



# COMPRENDRE LES INERTIES THERMIQUES DANS LES BATIMENTS

**Pierre LAVIGNE**

*Ingénieur des Arts et Métiers, docteur en thermodynamique, docteur-ingénieur, professeur des écoles d'architecture*

## 1. INTRODUCTION : DANS LE CADRE D'UN DEVELOPPEMENT DURABLE, DE LA NECESSITE OU PAS D'UNE CERTAINE INERTIE THERMIQUE DANS LES BATIMENTS

L'inertie se définit comme la résistance à un changement, par exemple et pour ce qui nous intéresse, de la température intérieure d'un bâtiment. Si, selon une hypothèse d'école, nous considérons que le confort hygrothermique d'un bâtiment est assuré uniquement par un dispositif technique de chauffage et/ou une climatisation, la notion d'inertie thermique ne nous apparaît que lors d'une mise en régime demandant plus ou moins de temps à partir d'un état hors confort. Mais si, dans le cadre du développement durable, nous voulons que le confort dans le bâtiment soit obtenu le plus naturellement possible, grâce à une certaine expérience nous ressentons qu'une résistance au changement, soit l'inertie, peut être intéressante.

Mais

- l'inertie concerne par nature des phénomènes dynamiques, donc complexes ;
- l'inertie peut être observée des deux points de vue, liés, de la thermique : celui de l'évolution de températures et celui des puissances thermiques en jeu ;
- en observant le comportement d'un bâtiment, il apparaît plusieurs sortes d'inertie résistant à une sollicitation du climat ou interne au bâtiment et, selon l'usage et la situation climatique considérée, l'une n'est pas systématiquement favorable ;
- à propos de l'inertie thermique, il existe couramment des idées reçues fausses et des espoirs à ramener à un certain réalisme.

Ainsi, s'adressant à des architectes, dont la fonction est fondamentale et présente un caractère systémique, tout en se voulant simple le présent article ne saurait risquer le simplisme. De plus, les documents normatifs ne garantissant pas la qualité architecturale, en particulier thermique, il doit éviter toute attitude pouvant mener à ce qui ressemble à l'application de recettes. Le présent travail se propose donc de développer avec rigueur l'essentiel des connaissances qui permet au concepteur de participer dans la liberté à une évolution et de prendre pour chaque cas des partis pertinents grâce à la connaissance, profonde et faite personnelle, des phénomènes en jeu.

Mais, s'adressant justement à des concepteurs, le présent article, qui propose une approche scientifique et n'a pas le même rôle qu'un document technique, ne doit pas distraire le lecteur par un surplus d'informations que la culture ainsi acquise lui permettra si nécessaire de trouver lui-même. Ainsi nous n'utiliserons que le minimum, incontournable mais fondamental, de **relations** entre paramètres (nous évitons de parler de "formule", trop connotée "magique" et "à appliquer"), nous nous attacherons à expliquer les phénomènes physiquement, entre autres aidés par une analogie, et nous ne fournirons que peu de données quantitatives, sinon des ordres de grandeurs qui permettent les comparaisons entraînant des choix. Pratiquement, les calculs sont évidemment faits grâce à des logiciels qui possèdent en général les données physiques nécessaires.

L'inertie thermique d'un bâtiment faisant intervenir des phénomènes complexes, pour comprendre son rôle il est nécessaire de poser le problème du comportement d'un édifice sollicité par un climat et une production interne d'énergie due à l'usage.



## 2. COMPORTEMENT D'UN BATIMENT SOLLICITE PAR LE CLIMAT ET UN CERTAIN USAGE - PERCEPTION DES INERTIES

### 2.1 POSITION DU PROBLEME DE MANIERE PHYSIQUE

Les édifices auxquels nous nous intéressons n'ayant rien de comparable avec certains vieux bâtiments ruraux aux murs de pierres épais, les châteaux forts ou l'habitat troglodyte, nous ne considérerons pas le cas où l'inertie joue un rôle réel sur une période séquentielle de plusieurs jours, voire plusieurs mois.

Considérons le schéma de la figure 1 qui représente un édifice avec une partie de son enveloppe opaque, une partie vitrée et un ensemble intérieur de structures-cloisonnements. Sans chauffage ni climatisation ce bâtiment subit des sollicitations, admises cycliques avec une période de 24 heures, de la température ambiante extérieure  $T_e$  oscillant autour d'une température moyenne  $T_{em}$  et du rayonnement solaire. Ainsi, dans le cas de la figure, une surface opaque horizontale (1) absorbe le flux solaire  $\Phi_{sa1}$  et des surfaces opaques verticales (2) et (3) absorbent respectivement les flux solaires  $\Phi_{sa2}$  et  $\Phi_{sa3}$ , tandis qu'un vitrage vertical permet que, compte tenu des réflexion et absorption, soit directement transmis le flux  $\Phi_{sv}$  à l'intérieur.

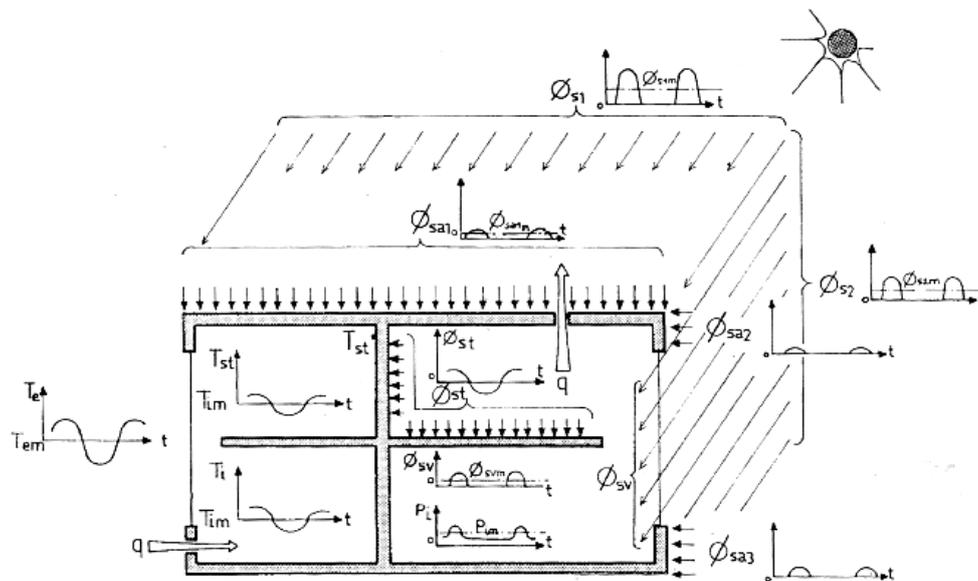


Figure 1

A l'intérieur de l'édifice, par son usage, par exemple pour l'habitat les appareils électroménagers, la cuisine, le métabolisme des personnes,... il naît une puissance  $P_i$ , elle aussi cyclique en général.

Que ce soit pour l'hygiène durant la saison froide ou pour une ventilation bien plus importante l'été, le bâtiment est parcouru par un débit d'air  $q$  qui peut le réchauffer ou le refroidir selon le moment de la saison considérée.



Toutes les sollicitations étant fluctuantes, la température intérieure  $T_i$  de l'édifice oscille autour d'une température moyenne  $T_{im}$ .

La température intérieure oscillant, l'ambiance intérieure échange de la chaleur avec l'ensemble structures-cloisonnements. Le schéma fait apparaître que le flux d'échange de chaleur  $\Phi_{st}$  avec cet ensemble oscille autour d'un flux moyen nul. Cela est évident puisque le flux est absorbé (positif) une partie du temps et rendu à l'ambiance (négatif) l'autre partie et qu'il est inconcevable que l'ensemble structures-cloisonnements reçoive plus de chaleur qu'il n'en rende ou l'inverse, ce qui aboutirait à avoir une température moyenne croissante ou décroissante et donc différente de  $T_{im}$ .

Nous avons fait apparaître des valeurs moyennes autour desquelles oscillent les valeurs réelles. Pour raisonner "physiquement", appliquant le *principe de superposition* (exprimant dans ce cas qu'un paramètre dû à deux causes est la somme des effets étudiés séparément de chacune de celles-ci), il est intéressant de considérer séparément d'une part les *valeurs moyennes* et d'autre part, par rapport à celles-ci, les *oscillations* qui seules intéressent l'inertie puisque phénomènes dynamiques. L'ensemble des valeurs moyennes d'une réponse à des sollicitations, qui résultent des valeurs moyennes des paramètres de celles-ci, correspond à un régime permanent, soit statique, et a priori n'intéresse pas l'inertie. Nous nous préoccupons pourtant de comprendre ce qui se passe en moyenne, d'une part pour bien comprendre le comportement d'un édifice et d'autre part pour percevoir les ordres de grandeur des échanges moyens qui nous renseignent sur ceux des échanges instantanés et alors sur l'importance relative des phénomènes liés à ces échanges sur leurs aspects inertiels.

## 2.2 RECHERCHE D'UNE TEMPERATURE MOYENNE DE CONFORT OBTENUE DE FACON ECONOMIQUE EN ENERGIE - MESURES FONDAMENTALES QUI EN RESULTENT

Pour juger de l'influence de chaque sollicitation, il est bon de comprendre la différence fondamentale existant entre les deux types de captage solaire : par les vitrages et par les parois opaques.  $E_{in}$  [Wh/m<sup>2</sup>.jour] étant l'énergie solaire incidente reçue par mètre carré et par jour d'une surface vitrée quelconque n, connue en fonction du lieu, de l'orientation et de l'inclinaison de la surface,  $\tau_{nm}$  étant la transmittance moyenne du vitrage et  $f_{vn}$  étant le facteur de masque qui exprime l'action d'un masque (plus ou moins lointain ou d'un écran de façade tel que flanc, brise-soleil, ...), la densité de flux (flux par m<sup>2</sup>) moyenne transmise par un vitrage n est (de façon évidente puisque les jours ont 24 heures) :

$$\varphi_{svnm} = f_{vn} \cdot \tau_{nm} \cdot E_{in} / 24 \quad [W/m^2] \quad (1)$$

et si  $S_{vn}$  est la surface du vitrage n, la puissance totale moyenne de captage solaire par l'ensemble des diverses parties vitrées de l'enveloppe est :

$$P_{cv} = \sum_n \Phi_{svm} = \sum_n \varphi_{svnm} \cdot S_{vn} = \sum_n S_{vn} \cdot f_{vn} \cdot \tau_{nm} \cdot E_{in} / 24 \quad [W] \quad (2)$$

