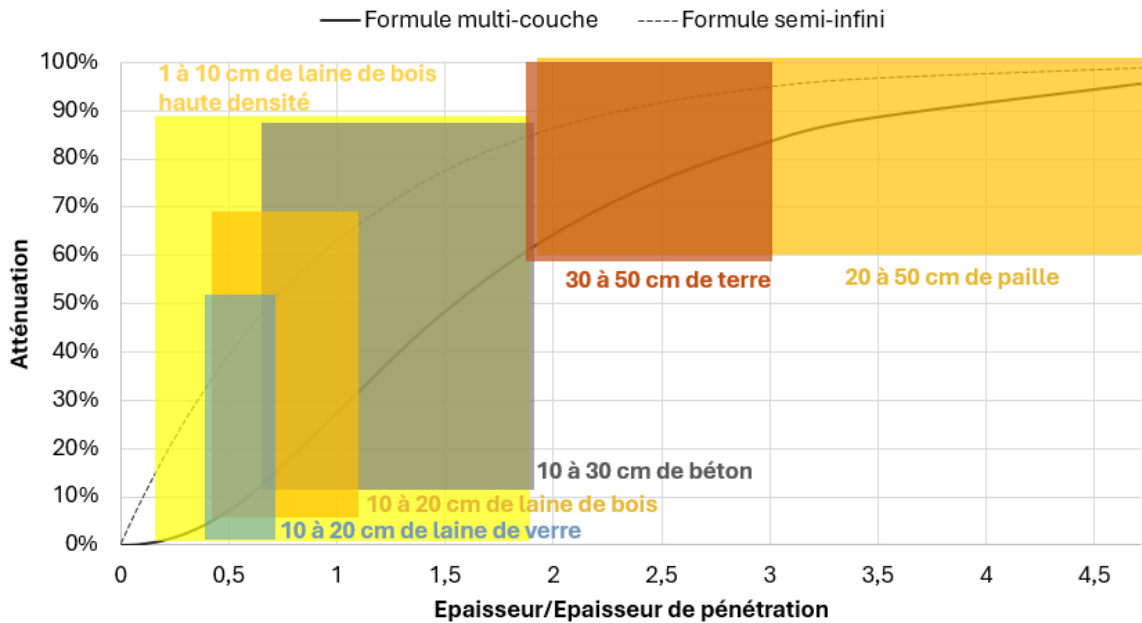


Figure 8 – Atténuation calculée avec deux formulations pour différents matériaux pour des épaisseurs courantes de mise en œuvre

La figure ci-dessus illustre le décalage entre la formule simplifiée couramment utilisée (courbe en pointillée), supposant un matériau semi-infini et la formule « détaillée » (méthode des quadripôles – voir [infra](#) – courbe en trait plein), s'affranchissant de l'hypothèse « semi-infini », pour le calcul de l'atténuation<sup>15</sup>. Cet écart est présent plutôt à faible épaisseur relative (par rapport à l'épaisseur de pénétration). La formule simplifiée peut surestimer jusqu'à 100 % l'atténuation aux faibles épaisseurs relatives (par rapport à l'épaisseur de pénétration).

Sont également indiquées les plages d'atténuation pour différents matériaux selon leur plage d'épaisseur courante de mise en œuvre.

La figure met ainsi en évidence que les matériaux massifs et de surcroît épais (terre ou béton) permettent d'obtenir des atténuations non négligeables.

Parmi les isolants, les isolants biosourcés présentant une meilleure capacité calorifique massique et généralement une densité plus importante, ce qui leur permet d'atteindre de meilleures performances en termes d'atténuation (et de déphasage).

Mais rappelons que pour conclure sur leurs meilleures performances globales vis-à-vis du confort d'été, il est nécessaire de prendre en compte la résistance thermique mise en œuvre (voir « [Le déphasage ne quantifie que les variations des flux et pas leur niveau moyen](#) ») et l'impact couplés induits par les autres couches de matériaux (voir « [Le déphasage doit intégrer les différentes couches de matériaux](#) »).

Pour ce qui nous intéresse au sujet de la limite des hypothèses retenues dans les équations utilisées, on voit ainsi que pour certains matériaux, les épaisseurs mises en œuvre couramment sortent nettement du domaine de validité de la formule simplifiée.