Une proportion de l'énergie solaire absorbée par une surface opaque étant perdue vers l'ambiance extérieure, la partie d'énergie transmise vers l'intérieur peut être connue aisément.  $U_n$  étant le coefficient de transmission surfacique d'une partie d'enveloppe opaque n,  $U_{se}$  étant sa conductance superficielle extérieure,  $\alpha_n$  étant son absorbance (plus ou moins importante selon sa texture superficielle, sa couleur et sa propreté),  $f_{on}$  étant son facteur de masque (pour cause de masque



ou/et d'écrans) et  $E_{in}$  [Wh/m<sup>2</sup>.jour] étant l'énergie solaire incidente reçue par mètre carré et par jour de la surface, la densité de flux (flux par m<sup>2</sup>) moyenne transmise vers l'intérieur par la partie  $n$  est :

$$\Phi_{sonm} = f_{on} \cdot \alpha_n \cdot (U_n / U_{se}) \cdot (E_{in} / 24) \quad [W/m^2] \quad (3)$$

et si  $S_{on}$  est la surface opaque  $n$ , la puissance totale moyenne de captage solaire par l'ensemble des diverses parties opaques de l'enveloppe est :

$$P_{co} = \sum_n \Phi_{som} = \sum_n \Phi_{sonm} \cdot S_{on} = \sum_n S_{on} \cdot f_{on} \cdot \alpha_n \cdot (U_n / U_{se}) \cdot (E_{in} / 24) \quad [W] \quad (4)$$

Observant la relation (3), démontrée en [1], le lecteur doit comprendre aisément que la densité de flux qui traverse une paroi opaque est évidemment proportionnelle à l'énergie solaire incidente reçue ( $E_{in}$ ), à l'absorptivité ( $\alpha_n$  compris entre 0 et 1 - limites inatteignables, en fait compris entre 0,5 et 0,8) de la surface qui la reçoit, du facteur de masque ( $f_{on}$ , qui est égal à 1 sans masque) et au coefficient de transmission surfacique ( $U_n$  qui laisse d'autant mieux passer la chaleur qu'il est grand). Comme l'énergie qui traverse est d'autant plus réduite que celle qui est perdue vers l'extérieur est importante, la densité de flux  $\Phi_{son}$  est inversement proportionnelle à la conductance superficielle extérieure  $U_{se}$ .

Si  $\Delta T_m$  est l'écart de température moyen entre les ambiances intérieure et extérieure du bâtiment, les deux pertes thermiques moyennes du bâtiment sont :

. la puissance perdue par transmission à travers l'enveloppe :

$$P_t = H_T \cdot \Delta T_m \quad (5)$$

$H_T$  étant la conductance totale de l'enveloppe, grandeur parfaitement connue ;

. la puissance perdue par ventilation de débit d'air  $q$  de l'édifice :

$$P_a = A \cdot q \cdot \Delta T_m \quad (6)$$

$A$  étant égal à 0,34 pour l'air si  $q$  est exprimé en m<sup>3</sup>/h.

Si  $P_i$  est la puissance moyenne qui naît à l'intérieur par l'usage du bâtiment,

. les puissances moyennes pénétrant et naissant dans l'édifice sont  $P_{cv}$ ,  $P_{co}$  et  $P_i$ ,

. les puissances moyennes qui sortent de l'édifice sont  $P_t$  et  $P_a$ .

En écrivant l'égalité entre les gains et les pertes, le bilan thermique utilisant les relations (5) et (6) permet de connaître  $\Delta T_m$ .

$$P_{cv} + P_{co} + P_i = H_T \cdot \Delta T_m + A \cdot q \cdot \Delta T_m = [H_T + A \cdot q] \cdot \Delta T_m$$

$$\text{D'où } \Delta T_m = [P_{cv} + P_{co} + P_i] / [H_T + A \cdot q] \quad [^\circ K] \quad (7)$$



Cette relation (7) est fondamentale pour comprendre qu'un concepteur doit chercher à ce que  $\Delta T_m$  soit tel que

- d'une part il soit suffisamment élevé l'hiver pour que le "confort moyen" puisse être atteint en ne devant augmenter artificiellement par un chauffage la puissance intérieure  $P_i$  que d'une valeur faible voire nulle, et
- d'autre part il soit naturellement le plus faible possible l'été, voire négatif si nécessaire, sans une climatisation qui introduit une partie de  $P_i$  négative pour obtenir un "confort moyen" qui, selon la valeur des oscillations de température, ne garantit pas le confort à certains moments.

Cette relation (7) permet

- de faire apparaître l'importance relative des différents phénomènes en jeu,
- d'induire les mesures architecturales fondamentales à prendre,
- d'en déduire des données qui orientent la manière de poser le problème de l'inertie, en fait de deux inerties.

**POUR LA SAISON FROIDE** il faut augmenter le numérateur et diminuer le dénominateur de (7).

**Commençant à diminuer le dénominateur** de (7), soit les pertes, il faut

- que le débit  $q$  de renouvellement d'air soit minimal, soit juste nécessaire à l'hygiène. Le concepteur doit avoir recours à des techniques telles que l'étanchéité à l'air de l'enveloppe soit excellente et qu'alors le débit d'air soit assuré par une VMC, si possible double-flux pour récupérer la plupart de la chaleur de l'air vicié rejeté,
- Concevoir une enveloppe de conductance  $H_T$  minimale ( $U_n$  et ponts thermiques faibles). Depuis 2009 il est enfin reconnu qu'il est pertinent d'anticiper sur la prochaine réglementation. On peut espérer que la structure bois se développera pour des enveloppes comprenant une épaisseur d'isolant maximale et pas de pont thermique. Certes, isoler les surfaces opaques réduit aussi  $P_{\infty}$  (relation (4)), mais il est démontré que, sauf pour des climats froids très rares (déserts en altitude avec 100% d'ensoleillement), il est très nettement plus intéressant d'isoler les enveloppes opaques que de compter sur elles pour capter de l'énergie solaire. Quant aux vitrages, nécessaires pour l'éclairage naturel et le confort visuel, chacun sait que l'utilisation du double-vitrage, voire du triple en certain lieux, est systématique et que maintenant sa résistance aux pertes thermiques est augmentée par un gaz rare entre verres et une couche réfléchissant l'infrarouge alors qu'elle est transparente au rayonnement solaire.

**Désirant augmenter le numérateur** de (7), soit l'énergie disponible gratuitement en n'ayant pas intérêt à augmenter la puissance intérieure  $P_i$  au-delà d'un usage incontournable et ayant constaté qu'il est illusoire d'espérer vouloir capter de l'énergie solaire par des parois opaques, il ne reste plus au concepteur qu'à faire tout ce qui est en son pouvoir pour obtenir une puissance de captage par les vitrages,  $P_{cv}$ , maximale, sans que l'augmentation des surfaces de vitrage provoque plus de perte que de captage. Selon les données de température et d'ensoleillement d'un lieu des logiciels permettent de déterminer, selon les orientations, un optimum de surface de vitrage au-delà du nécessaire pour l'éclairage naturel. Mais il est fondamental que les lieux de vie soient essentiellement orientés au Sud en hémisphère Nord, ce qui est plus souvent possible qu'une certaine paresse peut le laisser croire, évidemment lorsque l'urbanisation est orientée puisque les paramètres solaires le sont.



**POUR LA SAISON CHAUDE** il faut augmenter le dénominateur et diminuer le numérateur de (7).

**Pour augmenter le dénominateur**, l'enveloppe étant ce qu'elle est à partir des nécessités fixées par l'hiver, le concepteur ne peut agir que sur le débit  $q$ , qui n'est alors plus un renouvellement hygiénique d'air, mais une ventilation de débit bien plus important (jusqu'à environ 30 fois plus).

Certes l'effet thermosiphon n'est pas négligeable dans un bâtiment, mais, pour obtenir naturellement le confort en périodes de canicule, qui risquent d'être de plus en plus nombreuses, le concepteur ne peut compter, surtout dans le Sud de la France, que sur une ventilation traversante, ce qui mène à un parti architectural et urbanistique qui commence à se développer.

Mais il faut observer qu'il n'est pas pertinent de ventiler un bâtiment durant la période pour laquelle la température de l'air extérieur est supérieure à celle de l'intérieur. Si, pour la température moyenne, c'est mieux de ventiler tout le temps que de ne pas ventiler du tout, il est préférable de ventiler avec un grand débit durant la période telle que la température extérieure est inférieure à celle de l'intérieur. La relation (7), que nous n'avons pas voulu compliquer, ne le fait pas apparaître, mais il est évident qu'en ventilant essentiellement la nuit (température extérieure < température intérieure) que le refroidissement journalier est meilleur en évitant d'apporter de la chaleur quand la température extérieure est supérieure à la température intérieure. De plus, si le climat est très contrasté jour/nuit et si les structures-cloisonnements intérieurs de l'édifice peuvent suffisamment "accumuler du froid" (soit perdre de la chaleur à la température la plus faible possible) la nuit, ce qui évite des températures maximales élevées de jour, on peut même imaginer atteindre un  $\Delta T_m$  négatif (température moyenne intérieure inférieure à la température moyenne extérieure).

**Pour diminuer le numérateur**, si en un lieu où il n'existe pas de véritable saison froide une isolation de l'enveloppe ne s'est pas révélée nécessaire le concepteur peut réduire considérablement  $P_{co}$  en prévoyant des écrans ventilés évitant au rayonnement solaire d'atteindre les parois d'enveloppe opaques. En France, décidée pour l'hiver, l'isolation est tout autant bénéfique l'été en rendant  $P_{co}$  très faible. Durant la saison chaude c'est le captage solaire par les vitrages,  $P_{cv}$ , qui est important et doit être réduit au minimum grâce à des vitrages proches de la verticalité et des brise-soleil, voir des fermetures pour des volumes inoccupés durant le jour. Mais si les concepteurs doivent apprendre à étudier des brise-soleils, ils doivent constater qu'ils ont beaucoup de chance car l'orientation Sud, recherchée pour l'hiver, est aussi favorable l'été. En effet, alors que l'hiver les captages solaires possibles à l'Est et l'Ouest sont bien plus faibles qu'au Sud, l'été ils sont bien supérieurs. Sachant de plus qu'un simple brise-soleil horizontal arrête le rayonnement direct proche de la verticale (l'été) et le laisse passer lorsqu'il est proche de l'horizontale (l'hiver), l'orientation privilégiée des pièces de vie reste le Sud.

### 2.3 PREMIERES CONSTATATIONS EN RELATION AVEC L'INERTIE

Le paragraphe précédent fait apparaître que

- les parois opaques des enveloppes doivent être très isolées et résistent alors très bien en régime permanent moyen à la sollicitation de la différence de température entre deux ambiances comme à celle du rayonnement solaire sur leur face externe ;
- les vitrages peuvent avantageusement être de grande surface lorsqu'ils sont bien orientés, mais, d'une part, aussi perfectionnés soient-ils, leur résistance au passage de la chaleur entre deux ambiances dans les deux sens est faible comparée à celle des surfaces opaques et



d'autre part la seule résistance au rayonnement solaire consiste en une perte par réflexion et absorption comprise entre 20 et 40 %, alors que le rayonnement qui pénètre le fait sans amortissement et à la vitesse de la lumière. Il n'y a en fait que *peu de résistance des vitrages à l'action du climat*, qu'elle soit moyenne considérée en régime permanent de température ou considérée à l'instant observé. Les vitrages présentent donc très peu d'inertie aux oscillations de température extérieure, et pas du tout pour le rayonnement solaire qui les traverse avec relativement peu de perte ;

- cette propriété des vitrages, liée à l'alternance jour avec soleil/nuit, entraîne tout particulièrement un régime dynamique d'entrée d'énergie solaire pouvant être importante. Il est alors évident qu'il en résulte un régime dynamique de variation de température intérieure dont l'amplitude ne peut être maîtrisée que si des matériaux intérieurs absorbent et restituent de la chaleur ;
- pour profiter d'une ventilation pratiquement uniquement de nuit l'été, soit d'un régime dynamique, il faut que puisse être "accumulé du froid" la nuit, phénomène qui suppose un refroidissement de matière perdant de la chaleur et dont l'absorption de chaleur durant la journée permet une résistance au changement qu'est l'augmentation de température.

L'inertie thermique étant définie comme la résistance à un changement de la température intérieure d'un bâtiment,

- à partir des deux premiers points et en admettant qu'une résistance à la **transmission d'énergie** thermique en régime permanent l'est aussi en régime dynamique, on peut dire qu'actuellement, dans les pays froids, les parties opaques d'enveloppe présentent une grande **inertie de transmission** d'énergie à l'action du climat, tandis que celle des vitrages est faible, surtout en ce qui concerne l'action importante du rayonnement solaire ;
- à partir des deux derniers points on perçoit la notion **d'inertie par absorption**, située à l'intérieur du bâtiment considéré, qui, en régime dynamique, résiste à une alternance de réchauffement et de refroidissement de trop grandes amplitudes de température intérieure.

Celui qui comprend les phénomènes, situant *l'inertie de transmission au niveau de l'enveloppe* d'un édifice et *l'inertie par absorption à l'intérieur*, ne saurait parler de l'inertie sans spécifier de quel type il est question.

Les inerties que nous avons faites apparaître concernent des transmissions de chaleur, mais, la thermique associant toujours une quantité (de chaleur) ou une puissance (quantité de chaleur par unité de temps) à la température (un potentiel), nous verrons comment les inerties concernent aussi des températures de surfaces. Mais, celles-ci dépendant des quantités de chaleur en jeu, il est intéressant de prendre conscience des différences entre les ordres de grandeur des puissances provocatrices d'oscillation de température.

### Comparaison des variations de puissance moyenne transmise dues à une variation de température extérieure

Les enveloppes opaques tendant vers un  $U \approx 0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ , alors que les meilleurs vitrages courants présentent un  $U \approx 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ , pour une même variation de température extérieure les vitrages transmettent par  $\text{m}^2 \approx 1,1/0,2 \approx 5,5$  fois plus de puissance thermique. Ainsi pour une façade qui comprend raisonnablement 1/3 de vitrages (donc 2/3 opaque) ceux-ci transmettent  $\approx 5,5/2 \approx 2,7$  fois plus de puissance que la partie opaque et si, selon un confinement dans l'ignorance et une mode exhibitionniste, la façade est complètement vitrée, elle transmet (c'est une perte coûteuse en hiver)



une puissance moyenne nettement plus de 2 fois supérieure à celle transmise par une façade raisonnable en vitrage.

### Comparaison des variations de puissance thermique transmise par l'action du rayonnement solaire

En considérant les relations (1) et (3) et qu'enveloppe opaque et vitrage présentent le même facteur de masque et reçoivent le même rayonnement solaire, il est clair que doivent être comparées les valeurs de  $\tau_{nm}$  et  $\alpha_n \cdot U_n / U_{se}$ . Avec les valeurs courantes  $\tau_{nm} \approx 0,7$ ,  $\alpha_n \approx 0,8$ ,  $U_n \approx 0,2$  et  $U_{se} \approx 25$ , la transmission partielle des mêmes flux solaires incidents par  $m^2$  sont  $\approx 0,7 / [0,8 \times 0,2 / 25] \approx 110$  fois plus importantes pour les vitrages que pour les parois opaques. Ainsi, même si la proportion de vitrage d'une façade est de  $1/3$ , le vitrage transmet  $\approx 110/2 \approx 55$  fois plus d'énergie solaire que la partie opaque et si toute la façade est constituée par un vitrage non traité, elle transmet environ 3 fois plus d'énergie vers l'intérieur. Observons au passage que les traitements de vitrages par des films réfléchissant, pigmentation et écrans, constituent des "ouvertures négatives", soit le comble de l'aberration vu du point de vue du développement durable.

En conclusion, sauf cas particuliers que nous aborderons, les oscillations de température intérieure, qu'une inertie par absorption peut réduire, sont essentiellement dues à la faible inertie de transmission des vitrages, alors que la plupart de l'énergie transmise l'est en des temps relativement courts dans le cycle journalier.

Mais pour comprendre les phénomènes inertiels il faut connaître les propriétés dynamiques des matériaux, en général opaques, et étudier ce qui se passe dans ceux-ci et participe aux inerties de transmission et par absorption.



### 3. LES PHENOMENES THERMIQUES DYNAMIQUES ELEMENTAIRES - DIFFUSIVITE ET EFFUSIVITE - ANALOGIE FACILITANT LA COMPREHENSION - LES COMPORTEMENTS DES DIVERSES PAROIS

#### 3.1 DIFFUSIVITE ET EFFUSIVITE

Partons d'une expérience représentée par la figure 2. Considérons deux boules sphériques, (A) et (B), de même diamètre et constituées de deux matériaux différents, étant au même lieu depuis longtemps de telle sorte que leur température,  $T_1$ , soit homogène dans la masse et la même pour les deux. A l'instant  $t = 0$ , mettons les deux dans un récipient d'eau bouillante, maintenue à la température  $T_2$  et, grâce à un capteur, observons au centre de chaque boule l'évolution de la température en fonction du temps.

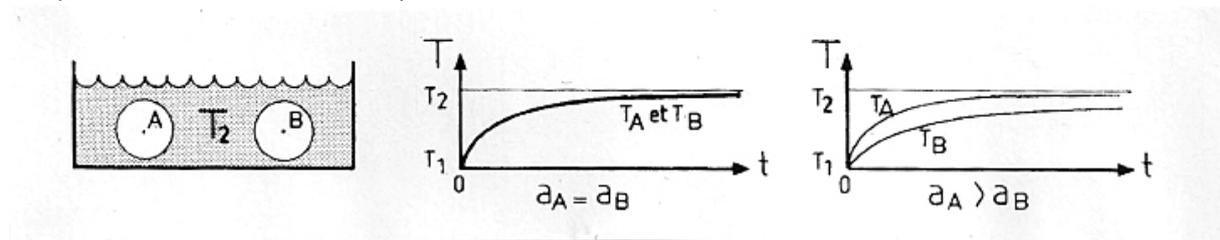


Figure 2

Si les températures  $T_A$  et  $T_B$  évoluent de la même manière, les courbes représentatives étant superposées, on dit que, dans les deux matériaux, la **diffusion** de la température se fait de la même façon. La **diffusivité**, propriété "dynamique" exprimant la **capacité d'un matériau à transmettre une variation de température**, représentée par la lettre "a", est la même pour A et B. Si  $T_A$  croît plus rapidement que  $T_B$ , la **diffusivité** de A est supérieure à celle de B.

Il faut comprendre ce qui se passe pour découvrir quels sont les paramètres classiques (ou "statiques") des matériaux qui interviennent dans le phénomène de diffusivité et d'un autre qui va apparaître : l'effusivité. Pour cela considérons une boule et dans celle-ci un tout petit élément E, ni en surface, ni au centre.

En nous préoccupant de **l'évolution de la température**, sans être physicien professionnel chacun peut comprendre que la rapidité de croissance de température dans cet élément est :

- proportionnelle à la conductivité thermique du matériau  $\lambda$ , c'est-à-dire à la facilité pour la chaleur à arriver jusqu'à E,
- inversement proportionnelle à la chaleur volumique du matériau  $\rho C$  ( $J/m^3 \cdot K$ ),  $\rho$  étant sa masse volumique ( $kg/m^3$ ) et  $C$  étant sa chaleur massique ( $J/kg \cdot K$ ). En effet, plus la chaleur volumique d'un corps est importante, moins sa température s'élève lorsqu'il reçoit une certaine quantité de chaleur.
- Nous comprenons alors que la **diffusivité** s'exprime par

$$a = \lambda / \rho C$$

Mais en thermique il est toujours nécessaire de se préoccuper de la chaleur échangée, soit plus précisément des puissances thermiques en jeu.



En nous préoccupant de la **puissance absorbée** par une boule, ou, ce qui revient au même, par un de ses petits éléments **E**. Toujours sans être un physicien chacun peut comprendre que la puissance absorbée par un élément **E** :

- croît avec la conductivité thermique  $\lambda$  puisque la puissance arrive jusqu'à lui d'autant mieux,
- croît avec la chaleur massique  $\rho C$  car la température de E s'élève d'autant moins que  $\rho C$  est grand et qu'alors, l'élément restant plus longtemps plus froids, il peut continuer à absorber de la chaleur.

Nous pouvons donc comprendre que, concernant l'**effusion** de la puissance, l'**effusivité** d'un matériau, propriété "dynamique" qui exprime sa **capacité à absorber (ou restituer) une puissance thermique** et est représentée par la lettre "**b**", fait intervenir la produit  $\lambda \cdot \rho C$ . En faisant confiance aux physiciens, qui voient apparaître dans les équations la racine carrée de  $\lambda \cdot \rho C$ , l'**effusivité** s'exprime par

$$b = (\lambda \cdot \rho C)^{1/2}$$

### Une analogie pour mieux comprendre...

*La température se perçoit, ne serait-ce qu'au toucher, mais la chaleur n'a rien de concret et ne se repère que par la variation de température provoquée par son absorption. Une analogie avec un paramètre très sensible et même visible peut aider le néophyte dans sa compréhension des phénomènes.*

*Imaginons que des boules soient constituées de matériaux poreux, comme des éponges, tels que pour l'une, A, les pores soient d'assez grande taille et pour l'autre, B, leur taille soit plus faible. A l'instant  $t = 0$ , les boules étant prises (dans l'air) à une certaine pression  $P_1$  et mises dans un volume plein d'eau à plus haute pression,  $P_2$ , que va-t-il se passer ? En supposant que l'air des pores peut s'évacuer par le centre des boules, la pression, qui, comme la température représente un potentiel, va croître en se propageant dans les corps poreux jusqu'à atteindre à l'équilibre la valeur  $P_2$ . Il n'est pas à exclure que, selon la texture des matériaux, la pression puisse se propager de la même façon dans les deux "éponges". Mais comme les pores de A sont plus grands (avec moins de matière solide) que ceux de B, le débit d'eau qui pénètre et, en fin d'expérience, la quantité d'eau qui a pénétré sont nettement supérieurs dans la boule A. Le débit d'eau et la puissance de chaleur étant des quantités/unité de temps et en fin d'expérience l'eau et la chaleur qui ont pénétré étant des quantités, chacun comprend que le comportement de l'eau dans des corps poreux représente bien celui de la chaleur dans un matériau. On peut dire que les corps poreux présentent une diffusivité plus ou moins importante à une variation de pression d'un fluide qui peut s'y propager, mais qu'ils peuvent présenter une très grande différence d'effusivité à l'absorption d'eau. Tout le monde sait qu'il y a des éponges bien meilleures que d'autres !*

Corps spongieux	Solide homogène
Variation de pression $\Delta p$	Variation de température $\Delta T$
Débit d'eau	Puissance thermique
Diffusivité (propagation) d'un $\Delta p$	Diffusivité (propagation) d'un $\Delta T$
Effusivité (absorption) d'un débit d'eau	Effusivité (absorption) d'une puissance thermique
Taille des orifices de communication entre pores	Conductivité thermique $\lambda$
Volume moyen des pores	Chaleur volumique $\rho C$

Tableau de correspondance des termes de l'analogie



**Pour les matériaux de construction la diffusivité présente des valeurs d'ordre de grandeur voisines, mais les valeurs de l'effusivité présentent de grandes différences.**

Sans s'étendre sur des valeurs de diffusivités et d'effusivités qu'un précédent article de Jean-Louis IZARD a fournies, il est surtout intéressant d'observer que, si on prend pour référence de matériau la maçonnerie à qui on attribue à ses propriétés l'adjectif "courante", on peut schématiquement et en première approximation classer les matériaux de construction selon le tableau ci-dessous, étant entendu que les métaux, toujours en très faible quantité, n'interviennent pas thermiquement.