Dans ce cas-là, la formule simplifiée tend à surestimer l'atténuation (et le déphasage), car elle suppose implicitement que la chaleur doit « affronter » une épaisseur hypothétiquement semi-infinie (résistance thermique « restante » à parcourir supposément infinie), là où en réalité elle arrive côté intérieur. Physiquement, à faible épaisseur (relative à l'épaisseur de pénétration) ces matériaux se comportent de façon quasiment « statique » (sans effets inertiels – la chaleur n'est quasiment pas stockée, donc ralentie, au sein du

<sup>15</sup> Notion plus « utile » que le déphasage dans le cadre d'un bilan thermique (voir « [supra](#) » - d'autant que l'écart pour le calcul du déphasage est moins important mais bien présent à faible épaisseur relative – jusqu'à une heure).

matériaux – les modifications des conditions extérieures se répercutent quasi-instantanément à l'intérieur) car la chaleur y pénètre facilement (épaisseur de pénétration importante).

### 3.5.1.2. Formules « détaillées »

Une seconde formulation, basée sur une méthode dite « des quadripôles » (aussi appelée méthode « matricielle » ou « des admittances »)<sup>16</sup> permet de considérer une épaisseur finie et donc ces phénomènes à faible épaisseur (relativement à l'épaisseur de pénétration).

Toutefois, en contrepartie elle impose de prendre des hypothèses quant aux « conditions limites » (température et flux) au niveau des faces intérieure ou extérieure.

Par exemple (voir schéma ci-dessous), pour estimer l'atténuation (valeur complémentaire au facteur d'amortissement désigné ci-dessous), on suppose (cas « I ») que les variations de température internes sont nulles, c'est-à-dire qu'on considère que le bâtiment est régulé et maintenu à une température de consigne en continu (donc climatisé dans le contexte du confort d'été).

On s'éloigne donc du cas qui nous intéresse a priori vis-à-vis du confort d'été, à savoir celui d'un bâtiment ne disposant pas de système actif de refroidissement. Dans ce cas, soumis au flux thermique ainsi transmis, la température s'échauffera et réduira donc mécaniquement le flux transmis.

Cette hypothèse donne donc une surestimation du flux thermique transmis (cas plus défavorable que la réalité en fonctionnement sans système de régulation).

---

<sup>16</sup> Voir par exemple partie 1.1.2 de la [thèse « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments »](#) pour trouver les références des origines de cette méthode