Seuls des ordres de grandeur sont indiqués pour b (sans indiquer l'unité) afin de faire percevoir la grande différence entre les matériaux en ce qui concerne leur absorption de chaleur.

Matériaux	$\lambda$	a	b
Matériaux de maçonnerie	courante	courante	courante $\approx 2000$
Bois et bois aggloméré	faible	$\approx$ courante/3	médiocre $\approx 350$
Isolants plastiques alvéolaires	très faible	$\approx$ courante	très faible $\approx 30$
Isolants fibreux	très faible	$\approx$ courante	très faible

*Tableau récapitulatif des qualités thermiques des matériaux de construction*

En ce qui concerne la transmission d'une variation de température, il est remarquable que des matériaux aussi différents qu'un mortier et du polystyrène expansé puissent avoir le même comportement. Leur diffusivité "a" peut avoir la même valeur. Cela s'explique facilement. Avec un isolant il arrive que peu de chaleur à l'élément E d'une boule, alors qu'il en arrive beaucoup à l'élément E d'une boule de mortier, conducteur. Mais le  $\rho C$  du polystyrène, léger, est tellement plus faible que celui du mortier, qu'il nécessite très peu de chaleur pour croître en température et les deux éléments E peuvent se réchauffer de la même valeur.

Un phénomène a priori curieux est intéressant pour comprendre l'effusivité. Pourquoi une table en bois qu'on touche ou un plancher sur lequel on marche pieds nus paraissent plus chauds qu'une table de marbre ou un sol carrelé ressentis comme froids, alors que toutes ces surfaces dans une même pièce sont à la même température d'environ 20 °C ? Un contact étant un phénomène dynamique cela s'explique ainsi. Le corps le plus effusif, tout en changeant peu de température, absorbant (ou donnant - peu importe le signe de l'échange) mieux la chaleur que le moins effusif, dans l'échange transitoire qui existe au contact, c'est le plus effusif qui tend à imposer sa température. Ainsi, l'effusivité de notre peau étant plus importante que celle du bois, elle-même plus faible que celle du marbre ou du carrelage, au début du contact avec du bois c'est la peau (à environ 34 °C) qui impose presque sa température qui diminue peu et les nerfs cutanés transmettent au cerveau une impression de tiédeur. Au contraire, au contact avec du marbre ou du carrelage, bien plus effusif que le bois et absorbant plus de chaleur à la peau, sa température de surface chute beaucoup plus et les nerfs transmettent une impression de froid.

C'est le même phénomène qui explique qu'un contact dynamique de la peau avec un corps très peu effusif (comme un isolant) très chaud peut être non douloureux. Un chamane, à condition de ne pas s'arrêter (ce serait statique !), peut ainsi marcher sans se brûler (les braises rouges étant éteintes !) sur ce qui est alors du charbon de bois très chaud mais très peu effusif. Il n'y a rien de magique.

Les notions de diffusivité et d'effusivité étant acquises, il est temps de passer à ce qui se passe dans l'élément du cadre bâti qui intéresse l'architecte, la paroi au sens le plus général.



### 3.2 PHENOMENES DYNAMIQUES ELEMENTAIRES SUBIS PAR UNE PAROI

Suivant une approche la plus physique possible, il est intéressant de partir du seul type de paroi pour laquelle le phénomène est aisément perceptible et exprimable simplement analytiquement : le "mur semi infini" dont une face est définie et l'autre à l'infini.

#### 3.2.1 PHENOMENES INTERESSANTS SUBIS PAR UN MUR SEMI INFINI

Observons ce qui se passe, dynamiquement, dans ce mur selon ce qui lui est imposé sur sa face définie.

##### 1. Propagation d'une variation sinusoïdale de température dans un mur semi infini

Selon la figure 3, qui représente l'état de température en deux instants  $t_1$  et  $t_2$ , on impose sur la face une variation sinusoïdale de température d'amplitude  $A$  autour d'une température moyenne et de période  $\tau$  (par exemple 24 heures). Sur cette face ( $x = 0$ ) l'écart de température par rapport à la moyenne est  $\Delta T(x = 0, t) = A \sin \omega t$ , avec  $\omega = 2\pi/\tau$ .

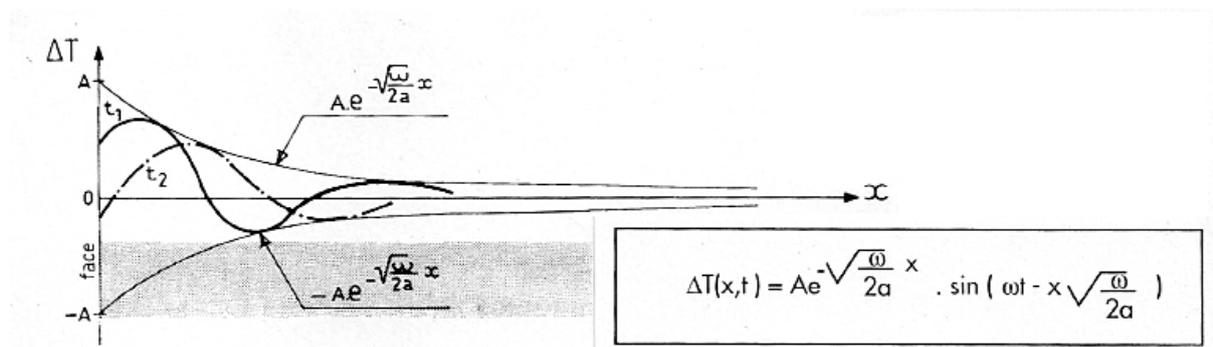


Figure 3

Un calcul analytique permet de connaître l'écart de température  $\Delta T(x, t)$  dans la matière en n'importe quel point ( $x$ ) à n'importe quel instant ( $t$ ).

Il est essentiel d'observer que

- en tout point l'amplitude est sinusoïdale,
- elle décroît exponentiellement avec  $x$  et se conserve d'autant plus grande que "a" est grande,
- l'amplitude et le déphasage ne sont fonction que de la diffusivité "a" puisqu'il ne s'agit que de transmission de température.

##### 2. Saut de température imposé sur la face d'un mur semi infini

Considérant un mur semi infini à température uniforme, si on impose sur sa face un saut de température  $\Delta T$ , selon la figure 4 qui montre l'évolution de température intérieure à des instants  $t=0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ , un calcul analytique fournit la valeur intéressante : la densité de flux thermique absorbée  $\phi$  au temps  $t$  quelconque :

$$\phi = \Delta T \cdot b / (\pi t)^{1/2}$$

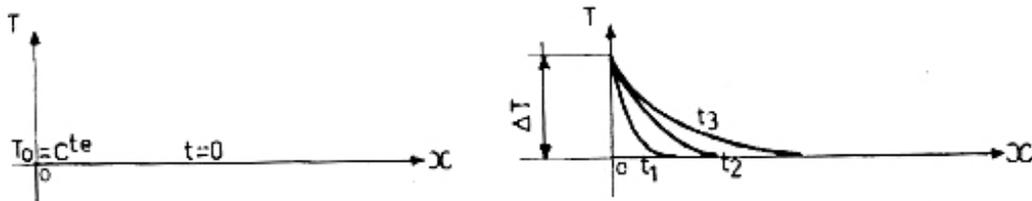


Figure 4

Il est essentiel d'observer que le flux absorbé, dont il est évident qu'il décroît avec le temps jusqu'à devenir nul quand tout le mur atteint de façon homogène la nouvelle température ... après un temps infini, est proportionnel à l'effusivité  $b$  et indifférent à la diffusivité. Cela confirme la notion d'effusivité qui concerne une capacité à absorber une puissance thermique.

### 3. Saut de densité de flux imposé sur la face d'un mur semi infini

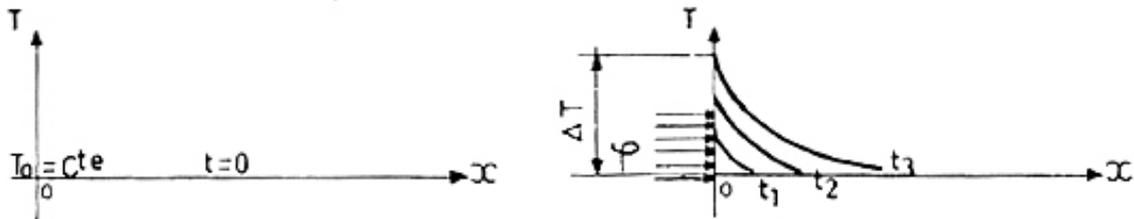


Figure 5

Considérant un mur semi infini à température uniforme, si on impose sur sa face un saut de densité de flux  $\phi$ , selon la figure 5, qui montre l'évolution de température intérieure à des instants  $t=0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ , un calcul analytique fournit la valeur intéressante : l'accroissement de température  $\Delta T$ .

$$\Delta T = 2 \phi \cdot 1/b \cdot (t/\pi)^{1/2}$$

Il est essentiel d'observer que l'augmentation de température de la face, évidente en fonction du temps, conséquence d'une transmission de puissance, est inversement proportionnelle à l'effusivité  $b$  et indifférente à la diffusivité. Cela confirme la notion d'effusivité qui concerne une capacité à absorber une puissance thermique, soit ne pas se réchauffer rapidement en transmettant la chaleur dans la masse.

A partir de ces phénomènes servant de référents, évidemment d'école mais seuls à permettre, par leur simplicité et une expression analytique, une claire compréhension, étudions se qui peut se passer dans une paroi réelle.

#### 3.2.2 PHENOMENES INTERESSANTS SUBIS PAR UNE PAROI REELLE

##### 1. Paroi d'enveloppe homogène d'épaisseur "e" subissant sur sa face extérieure l'influence d'une variation cyclique (24 heures) des paramètres climatiques

La température extérieure étant le principal paramètre climatique commençons par l'étude de son influence.

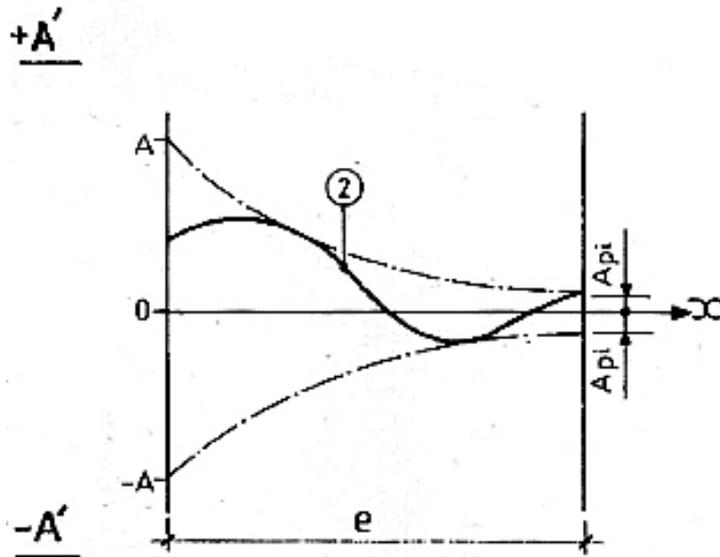


Figure 6

En nommant  $A_{pi}$  l'amplitude des oscillations de température de sa face intérieure, étudier l'inertie de transmission d'une paroi d'enveloppe consiste à étudier comment réduire cette amplitude résultant d'une sollicitation climatique externe.

Globalement on peut raisonner en considérant qu'approximativement la température extérieure de la paroi varie sinusoidalement (§3.2.1 - 1) et penser que, si "e" n'est pas trop petite, à une faible profondeur par rapport à la face extérieure la variation de température est assez proche de celle du cas du mur semi infini et qu'elle s'en éloigne en approchant de la face intérieure. Selon le §3.2.1 - 1 et en observant la figure 6 on peut déjà exprimer une première conclusion

- **conclusion (1) :**

si évidemment  
tout aussi évidemment  
et

$A_{pi} \searrow$  quand  $A \searrow$  ,  
 $A_{pi} \searrow$  quand  $e \nearrow$   
 $A_{pi} \searrow$  quand  $a \searrow$

Mais dans la réalité c'est l'ambiance extérieure qui varie de manière approximativement sinusoidale avec une amplitude  $A'$  de telle sorte qu'entre l'ambiance et la surface de paroi existe l'écart de température  $\delta T$  qui permet l'échange de chaleur compte tenu d'une conductance superficielle extérieure  $U_{se}$  de telle sorte que la densité de flux transférée entre ambiance et paroi est  $\varphi = U_{se} \cdot \delta T$ . Or,  $\varphi$  dépendant de la nature du matériau de la paroi, de telle sorte que  $\varphi$  est d'autant plus important que le matériau absorbe bien la chaleur, soit est effusif, l'écart  $\delta T = \varphi / U_{se}$  croît avec  $b$  du matériau de la paroi.  $A'$  étant un maximum, on a alors  $A = A' - \delta T$  qui décroît quand  $b$  croît. En conséquence,  $A_{pi}$  décroissant avec  $A$  décroissant lui-même quand  $b$  augmente, on peut émettre la conclusion suivante.

- **conclusion (2) :** en observant ce qui se passe côté extérieur

$A_{pi} \searrow$  quand  $b \nearrow$

Mais, si la paroi subit un appel de puissance sur sa face intérieure (le lecteur comprendra ce que cela signifie concrètement par la suite), comme  $\varphi = \lambda \cdot dT/dx$  et comme chacun sait que le gradient de



température  $dt/dx$  est d'autant plus important que la conductivité est faible, la température de la face intérieure de la paroi peut être très faible si  $\lambda$  est faible. On peut alors émettre la conclusion (3)

- **conclusion (3)** : en observant ce qui se passe côté intérieur s'il y a un appel de puissance

**$A_{pi} \searrow$  quand  $\lambda \searrow$**

Si, durant un certain temps de la journée, un rayonnement solaire incident augmente la température de la face extérieure de la paroi, globalement les phénomènes restent les mêmes et toutes les conclusions précédentes restent valables, si ce n'est que la répartition de température dans le matériau comprend une "pic" plus important qui se déplace vers l'intérieur de telle sorte qu'elle donne lieu à un "pic" de température superficielle lorsqu'il atteint la face interne.

D'une manière générale, entre un maxima intérieur et le maxima extérieur qui l'a provoqué, qu'il soit dû à une variation de "type sinusoïdal" ou à un "pic", il existe un déphasage qui peut être connu grâce à la relation pratique donnée dans un article précédent de Jean-Louis IZARD.

**Temps de déphasage =  $1,38 e(1/a)^{1/2}$ ,**

les termes étant exprimés en unités pratiques (h, m,  $m^2/h$ ).

### Conclusion générale

En résumant les conclusions partielles précédentes, on peut dire que l'inertie de transmission d'une paroi d'enveloppe homogène par réduction d'amplitude de variation de température est d'autant meilleure que

- sa diffusivité « a » est faible (mais « a » varie peu),
- son épaisseur « e » est importante,
- son effusivité « b » est élevée,
- sa conductivité  $\lambda$  est faible.

Quant au déphasage il est d'autant plus grand que "a" est faible.

Mais il faut ajouter que

- En fait pour les parois d'enveloppe courantes les déphasages sont assez voisins, si on excepte une paroi en bois plein ;
- il faut en finir avec les idées reçues telles que "*plus un mur (par exemple d'un ancien habitat rural) est lourd, plus il a d'inertie*". Bien sûr que plus il est épais, plus il est lourd ! Mais c'est son épaisseur et non son poids (celui d'un isolant, qui peut être meilleur, est très faible) qui est intéressant ;
- il n'existe pas de matériau qui soit à la fois "effusif" et "isolant". Cependant, le "monomur", avec la terre cuite effusive et des alvéoles internes assurant une isolation thermique répartie, parvient à constituer un matériau possédant globalement des deux propriétés (voir plus loin § 4-2.) ;
- avec des structures bois, à quelques montants près, une enveloppe peut être considérée comme constituée complètement d'isolant. Mais avec des structures de maçonnerie les enveloppes comprennent une couche effusive (maçonnerie) et une couche isolante.



Ce dernier point mérite donc une étude spécifique, en particulier pour savoir si une paroi isolante de façon homogène présente une bonne inertie de transmission et si, indépendamment d'éviter les ponts thermiques, l'isolation extérieure des constructions de maçonnerie est thermiquement préférable. Un raisonnement physique très simple, lié à des calculs, permet de conclure rapidement.

- A partir de la conclusion (3) un calcul montre que, dès qu'il existe un appel de flux vers l'intérieur (voir suite), les enveloppes constituées seulement d'isolant peuvent présenter une excellente inertie de transmission avec les épaisseurs auxquelles la recherche de faible conductance conduit.
- La conclusion (2) exprime qu'il y a intérêt à avoir un matériau effusif côté extérieur et la conclusion (3) exprime qu'on a intérêt à avoir un isolant côté intérieur s'il y a un appel de flux. Or comment créer un appel de flux, si ce n'est par exemple par une couche effusive côté intérieur ? En résumé, de l'effusivité étant favorable aussi bien côté extérieur qu'intérieur, que faire ? Seuls des *calculs* peuvent trancher et leur résultat est clair : l'isolation extérieure aboutit à la meilleure inertie de transmission.

### ***Le cas particulier des vitrages***

***Les vitrages sont réputés transmettre le rayonnement solaire par voie radiative. Mais attirons l'attention sur le fait que même protégés du soleil et malgré les progrès qu'ils ont accompli sur le plan thermique, les vitrages ne présentent qu'une épaisseur e très faible. Ils transmettent donc les oscillations de température pratiquement sans atténuation et sans déphasage significatifs entre les deux faces. Les locaux qui comportent de grandes surfaces vitrées sont donc très sensibles à ces oscillations, notamment en été aux heures caniculaires.***

## **2. Paroi intérieure homogène d'épaisseur "e" subissant en général sur deux faces une variation cyclique (24 heures) de la température de l'ambiance intérieure**

Le cas concerne évidemment l'inertie par absorption face à deux types de sollicitations : celui des entrées d'énergie solaire, dont il faut particulièrement profiter l'hiver, tout en les évitant l'été et celui du refroidissement des structures-cloisonnements intérieurs par ventilation nocturne.

Alors que de façon cyclique un flux thermique pénètre (ou sort) ou naît dans l'espace considéré, l'étude de l'inertie par absorption d'une paroi intérieure consiste à étudier comment sa présence peut réduire l'amplitude de température qui résulte de cette sollicitation, tout en permettant une baisse de la température moyenne dans le cas de ventilation nocturne.

L'effusivité d'un matériau exprimant sa capacité à absorber (positive ou négative = restitution) une puissance thermique, on pourrait se contenter de dire qu'une paroi interne présente une inertie par absorption d'autant plus importante que son effusivité  $b$  est élevée.

Pour bien comprendre ce qui se passe, il est préférable de considérer l'ensemble des parois d'un volume considéré et d'étudier son comportement lors d'un pic de puissance apportée et lors d'un refroidissement par ventilation nocturne.



## 2.1 Comportement d'un ensemble de parois intérieures face à un apport de puissance

Nous savons depuis le §2.3 que, sauf cas exceptionnel, l'apport de puissance provient essentiellement (éventuellement d'une cause interne : des ordinateurs, cuisine, ...) d'entrées solaires par les vitrages. On peut distinguer deux cas :

- celui de la paroi recevant directement le rayonnement,
- celui d'un ensemble de parois qui reçoit un flux total de chaleur  $\Phi$  élevant la température de l'ambiance de telle sorte que, même si pour cette raison les pertes vers l'extérieur augmentent, de la chaleur est absorbée par l'ensemble de parois.

### Cas d'une paroi intérieure recevant un rayonnement solaire incident de densité de flux $\varphi_i$

Une partie du rayonnement est réfléchi et une autre est perdue vers le volume en participant à son réchauffement de telle sorte qu'est transmis vers l'intérieur de la paroi la densité de flux  $\varphi_t < \varphi_i$ . Compte tenu que seules la compréhension et les comparaisons nous intéressent, si la paroi n'est pas trop fine et présente une température assez uniforme, on peut considérer qu'on est très approximativement dans le cas du saut de densité de flux  $\varphi_t$  imposé sur la face d'un mur semi infini (§ 3.2.1 - 3) de telle sorte que l'accroissement de température est donné par  $\Delta T = 2 \varphi \cdot 1/b \cdot (t/\pi)^{1/2}$ .