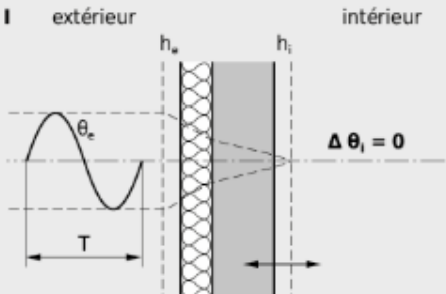
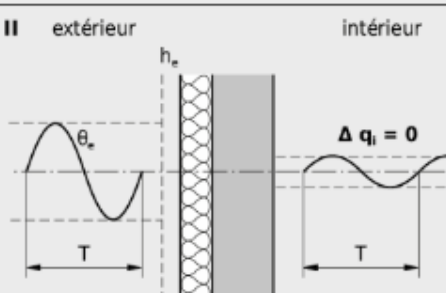
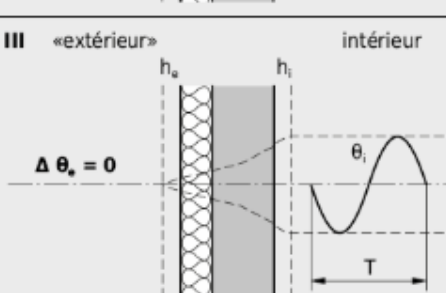
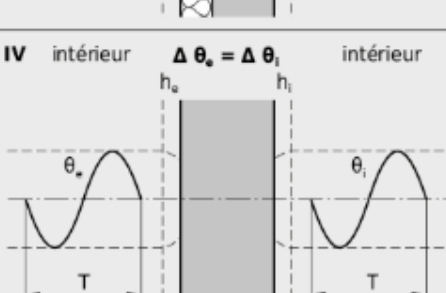
	Conditions aux limites	Paramètres caractéristiques	Remarques
Charges thermiques extérieures	<b>I</b> extérieur intérieur 	résistance thermique dynamique $R_T$ , $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ : $R_T = \frac{\Delta \theta_e}{\Delta q_i} =  Z_{12} $ coefficient U dynamique, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ : $U_T = \frac{1}{R_T}$ facteur d'amortissement, $f$ - : $f = \frac{U_T}{U}$	Effet d'une amplitude de température extérieure sur l'amplitude du flux de chaleur vers l'intérieur par une température intérieure maintenue constante
	<b>II</b> extérieur intérieur 	amortissement de l'amplitude de température, $v_H$ , - : $v_H = \frac{\Delta \theta_{se}}{\Delta \theta_{si}} =  Z_{11} $ déphasage $\eta_H$ , h: $\eta_H = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \arg(Z_{11})$	Effet d'une oscillation de la température sur la température de la surface intérieure par flux de chaleur vers l'intérieur constant. arg: argument d'un nombre complexe, voir 9.2.11
Charges thermiques intérieures	<b>III</b> «extérieur» intérieur 	admittance thermique $Y$ , $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ : $Y = \frac{\Delta q_i}{\Delta \theta_{si}} = \left  \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right $ Masse effective d'accumulation $M$ , $kg \cdot m^{-2}$ : $M = Y \cdot \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot c_0}$	Pouvoir d'accumulation de chaleur par une amplitude de température du côté intérieur. La définition d'une masse effective d'accumulation sert à clarifier la notion de stockage de chaleur.
	<b>IV</b> intérieur intérieur 	pouvoir d'accumulation $Y$ , $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ : $Y_{11} = \frac{\Delta q_i}{\Delta \theta_{si}}$ , $Y_{22} = \frac{\Delta q_e}{\Delta \theta_{se}}$ capacités thermiques surfaciques, $J/(m^2 \cdot K)$ : $\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \left  \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right $ (intérieur) $\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \left  \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right $ (extérieur)	Pouvoir d'accumulation thermique d'éléments de construction séparant deux pièces similaires (amplitudes de température identiques)
Capacité thermique standard $c_0 = 0,3 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ bzw. $1,08 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ Période $T = 24 \text{ h}$			

Figure 9 – Conditions aux limites et paramètres caractéristiques pour la transmission thermique périodique.  
Source : <https://enbau-online.ch/>

Réciproquement, pour l'estimation du déphasage des températures, il sera nécessaire de supposer que les variations de flux sont nulles à l'intérieur, ce qui concrètement peut se traduire par un mur « totalement isolé » (dit adiabatique – ne transmet pas de chaleur).

Là encore on s'éloigne de la réalité qui nous intéresse.

### 3.5.2. Représentativité des sollicitations thermiques

Une dernière catégorie d'hypothèses critiquables dans ces formulations théoriques sont les hypothèses retenues concernant les sollicitations thermiques.

#### 3.5.2.1. Sollicitations sinusoïdales

On y suppose en effet que les sollicitations sont « harmoniques », autrement dit parfaitement sinusoïdales. On peut plus légitimement s'en approcher pour les variations de températures (lorsque la météo n'est pas trop chahutée), mais on s'en éloigne plus avec les flux solaires (nuls une grande partie du temps puis augmentant rapidement sur un temps relativement court).

Cette hypothèse n'est toutefois pas totalement fautive car il est possible de décomposer toute oscillation périodique (ce qui est le cas nous concernant que ce soit pour les températures ou les flux solaires : variation jour/nuit avec une période de 24h) en somme de composantes harmoniques (sur la base de décomposition en série de Fourier<sup>17</sup>).