En comparant deux matériaux d'effusivités respectivement  $b_1$  et  $b_2$ , dont les températures de surface augmentent respectivement de  $\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$ , on constate que, au même moment,  $\Delta T_1/\Delta T_2 = b_2/b_1$ . En comparant deux parois supposées pleines, l'une en béton et l'autre en bois, avec respectivement  $b_1 = 2000$  et  $b_2 = 350$ , on a  $\Delta T_2/\Delta T_1 = 5,7$ , ce qui exprime une différence considérable, qui est encore pire dans le cas le plus général tel que les cloisonnements en bois, même porteurs, ne sont pas pleins. Un calcul d'ordre de grandeur fait apparaître que pour du béton, avec une densité de flux de 400W (courante), en une heure  $\Delta T_1 \approx 13 \text{ °K}$ , alors que pour le bois  $\Delta T_2 \approx 70 \text{ °K}$ . Or cette montée en température intervient sur le confort de l'espace. Ce petit calcul devrait aider le lecteur à se rendre compte du peu d'inertie par absorption du bois. C'est évidemment encore pire pour des matériaux isolants !

### Cas d'une paroi intérieure subissant l'élévation de température de l'ambiance due au flux $\Phi$

En simplifiant le problème, raisonnons comme s'il y avait un saut de densité de flux (§ 3.2.1 - 3) sur les parois, considérées proches d'un mur semi infini, et fixons nous une surchauffe de surface des parois à ne pas dépasser, par exemple  $\Delta T_{sp} = 1 \text{ °K}$ .

Mais observons d'abord qu'entre l'ambiance et les faces des parois, il existe une différence de température minimale  $\Delta T_{si} = \varphi \cdot R_{si}$ ,  $R_{si}$  étant la résistance superficielle (dont la valeur est classiquement de 0,13). Ainsi, si on ne veut pas provoquer plus de  $\Delta T_{si} = 2 \text{ °K}$  de surchauffe pour cette raison, il ne faut pas atteindre des densités de flux absorbés par les parois supérieures à  $\varphi = \Delta T_{si} / R_{si} = 2/0,13 \approx 15 \text{ W/m}^2$ .

Avec cette densité de flux un appartement, qui présente couramment 35 m linéique de paroi, soit  $2,5 \times 35 \approx 90 \text{ m}^2$ , soit, avec deux faces qui échangent, environ  $180 \text{ m}^2$  absorbant, peut capter au moins  $15 \times 180 \approx 2700 \text{ W}$ . Cela semble réaliste avec une proportion courante de vitrage, mais l'est-ce du point de vue de l'absorption de la chaleur en ne dépassant pas  $1 \text{ °K}$  d'élévation de température de peau des parois ?



Selon la relation  $\Delta T = 2 \phi \cdot 1/b \cdot (t/\pi)^{1/2}$  on trouve, avec  $\phi = 15 \text{ W}$ , que l'écart  $\Delta T = 1^\circ\text{K}$  est atteint avec des parois en béton environ trois heures après le début du captage solaire. L'inertie par absorption de l'ensemble de parois en béton, surtout si le sol et le plafond contribuent aussi à constituer l'inertie, paraît donc réaliste. Mais ce serait loin de l'être avec des parois de bois plein. La peau de la paroi augmenterait de  $1^\circ\text{K}$  en environ 10 minutes !

## Conclusions pratiques concernant l'inertie par absorption

- Les calculs de simulation font apparaître que si, théoriquement, tout le matériau d'une paroi est affecté par une sollicitation et qu'une moitié de paroi réelle est très différente d'un mur semi infini, pratiquement il n'y a qu'une épaisseur de 10 à 15 cm de matière qui est utile.
- En conséquence les parois courantes de béton qui, pour des raisons structurelles, de chantier, ou acoustiques, ont une épaisseur de l'ordre de 20 cm (2x10 - 10 vu de chaque côté), présentent une inertie par absorption proche du maximum à rechercher (rappel : pour une période de 24 heures, la seule réaliste actuellement).
- Toutefois cette épaisseur ne présente pas une température homogène et il faut en finir avec les fausses explications à partir de la "masse thermique". Cette dernière n'a de sens qu'entre deux états statiques tels que la température du matériau est homogène, alors que l'inertie n'a de sens que lors d'un régime dynamique.
- En continuant cette observation et en revenant à l'analogie [effusivité à la chaleur d'un matériau/effusivité à l'eau d'une matière spongieuse], il faut comprendre qu'il est inutile d'espérer créer (comme certains l'ont fait) une inertie par absorption grâce à une importante masse de maçonnerie. Comme il serait stupide de vouloir "éponger" de l'eau sur une table avec une éponge cubique et comme le commerce fournit alors pour cette opération des objets spongieux d'assez faible épaisseur mais de surface nettement supérieure à celle de la plus grande face d'une éponge, l'inertie par absorption d'un édifice ne dépend pas seulement de l'effusivité des matériaux qui lui sont intérieurs. Certes en matériaux de bonne effusivité et d'épaisseur suffisante, les parois doivent aussi présenter au flux thermique une surface la plus importante possible pour qu'elle puisse pénétrer. Dynamiquement, la chaleur ne pénètre pas loin dans le matériau, mais a besoin de surface pour passer d'une ambiance à une matière. Ainsi ce qui compte pour définir une inertie par absorption, ce n'est pas seulement une importante effusivité, mais, étant entendu que l'épaisseur des parois est suffisante (au moins 10 cm pour un côté ; 20 cm pour les deux), la "quantité d'effusivité", produit de l'effusivité du matériau,  $b$ , par la surface,  $S$ , offerte à l'échange de chaleur :  $b \times S$ .
- Evidemment, l'emploi d'éléments plus ou moins creux pour bâtir des refends et dalles ne permet pas d'atteindre, par unité de surface, des inerties par absorption aussi importantes qu'avec des parois pleines. Toutefois, l'expérience comme des calculs de simulations montrent que l'utilisation d'éléments préfabriqués creux peut permettre d'atteindre une inertie par absorption suffisante avec des surfaces d'échange ... suffisantes.



En étant éclairé par certaines connaissances, cette approche très pratique nous permet de prendre conscience d'aspects fondamentaux qui concernent l'inertie par absorption. Il faut savoir et intimement comprendre les points suivants.

## 2.2 Comportement d'un ensemble de parois intérieures soumis à une ventilation nocturne

Nous n'allons pas refaire un raisonnement. Par rapport au cas d'une paroi subissant une élévation de température de l'ambiance (due à un apport de puissance), la seule chose qui change est le signe de l'écart de température. Il devient négatif puisque le débit de ventilation crée une ambiance de température plus froide que celle des parois. De la chaleur leur est retirée selon un processus qu'on peut voir analogue de telle sorte que les parois "absorbent du froid" au lieu de chaleur. C'est dans la journée que "le froid est perdu" alors que l'intérieur se réchauffe, mais en restant en zone de confort grâce au refroidissement. L'ensemble des parois qui perdent de la chaleur la nuit, cette dernière étant éliminée avec le débit d'air, et en absorbent le jour (celle qui entre) sont analogues à un ensemble d'éponges qui rendent de l'eau la nuit, celle-ci étant jetée, et en absorbent durant le jour (celle qui entre) de façon à éviter des variations importantes d'un niveau d'eau et une montée du niveau moyen dans un contenant.

Tout ce qui a été dit précédemment est applicable et c'est bien une **quantité d'effusivité** qui constitue l'inertie par absorption d'un ensemble de parois internes qui permet de réduire l'amplitude des oscillations de température intérieure, tout en permettant de réduire la température moyenne.

## 4. CONCEVOIR EN ORGANISANT LES INERTIES - IMPORTANCE DU TYPE DE CLIMAT ET DU TYPE D'UTILISATION DU BATIMENT - CAS FAVORABLE D'INERTIE PAR ABSORPTION FAIBLE

Les problèmes inertiels ayant été posés et tous les concepts et connaissances de base étant acquis et ayant été simultanément illustrés en ce qui concerne le fonctionnement de bâtiments construits avec des matériaux courants actuellement, il reste à

- développer quelques raisonnements dans l'art de concevoir un bâtiment ou certaines de ses parties, selon son usage et les caractéristiques essentielles du climat du lieu,
- attirer l'attention du concepteur sur certaines possibilités futures grâce à des produits en cours d'étude et de développement par l'industrie.

Mais auparavant, d'une part pour insister sur un aspect des concepts de base et d'autre part, au risque de la répétition, attirer l'attention du lecteur sur certaines connaissances parfois négligées lors de la conception, résumons quelques considérations générales utiles quel que soit le type et l'usage du bâtiment.

### 4.1 QUELQUES CONSIDERATIONS GENERALES

#### 4.1.1 A PROPOS DE L'INERTIE PAR ABSORPTION

##### 1. *Quel lien entre Isolation extérieure d'une l'enveloppe en maçonnerie et les parois intérieures ?*

Il est bon de faire le lien entre la conclusion selon laquelle l'inertie de transmission d'une enveloppe de maçonnerie est meilleure lorsqu'elle est isolée par l'extérieur et le rôle d'un ensemble de parois intérieures. Il est intéressant de comprendre que :



- d'une part si une paroi d'enveloppe isolée par l'extérieur offre une meilleure inertie de transmission c'est grâce à une inertie ... par absorption ! La maçonnerie intérieure absorbe le peu de puissance thermique qui traverse l'isolant avec déjà une grande chute de température (c'est le propre des isolants qui présentent par nature un gradient de température important) et ainsi, "aplaties" grâce à la couche effusive intérieure qui égalise les températures, les amplitudes d'oscillations de température de la face interne de la paroi sont très faibles ;
- d'autre part, la chaleur qui naît à l'intérieur ou qui entre venant de l'extérieur, ne faisant pas de différence entre les quantités d'effusivités qui s'offrent à elle, ne fait évidemment pas de différence entre l'ensemble des parois intérieures de structures-cloisonnements effusives et la partie interne effusive d'une enveloppe. On peut donc considérer une partie intérieure effusive d'enveloppe comme constituant une inertie par absorption intérieure au même titre qu'un ensemble de parois intérieures.

## **2. Une inertie par absorption de parois intérieures effusives peut-elle être neutralisée par mégarde ou volontairement ?**

Des parois au rôle structurel telles que refends et dalles de maçonnerie peuvent pratiquement ne pas présenter d'inertie par absorption lorsqu'elles sont recouvertes de tentures textiles, de bois (plancher, lambris) et, avec un espace, de faux plafonds. En effet les matériaux peu effusifs et évidemment une discontinuité de matériaux solides, créent un barrage au transfert de la chaleur vers l'absorption. Si, volontairement, l'inertie par absorption de parois effusives ayant un rôle structurel doit être neutralisée, l'utilisation d'une couche d'isolant est alors la mesure la plus efficace.

## **3. Existe-t-il d'autres cas à envisager ?**

Un cas est rare mais possible : celui d'un volume sans structure intérieure ni cloisonnement (par exemple un gymnase), donc sans inertie par absorption intérieure. Indépendamment de toute entrée solaire par des ouvertures, ce volume subit des oscillations de température, entre autres et en particulier par le toit l'été. Si l'enveloppe est par exemple en structure bois isolée, ce qui est en général au moins le cas du toit (qui de plus se refroidit mal compte tenu du sens descendant de la chaleur venue d'en haut), il peut exister un problème. Nous sommes dans le cas du § 3.2.2 -1, conclusion (3) qui exprime que l'amplitude  $A_{pi}$  décroît lorsque la conductivité thermique de la paroi,  $\lambda$ , décroît, *s'il y a un appel de puissance*. Or, sans inertie intérieure cet appel n'a pas lieu et certaines oscillations de température de la face intérieure peuvent ne pas être négligeables et créer un effet de paroi chaude désagréable et non compensé par un courant d'air frais en période encore chaude.

## **4. Existe-t-il une inertie par absorption en dehors de celle due à l'effusivité des matériaux des structures-cloisonnements ?**

Une inertie par absorption peut être imaginée autrement que par une quantité d'effusivité constituée par des parois intérieures. On peut penser rapporter sur des surfaces par nature peu effusives des éléments très effusifs, utiles hiver comme été, ou, seulement utiles l'été, des éléments contenant un matériau à chaleur latente, voir intégrer aux parois ce matériau.

### Eléments de grande effusivité



L'eau étant le corps ayant la plus grande chaleur massique et, liquide, grâce à la convection naturelle pouvant transporter la chaleur par déplacement de matière et alors présenter ce qui revient de fait à une grande conductivité thermique, des éléments de formes étudiées et remplis d'eau peuvent participer à la constitution d'une grande inertie par absorption. Cette inertie, qui fonctionne comme celle des parois intérieures, est toujours intéressante l'hiver et ne garantit le confort d'été par canicule qu'avec un climat suffisamment contrasté pour assurer un refroidissement de nuit.

### Matériaux à chaleur latente

Lors du phénomène de fusion-solidification, à température constante pour un corps pur, intervient une quantité de chaleur très importante : la chaleur latente. En trouvant un matériau ayant une température  $T_{fs}$  (plus ou moins constante pour les matériaux composés) de fusion-solidification juste en dessous de la température de confort supérieure, lors d'une montée en température par canicule, avec une surface d'échange suffisante la fusion du matériau peut avoir deux effets. En relativement faible quantité, provoquée par la tendance à la croissance de température, absorbant de la chaleur la fusion peut réduire les oscillations sur un cycle de 24 heures, en particulier celles qui dépassent la température fusion-solidification. Mais en quantité importante lors de canicules fortes et persistantes, de façon séquentielle, par le même processus et tant que la fusion n'est pas terminée, elle peut stabiliser la température moyenne de l'ambiance intérieure à une température peu supérieure à  $T_{fs}$ . Evidemment, il est difficile d'envisager une quantité de matériaux à chaleur latente garantissant le confort quel que soit l'ampleur d'une canicule.

Des produits sont étudiés. Seront-ils un jour sûrs et pratiques ? En tout cas les architectes doivent être attentifs à ce que peut proposer l'industrie. (Renvoi à un article sur Enviroboîte)

#### **4.1.2 A PROPOS DE L'INERTIE DE TRANSMISSION**

**1.** Compte tenu d'un phénomène de mode tel qu'il existe un abus de vitrages descendant jusqu'au sol sans intérêt pour la vue ni pratiquement pour la qualité de l'éclairage naturel, rappelons que les parois de faible épaisseur transmettent avec de très faibles amortissement d'amplitude et déphasage les oscillations de température extérieure et qu'ainsi, indépendamment du rayonnement solaire, leur inertie de transmission est très faible. En plus d'une augmentation de la conductance  $H_T$  et donc de pertes inutiles l'hiver, l'abus de vitrage peut alors entraîner un certain inconfort, ne serait-ce que par leur température radiante par effet de paroi froide l'hiver et de paroi chaude l'été.

**2.** A propos de l'effet de paroi chaude, sous un climat chaud l'été, le concepteur doit particulièrement être attentionné à l'inertie de transmission des rampants et surtout des toitures-terrasses. En effet, même si l'énergie transmise est très faible, le rayonnement solaire direct étant proche de la verticale les températures de peau externes peuvent atteindre des valeurs très élevées et, sans une excellente isolation, avec un déphasage tel que le pic de température sur la face intérieure arrive de nuit, cette dernière peut être pénible, étant donné l'angle solide sous lequel est vu un plafond. L'architecte doit donc non seulement prévoir une excellente isolation, mais doit vérifier qu'elle est intelligemment placée, ce qui n'est pas toujours le cas.

**3.** Peut-on dire que les brise-soleil constituent une inertie de transmission ? Pourquoi pas dans la mesure où leur rôle est de résister à l'entrée du rayonnement solaire direct, soit en fin de compte à une croissance de température l'été ? Ne discutons pas, mais apprenons à concevoir pour l'été



d'authentiques brise soleil, en réservant pour l'hiver les persiennes intérieures qui, intelligemment utilisées et laissant entrer le rayonnement, le dévient seulement pour éviter une gêne pour l'œil.

#### 4.2 CONCEPTION DES BATIMENTS A USAGE PERMANENT

Même s'ils peuvent être à certains moments vides de leurs usagers, il s'agit essentiellement de l'habitat, individuel ou collectif, ce dernier, même de taille "humaine", respectant mieux l'éthique du développement durable en profitant de l'effet d'échelle pour atteindre des conductances par unité de volume habitable les plus faibles possible et en réduisant le coût des VRD et des transports. L'architecte doit, si possible, concevoir en recherchant évidemment l'orientation principale et si possible pratiquement unique Sud (la plus favorable conjointement pour été et hiver) et un volume habitable traversant afin d'obtenir la meilleure ventilation possible d'été.

##### ***L'intérêt de l'inertie intérieure par absorption***

***Considérons d'abord la nécessité et le fonctionnement de l'inertie intérieure par absorption. Evidemment, si l'orientation Sud est favorisée, c'est pour que la puissance moyenne de captage solaire, gratuite, soit maximale l'hiver (voir relation (7)).***

***Mais l'hiver, une orientation Sud ne garantit un bon captage solaire dans le confort, que s'il existe à l'intérieur une inertie par absorption suffisante, constituée par la quantité d'effusivité que représentent les refends, dalles et si possible la partie intérieure d'enveloppe de maçonnerie (isolation extérieure).***

***Elle évite les surchauffes puisque durant l'ensoleillement ces parois absorbent la puissance thermique supérieure à celle nécessaire au maintien de la température de confort et de plus elle permet le meilleur captage gratuit possible. En effet, la réduction maximum de la surchauffe réduit au maximum les pertes thermiques supplémentaires provoquées par celle-ci et la chaleur solaire captée est restituée presque complètement à l'habitat lorsqu'il se refroidit, sans que la chute de température soit importante, toujours grâce à la grande quantité d'effusivité.***

***L'été, dans le cas général, c'est grâce à une inertie thermique suffisante par absorption que, par le même processus que l'hiver, le pic de température est réduit et, comme nous l'avons expliqué, une ventilation nocturne permet de réduire la température intérieure moyenne. Mais il ne faut pas demander l'impossible à l'inertie par absorption. En période de canicule, dans un climat peu contrasté tel que la nuit le refroidissement par ventilation ne permet pas de faire baisser de façon importante la température moyenne, l'inconfort peut exister, surtout si le concepteur n'a pas commencé par réduire au maximum les causes de sollicitation (brise-soleil ou écrans divers).***

***Toutefois un traitement particulier peut être envisagé, surtout pour une chambre inoccupée durant la journée et n'ayant pas d'ouverture bien orientée pour un captage solaire d'hiver (ce serait dommage de ne pas capter l'hiver), faisant partie d'une habitation située en un lieu où l'été les journées peuvent être très chaudes mais où la température peut baisser rapidement au coucher du soleil (en particulier en altitude). Le concepteur peut alors éviter au maximum l'inertie par absorption dans cette chambre de telle sorte que l'isolation soit intérieure pour l'enveloppe. Dès que la température baisse, l'utilisateur de la chambre pourra la ventiler et rapidement passer une bonne nuit car, sans quantité d'effusivité importante, la chambre sera rapidement fraîche.***



Comme la conductance,  $H_T$ , d'un bâtiment doit être recherchée la plus faible possible, le développement d'enveloppes de structure bois, qui ne présentent pas de pont thermique et permettent le meilleur rapport [épaisseur totale d'enveloppe]/ [facteur de transmission surfacique], doit être encouragé pour l'habitat collectif comme individuel. Comme de plus l'enveloppe ne présente pas de couche interne effusive, le bâtiment doit alors être constitué intérieurement de maçonnerie. Il ne faut pas reproduire l'erreur des entreprises de charpente qui, avec de bons captages solaires passifs par les vitrages, ont voulu tout faire en bois et ont fabriqué un habitat de souffrance, de plus en fait très peu réellement capteur l'hiver puisque perdant beaucoup par surchauffes. Les concepteurs doivent sortir du conservatisme et remettre en question les techniques dominantes de maçonnerie, surtout quand des maisons de structure mixte, enveloppe porteuse en bois - intérieure de maçonnerie, existent depuis bientôt trente ans, même les structures principales étant en bois. C'est ce que font apparaître les photographies qui montrent que des poutres en bois peuvent supporter une dalle de maçonnerie et qu'à part pour les fondations le charpentier peut intervenir avant le maçon, qui vient à la fin monter les refends qui ont un double rôle : mécanique en assurant les contreventements et thermique en constituant une inertie par absorption.

A ceux qui objectent qu'il existe dans certains pays une quasi généralisation des maisons tout en bois et qu'elles sont confortables, il est aisé de répondre. Soit ces pays, sont depuis longtemps très techniques et non regardants (jusqu'à maintenant) sur la consommation énergétique de chauffage et de climatisation. Soit il s'agit de pays froids où même l'été le risque de surchauffe n'existe pas.

En ce qui concerne **l'inertie de transmission**, tous les bâtiments étant isolés et l'épaisseur d'isolant des parois opaques devant certainement encore augmenter avec la prochaine réglementation, est-elle suffisante ?

Ayant constaté au § 2.3 que le captage solaire par les enveloppes opaques pouvaient alors être négligé par rapport à celui du captage par les vitrages, nous pouvons affirmer que, dans la mesure où les isolations sont sérieuses (en particulier les rampants et toitures terrasse et y compris la pose des isolants, souvent très mal faite), les oscillations de température dues aux variations de température extérieure et au rayonnement solaire, arrivant sur la face interne d'une enveloppe ne peuvent pas avoir une amplitude importante et, par température radiante, créer un important problème de confort. En effet,

- nous avons expliqué à la fin du § 3.2.2 -1, qu'avec une isolation extérieure, une couche effusive côté intérieur fait nettement chuter les oscillations par appel de puissance ;
- nous avons expliqué au § 3.2.2 -1 conclusion (3), qu'avec un matériau de faible conductivité thermique au niveau de la face intérieure, son oscillation de température est faible lorsqu'il y a appel de puissance vers l'intérieur, ce qui est le cas avec une bonne inertie par absorption intérieure.