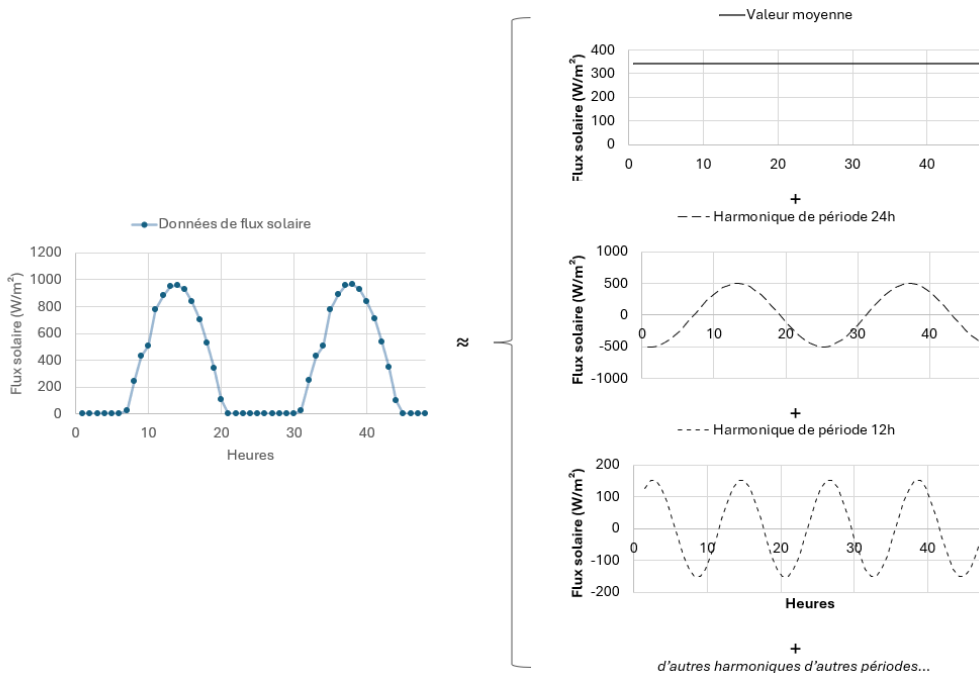


Figure 10 - Exemple d'une décomposition des oscillations de flux solaires en signaux harmoniques

En l'occurrence, les variations de flux ou de température pourront notamment s'écrire comme la somme de différentes variations : saisonnière, « séquentielle », quotidienne et de périodes plus courtes (« météo » chahutée, passage de nuage pour le flux solaire, etc.)

Or, nous intéressant aux impacts thermiques des variations quotidiennes, on peut légitimement ne regarder que les variations sur cette période isolément, donc de la composante de période de 24h et considérer celle-ci représentative des variations journalières.

<sup>17</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9rie\\_de\\_Fourier](https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9rie_de_Fourier)

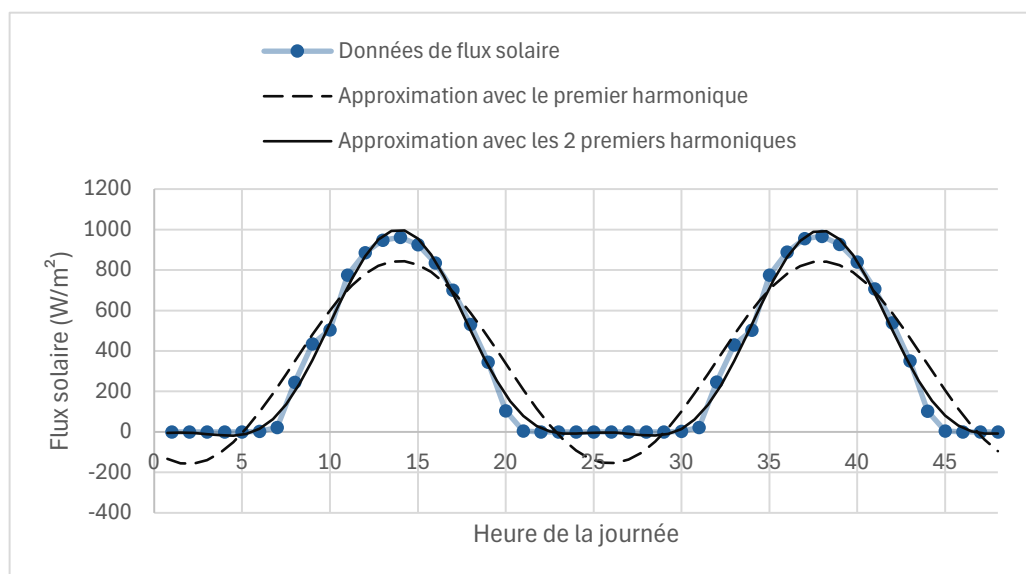


Figure 11 – Comparaison des sollicitations solaires avec leur harmonique de période de 24h.

Les autres composantes de la décomposition consistent donc en des variations plus longues, qui sont utiles pour étudier le comportement thermique du bâtiment face à des variations des conditions moyennes (vague de chaleur par exemple) et des variations plus courtes.

Étant donné que l'épaisseur de pénétration augmente avec la période de variation ( $\sqrt{\frac{\alpha \cdot T}{\pi}}$ , avec la  $\alpha$  diffusivité – voir « Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu » - et la période de la sollicitation  $T$ ), on observe généralement, comme l'illustrent les tableaux ci-dessous, que :

- **les variations rapides** (période de quelques heures) sont fortement, si ce n'est totalement, « gommées » en traversant les matériaux (épaisseur de pénétration plus faible que leur épaisseur courante de mise en œuvre) ;
- **les variations longues** (période de plusieurs journées) sont peu, si ce n'est pas du tout<sup>18</sup>, « gommées » en traversant les matériaux (épaisseur de pénétration plus grande que leur épaisseur courante de mise en œuvre) ;

Matériaux	Atténuation pour différentes périodes de sollicitations (h)				
	1	6	24	72	288
Béton					
Terre crue					
Laine de verre					
Laine de bois					
Laine de bois HD					
Paille					

Figure 12 – Atténuation (en nuance de couleur : de rouge 100 % à blanc 0 %) de différents matériaux pour leur épaisseur courante de mise en œuvre<sup>19</sup> en fonction de la période de sollicitation

<sup>18</sup> Dans ce dernier cas, la paroi se comporte de façon statique, il n'y a pas d'effet dynamique d'atténuation ou de déphasage.

<sup>19</sup> Pour le calcul, la valeur moyenne des bornes de l'intervalle défini précédemment et redonné ci-dessous a été utilisée.

Matériaux	Épaisseur de pénétration (cm) pour une période de					Épaisseur courante de mise en œuvre (cm)
	1h	6h	24h	3 jours	12 jours (séquentielle)	
<b>Béton</b> $a = 8,7 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	3,2	7,7	15,5	26,8	53,6	10-30
<b>Terre crue</b> $a = 3,86 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	2,1	5,2	10,3	17,8	35,7	30-50
<b>Laine de verre</b> $a = 24,6 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	5,3	13,0	26,0	45,0	90,1	10-20
<b>Laine de bois (de même densité)</b> $a = 12,06 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	3,7	9,1	18,2	31,5	63,1	10-20
<b>Laine de bois haute densité</b> $a = 1,04 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	1,1	2,7	5,3	9,2	18,5	1-10
<b>Paille</b> $a = 3,7 \cdot 10^{-7}$ $m^2/s$	2,1	5,1	10,1	17,5	35,0	20-50

Figure 13 - Épaisseur de pénétration de différents matériaux en fonction de la période de sollicitation

Autrement dit, les parois opaques jouent un rôle de filtre « passe-bas » (ne laissent passer que les plus basses fréquences, c'est-à-dire les plus longues périodes de sollicitation) d'autant plus que leur épaisseur de pénétration est faible (couplage faible diffusivité et forte épaisseur).

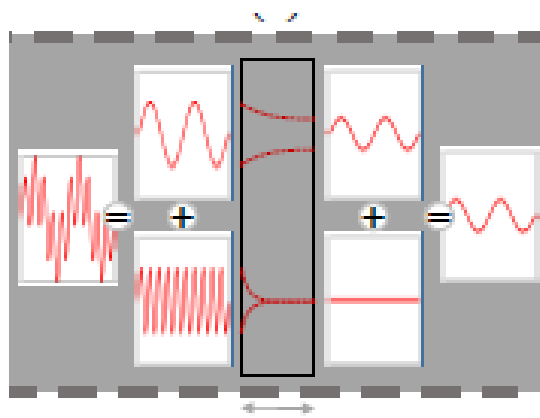


Figure 14 - Illustration du comportement "filtre passe-bas" des parois opaques

Précisons pour finir que les matériaux couramment mis en œuvre ne contribuent généralement pas à atténuer et retarder l'échauffement du bâtiment face à des vagues de chaleurs<sup>20</sup> (sauf les murs faiblement diffusifs et très épais -par exemple : murs massifs traditionnels de très forte épaisseur, notamment églises et cathédrales - mais sensiblement moins que pour des sollicitations journalières).