*Photo d'une structure bois avec maçons montant un refend : Structure mixte : la maçonnerie, intérieure, est montée après la charpente*

Un type de constitution d'enveloppe, le "monomur", présente un caractère particulier. Porteur en terre cuite, de *grande épaisseur*, grâce à de très nombreuses petites alvéoles qui créent une isolation globale répartie sur toute l'épaisseur, il peut présenter un facteur de transmission actuellement compétitif lorsque les éléments sont collés et non montés au mortier. Mais, la terre cuite étant assez effusive, la principale originalité du monomur est de présenter, conjointement à une isolation répartie, une certaine effusivité globale. Ainsi, selon les conclusions (1), (2) et (3) du § 3.2.2 -1, un "monomur" présente une bonne inertie de transmission et conjointement, vu de l'intérieur comme de l'extérieur, une certaine inertie par absorption.



*Photo d'un séjour : Structure mixte : enveloppe et structure principale de bois mais refends et dalles de maçonnerie*



#### 4.3 CONCEPTION DES BATIMENTS A USAGE INTERMITTENT

Il s'agit des bureaux, écoles, ... qui doivent assurer le confort intérieur entre 8 et 10 heures par jour. L'architecture ayant à traiter de cas des plus variés et étant le domaine d'une approche multicritère, à part pour un cas, dont il faut toutefois vérifier la possibilité, il n'y a pas de parti unique et clair à conseiller au concepteur. Certes, grâce à la nécessité d'un développement durable qui ne saurait admettre l'arbitraire et être en désaccord avec les lois de la nature, il est enfin compris que l'architecte, selon la définition même de l'architecture par son inventeur Vitruve, doit être un scientifique généraliste connaissant le milieu physique. Mais, comme pour tous les métiers de conception, par la nature de sa fonction il ne peut pas toujours, loin de là, optimiser tous les paramètres, dont ceux qui concernent l'énergie en relation avec le confort. Le cas "idéal" est rare. Par contre, actuellement, grâce à la connaissance de concepts et d'un vocabulaire communs, l'architecte doit travailler, *dès la conception*, avec les spécialistes des bureaux d'études. En ce qui nous concerne le spécialiste ne doit plus être seulement le "calculateur" du chauffage et/ou de la climatisation (d'une conception dont il n'est pas rare qu'elle soit stupide), mais, par des échanges avec l'architecte, qui pourra alors prendre des partis pertinents, il doit d'abord être le calculateur du comportement (d'été comme d'hiver) et de la consommation d'énergie des différents partis possibles du bâtiment à concevoir. Ce n'est pas en se contentant de faire les calculs pour que le bâtiment respecte la réglementation thermique qu'une architecture durable peut exister.

Nous ne donnerons donc que des pistes auxquelles l'architecte doit penser. Mais elles seront suivies ou abandonnées selon ce que les calculs permettront de déduire.

Une première démarche semble évidente. Si le climat, suffisamment clément, et l'orientation de tous les volumes, optimum, sont tels qu'il est possible d'obtenir naturellement, en toute saison, le confort intérieur, à part un nombre négligeable de jours, il paraît sage, selon le coût d'investissement, y compris en énergie, d'essayer de concevoir le bâtiment de façon qu'il soit naturellement confortable (à l'exception de quelques jours avec chauffage). Peu importe que, bien que confortable, il soit inoccupé la nuit. L'utilisation de techniques évitant les ponts thermiques et des calculs d'optimisation des surfaces de vitrage et de facteur de transmission surfacique peuvent permettre de penser que ce cas, pensé comme l'habitat à chauffage réduit, n'est pas complètement utopique.

Si, pour cause de climat ou/et de situation du bâtiment étudié, le captage solaire d'hiver, éventuellement possible pour seulement une partie, ne peut être que médiocre, de telle sorte qu'un chauffage s'impose, le concepteur doit se poser la question d'un chauffage intermittent et des mesures architectoniques qui peuvent ou doivent l'accompagner.

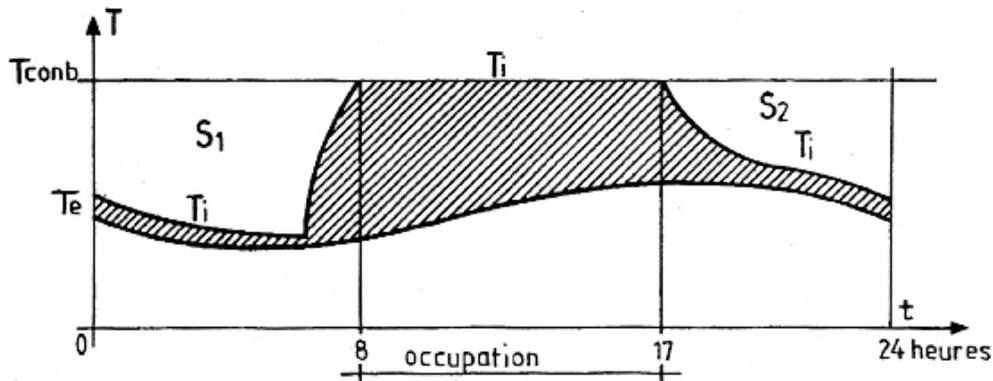


Figure 7

Schématiquement, le flux de perte thermique  $\Phi$ , d'une enveloppe de conductance  $H_T$  alors que l'écart de température entre intérieur et extérieur est  $\Delta T$ , est  $\Phi = H_T \cdot \Delta T$ . Donc l'énergie de chauffage (sans soleil) pour un jour est  $\int_0^{24} H_T \cdot \Delta T \cdot dt = H_T \int_0^{24} \Delta T \cdot dt$ , ce qui est représenté sur la figure 7 par la surface comprise entre toute l'horizontale  $T_{conb}$  (température basse de confort) et la courbe de variation de la température extérieure  $T_e$ . Si, quand les usagers quittent le bâtiment le chauffage est coupé, la température intérieure  $T_i$  baisse jusqu'à ce que le chauffage élève de nouveau la température pour l'arrivée des usagers. L'économie de chauffage est représentée par la somme des surfaces  $S_1$  et  $S_2$  et peut être considérable si le bâtiment, après que sa température ait chuté rapidement dès la coupure du chauffage, peut aussi être réchauffé rapidement. Cela suppose non seulement une grande puissance de chauffage durant le réchauffement, mais une très faible inertie par absorption. Les parois de structures-cloisonnements doivent donc être très peu effusives. Mais si l'économie peut être évidente l'hiver, selon le climat le manque d'inertie par absorption peut ne pas permettre que soit assuré naturellement le confort d'été par manque d'inertie. Si, pour cause de vacances (cas des écoles), le bâtiment n'est pas utilisé durant la saison chaude, le problème est résolu. Mais dans le cas général est-il plus économique d'éviter l'économie d'hiver au profit de celle d'été ? Ou est-il plus économique d'isoler les structure-cloisonnement et de chauffer l'hiver et climatiser l'été seulement de jour, la climatisation pour les mêmes raisons que le chauffage pouvant nécessiter peu d'énergie grâce à la faible inertie par absorption ?

A l'époque de l'informatique et des simulations rapides, il serait anormal de ne pas les utiliser pour répondre à ces questions en fonction du cas.

Insistons toutefois sur un point. Ce n'est pas parce qu'une climatisation peut être éventuellement tolérée en France, qu'il ne faut pas étudier scrupuleusement les mesures architecturales qui rendent sa consommation très faible, essentiellement la maîtrise des entrées solaires.



#### 4. CONCLUSION GENERALE

Avec la prise de conscience du si nécessaire développement durable et pour la propre durabilité de l'architecture, de plus en plus reconnue pertinente lorsqu'elle ne tombe pas dans la facilité de laisser à des techniques énergivores le soin de rattraper des partis architecturaux en contradiction avec les lois de la nature, le concepteur se doit d'utiliser au mieux les phénomènes inertiels propres aux bâtiments. Mais, par leur nature liée à des phénomènes dynamiques donc complexes, avec conjointement des transmissions de variations de température et d'absorption de chaleur, la compréhension des inerties thermiques est délicate. Par l'incontournable approche scientifique minimale développée par le présent article, pour se forger une culture des inerties thermiques tout concepteur se doit de travailler à en découvrir les subtilités. Toutefois, durant le temps de maturation nécessaire à cette nécessaire culture, l'architecte doit au moins savoir ce qui suit.

### Ce que doit retenir l'architecte...

- Les matériaux utilisés en architecture présentent deux types de propriétés dynamiques: la *diffusivité*, pratiquement du même ordre de grandeur pour tous, qui exprime une facilité à transmettre une variation de température; l'*effusivité*, "normale" pour les minéraux et nettement faible ou très faible pour tous les autres, qui exprime une facilité à absorber (avec peu de variation de température) une puissance thermique ;
- A l'échelle d'un bâtiment, il y a deux sortes d'inertie : celle qui, résistant aux sollicitations dynamiques du climat (variations de température et d'ensoleillement), concerne donc son enveloppe et est nommée *inertie de transmission* ; celle qui, intérieure au bâtiment, résiste à une variation interne de température par absorption de chaleur et est nommée *inertie par absorption* ;
- Pour les cas les plus courants, avec les isolations actuelles des parois d'enveloppes opaques (qui peuvent être réalisées sur une structure de maçonnerie, combinées avec structure bois, en isolation répartie d'une paroi minérale épaisse alvéolée), une inertie de transmission correcte est essentiellement obtenue par une gestion intelligente des surfaces de vitrages qui, durant la saison froide, favorise un bilan positif du captage solaire par rapport aux pertes et, durant l'été, évite d'une part les grandes surfaces vitrées dont la faible épaisseur entraîne une température proche de celle de l'ambiance extérieure et d'autre part les entrées solaires directes grâce à des protections solaires performantes ;
- Une inertie par absorption, toujours nécessaire pour les volumes à occupation permanente mais à étudier par simulation informatique pour les édifices occupés par intermittence, permet l'hiver un bon captage solaire passif dans le confort et prolonge dans le temps les effets de la ventilation nocturne assurant le confort d'été. Elle est pratiquement le plus couramment constituée par des surfaces de maçonnerie de structure-cloisonnements et éventuellement de la couche intérieure d'enveloppe ;
- Il existe une influence de l'inertie par absorption sur l'effet de l'inertie de transmission sur le confort. Ainsi, alors qu'une enveloppe très isolante de structure bois aboutit à une bonne inertie de transmission avec une inertie par absorption intérieure dans un volume fermé, ce dernier, vide et alors sans appel de puissance, peut être inconfortable pour cause d'importante onde de température transmise sur la face intérieure de l'enveloppe.



Ce dernier point illustre toutes les subtilités attachées aux phénomènes inertiels. Ainsi, après s'être pénétré du présent article, nécessairement concis, **pour en savoir plus sur les inerties et plus généralement sur toutes les connaissances nécessaires à la conception du cadre bâti dans le cadre du développement durable**, le lecteur peut les acquérir avec l'ouvrage, rédigé pour les architectes, cité par la bibliographie.

## Bibliographie

[1] **Concevoir des bâtiments bioclimatiques** - Fondements et méthodes, par Pierre Fernandez et Pierre Lavigne - EDITIONS LE MONITEUR - Novembre 2009

[2] "Complément technique mars/avril 2010" du MONITEUR, intitulé "Changement d'attitude pour concevoir un cadre bâti bioclimatique : une contribution au développement durable", par Pierre Fernandez et Pierre Lavigne.