### 3.5.2.2. Variabilité du coefficient d'échange externe

Dans les différentes formulations précédentes, on considère le coefficient d'échange superficiel extérieur constant, or sa valeur augmente lorsque la surface s'échauffe par rapport à l'extérieur (échauffement causé par l'ensoleillement notamment, augmentation de l'échange causé par l'augmentation de la convection et du rayonnement) et celle-ci impacte fortement le flux qui sera renvoyé vers l'extérieur plutôt que transmis à l'intérieur.

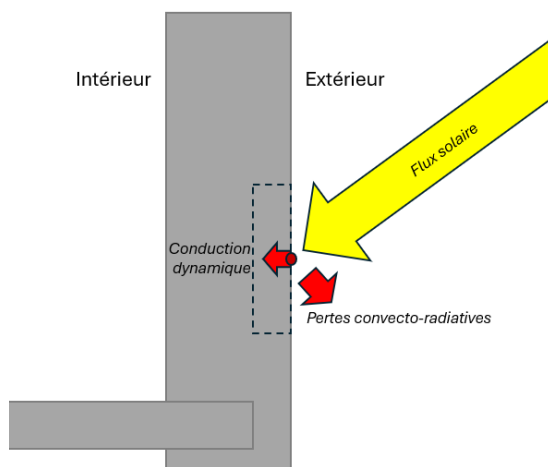


Figure 15

Les formulations précédentes surestimeraient donc les flux solaires transmis par rapport au cas où le coefficient d'échange superficiel extérieur augmenterait, notamment pour les matériaux faiblement diffusifs (qui s'échauffent plus car transmettent moins vite la chaleur). Ces formulations ont donc tendance à surestimer l'impact du déphasage.

**Seuls certains outils de calcul dynamique détaillés (type simulations thermiques dynamiques) peuvent permettre de modéliser des conditions plus réalistes.**

### 3.5.3. Détail sur le calcul réglementaire

Le calcul réglementaire se base sur un modèle dynamique :

- les sollicitations sont calculées au pas de temps au moins horaire ;
- l'inertie est prise en compte via un coefficient  $C_m$  via un modèle « simplifié » dit « RC » (pour résistance-capacité, terme issu d'analogie électrique).

<sup>20</sup> Rôle dévolu à l'inertie interne séquentielle, à condition que le bâtiment en comporte (matériaux effusifs de forte épaisseur dalle « lourde », notamment sur terre-plein non isolé, refends massifs, etc.) ...

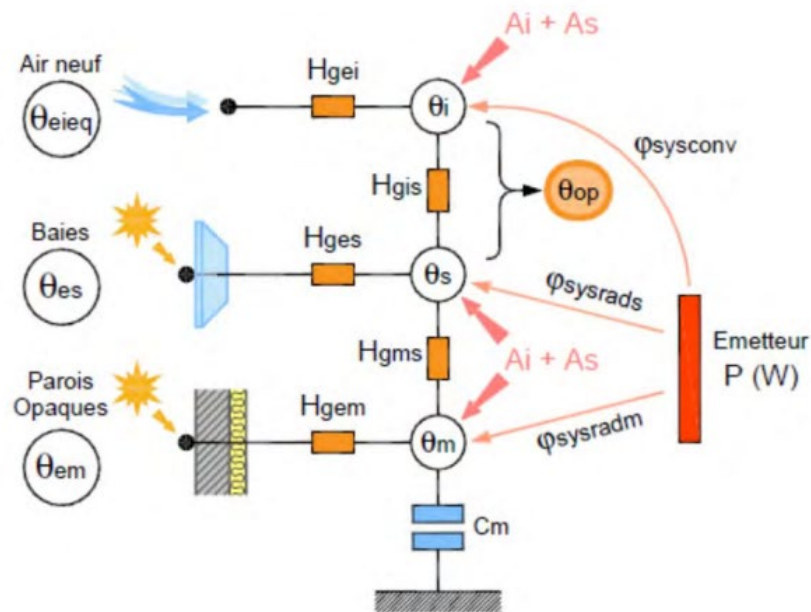


Figure 16 - Modèle thermique utilisé dans le calcul réglementaire  
(source : [CERIB - Étude de modèles thermique pour la prise en compte de l'inertie dans le bâtiment](#))

La première limite de ce modèle est que l'inertie, bien que prise en compte, l'est de façon trop simplifiée, via seulement trois valeurs<sup>21</sup> (inertie quotidienne, séquentielle et annuelle), ce qui ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des réponses dynamiques du bâtiment, plus ou moins rapides (voir « [3.5.2.1. Sollicitations sinusoïdales](#) ») – notamment lorsque la chaleur est transmise directement à l'intérieur par les vitrages ou le renouvellement d'air, ce qui éloigne les calculs de la réalité<sup>22</sup>.

De plus, la méthode de calcul du coefficient  $C_m$  repose, dans sa variante détaillée de la méthode réglementaire, sur la méthode des quadripôles décrite plus haut<sup>23</sup> (voir 3.5.1.2. Formules « détaillées »). Or, comme on l'a vu précédemment, l'estimation de grandeurs avec cette méthode repose sur la prise en compte d'hypothèses concernant les conditions limites, et, en l'occurrence, on se place dans le cas où l'amplitude intérieure et extérieure est égale (voir cas IV de la [Figure 9](#)). Cela permet d'intégrer l'inertie par transmission dont découle le déphasage via la part du flux généré par la montée de température extérieure transmis vers l'intérieur (transmittance) en plus du flux absorbé et « renvoyé » côté intérieur (admittance – inertie interne).

Toutefois, ce coefficient ne permet donc pas de distinguer inertie interne et inertie par transmission (et donc d'explicitier l'influence du « déphasage » tel qu'on l'a décrit précédemment), et les hypothèses sur lesquelles reposent son estimation sont critiquables dans le cas d'une paroi donnant sur l'extérieur car, en réalité, les amplitudes de températures intérieure et extérieure ne sont pas égales et leurs variations ne sont pas simultanées (cette hypothèse est plutôt représentative de parois purement internes).

Enfin, la méthode réglementaire<sup>24</sup> offre la possibilité d'estimer l'inertie par « méthode forfaitaire » ou par « points » et donc de façon plus approximative qu'avec la méthode détaillée, augmentant potentiellement l'imprécision du calcul.

Le déphasage est donc bien pris en compte dans le calcul réglementaire, mais le modèle utilisé peut être critiquable<sup>25</sup>.

<sup>21</sup> Lien vers [méthode de calcul réglementaire](#) (partie 5.21).

<sup>22</sup> Voir notamment sur le sujet le [rapport final du Groupe Scientifique sur le Confort d'Été](#) et le [projet RESILIANCE](#).

<sup>23</sup> Codifiée dans la norme NF EN ISO 13786.

<sup>24</sup> Voir [règles Th-Bat – Fascicule Inertie](#)

Notons toutefois que l'objet du calcul réglementaire n'est pas en soit de modéliser la réalité, mais plutôt de comparer des bâtiments semblables, sous des hypothèses conventionnelles et de garantir a priori un certain niveau de performance (notamment vis-à-vis du confort d'été). Cependant la mauvaise estimation de certains phénomènes (tel que le déphasage) pourrait être préjudiciables à certains principes constructifs pour lesquels ce phénomène ferait la différence en réalité. Mais comme nous l'avons vu, le phénomène d'inertie par transmission lié au déphasage est a priori rarement prépondérant vis-à-vis des performances globales en termes de confort d'été.

### 3.6. Le déphasage ne se mesure pas simplement en conditions réelles

Comme on l'a vu précédemment, la notion même de déphasage implique des conditions spécifiques qui s'éloignent des conditions réelles (autres flux thermiques transmis à l'intérieur du bâtiment par les vitrages, apports internes, renouvellement d'air, variation de la température intérieure), d'autant plus dans le cas d'un bâtiment « en évolution libre », non climatisé à une température régulée.

De plus, la contribution de l'inertie par transmission, isolément de l'impact de l'inertie interne, n'est pas distinguable à l'échelle globale du bâtiment en conditions réelles.

Les mesures du déphasage impliquent donc de se placer en conditions maîtrisées ou « de laboratoire » ou de réaliser l'étude à l'échelle composant (ce que permettent des dispositifs expérimentaux type « plaques chaudes gardées »).

Dans le cas d'un bâtiment réel, la mesure du flux de température en face interne et externe d'un composant (fluxmètre), ou des températures dans son épaisseur, ne permet pas de mesurer isolément la composante du flux thermique provenant de l'extérieur transmis par la paroi. Il faudrait effectivement retrancher les flux radiatifs et convectifs reçus par la surface interne, engendrés par les apports de chaleur transmis à l'intérieur (apports internes, apports solaires transmis par les vitrages, apports transmis par les autres parois).

Seule la simulation thermique dynamique (STD)<sup>26</sup>, en reproduisant virtuellement le comportement thermique d'un bâtiment, peut permettre d'isoler et/ou de regarder spécifiquement certains phénomènes, en simulant des cas pour lesquels on ne fait changer qu'un paramètre à la fois.

Par exemple, la STD pourrait permettre de répondre à des questions dont la réponse n'est pas « évidente » a priori comme :

- Dans quelles conditions un isolant plus inertiel<sup>27</sup> peut-il engendrer un meilleur confort d'été qu'un isolant moins inertiel ayant une meilleure résistance thermique ?  
 ➔ *Définition de différents indicateurs de confort<sup>28</sup> ; essais avec différentes épaisseurs d'isolant pour différentes gammes d'isolants (plus ou moins inertiels), tout autre paramètre égal par ailleurs. Le cas échéant, en testant des « compensations » en jouant sur d'autres paramètres (réduction des apports solaires par exemple).*

<sup>25</sup> On pourrait rajouter la critique liée à la prise en compte de l'inconfort uniquement en période d'occupation, ce qui peut favoriser les isolants diffusifs (voir note de bas de page **Erreur ! Signet non défini.**), mais la contribution globale des parois isolées reste généralement marginale vis-à-vis du confort global (voir « 3.1.3. L'impact thermique de la contribution des parois est généralement à nettement relativiser »)

<sup>26</sup> Idéalement couplée une campagne de mesure la plus exhaustive possible.

<sup>27</sup> Possibilité d'intégrer les correcteurs thermiques.

<sup>28</sup> Penser à intégrer la température opérative (intégrant les températures de surface), potentiellement locale pour intégrer de potentiels phénomènes décrit dans la note de bas de page **Erreur ! Signet non défini.** et également mis en évidence dans Figure 12 de [l'étude « confort d'été après rénovation »](#).

- Dans quelles conditions un bâtiment avec des murs massifs non isolés peut-il engendrer un meilleur confort d'été qu'un bâtiment isolé ?
  - ➔ *Définition de différents indicateurs de confort ; essais avec différentes épaisseurs d'isolant pour différentes gammes d'isolants (plus ou moins inertiels). Le cas échéant, en testant des « compensations » en jouant sur d'autres paramètres (réduction des apports solaires par exemple).*
- Variantes de cas d'étude : plus ou moins vitré, plus ou moins isolé, plus ou moins d'inertie interne, différents climats estivaux, etc.

Il ne semble toutefois pas possible de déterminer, de manière totalement isolée, l'impact du déphasage pour un cas particulier car, même en réalisant la comparaison de variantes en intégrant ou pas l'inertie des isolants (valeur forcée à zéro), on ne serait pas en mesure de maintenir l'inertie interne identique (l'isolant contribuant également à l'inertie interne, même si généralement de façon minoritaire), sauf à la « neutraliser » en maintenant fictivement une température interne stable (ce qui revient au cas de la figure I dans la [Figure 9](#) dans la partie 3.5.1.2. Formules « détaillées »).