

## ***bSol***

### **A. Fondements théoriques**

#### **1. Idée générale**

Le logiciel *bSol* peut traiter jusqu'à 2 zones (pièces ou ensemble de pièces ayant la même température intérieure) en contact thermique l'une avec l'autre.

Pour étudier une zone de bâtiment, *bSol* effectue de manière horaire, dans le cadre d'un modèle à un nœud, le bilan des gains et des pertes thermiques et détermine ainsi, heure après heure, l'évolution de la température intérieure<sup>1</sup>. Lorsque les conditions de confort l'exigent, des paramètres variables sont activés (abaissement de protections solaires mobiles, augmentation de l'aération en vue de rafraîchir) ; en dernier recours, les installations techniques (chauffage, rafraîchissement) interviennent pour garantir que les conditions du confort intérieur sont remplies.

La somme de toutes les interventions effectuées par les installations techniques sur une certaine période donne l'énergie nette (de chauffage ou de rafraîchissement) qu'il est nécessaire de fournir pour garantir le confort thermique. La valeur maximale de l'énergie fournie par la technique pendant un laps de temps de une heure sert à déterminer la puissance de pointe nécessaire (de chauffage ou de rafraîchissement).

#### **2. Bilan thermique**

De manière générale, pour la zone considérée, la somme des différentes puissances thermiques perdues (vers l'extérieur, vers différents éléments de terrain, vers différents

---

<sup>1</sup> La température intérieure ainsi déterminée est à la fois celle de l'air intérieur et celle des éléments de construction en contact avec ce dernier : c'est donc une valeur très proche de la température effectivement ressentie à l'intérieur.

locaux à température constante ainsi que vers l'autre zone) est égale à la somme des gains thermiques (gains solaires à travers les vitrages, déstockage de chaleur accumulée dans les structures, gains internes des personnes et des installations électriques, et gains en provenance des installations techniques (positifs pour le chauffage et négatifs pour le rafraîchissement)). Ce bilan thermique est représenté par l'équation suivante :

$$H_e(\theta_i(t) - \theta_e(t)) + \sum_k H_{Gk}(\theta_i(t) - \theta_{Gk}(t)) + \sum_k H_{Ok}(\theta_i(t) - \theta_{Ok}(t)) + H_{in}(\theta_i(t) - \theta_{in}(t)) = \sum_k g_{Sk}(t) F_F g_k A_{Wk} G_k(t) + C \frac{d\theta_i(t)}{dt} + SRE_0(P_{iP}(t) + P_{iE}(t)) + SRE P_{HC}(t)$$

où les différentes déperditions thermiques spécifiques  $H$  sont données par :

$$H_e = \left( \sum_{(j)_e} A_j U_j + \sum_{(j)_e} L_j \psi_j + \sum_{(j)_e} \chi_j \right) + c_a \rho_a (1 - \eta) \dot{V}_e$$

$$H_{Gk} = \left( \sum_{(j)Gk} A_j U_j + \sum_{(j)Gk} L_j \psi_j + \sum_{(j)Gk} \chi_j \right)$$

$$H_{Ok} = \left( \sum_{(j)Ok} A_j U_j + \sum_{(j)Ok} L_j \psi_j + \sum_{(j)Ok} \chi_j \right)$$

$$H_{in} = \left( \sum_{(j)in} A_j U_j + \sum_{(j)in} L_j \psi_j + \sum_{(j)in} \chi_j \right) + c_a \rho_a \dot{V}_{in}$$

### 3. Données météorologiques

#### 3.1. Température extérieure

Pour la température extérieure  $\theta_e$ , *bSol* utilise des données horaires pour toute la durée d'une année (du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre). Pour un endroit géographique donné, ces valeurs peuvent, par exemple, être extraites de la base de données METEONORM [Réf.].

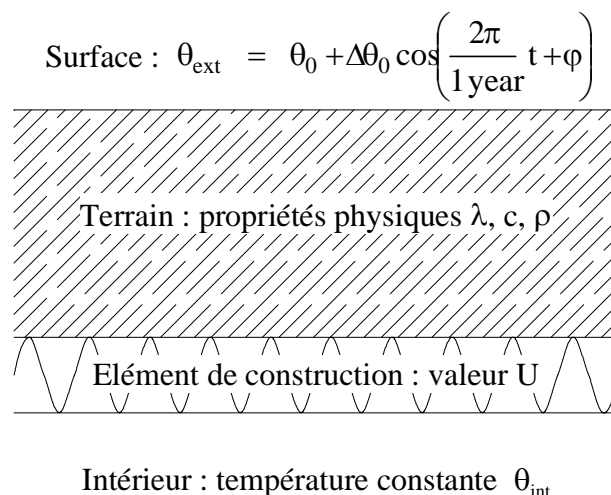
### 3.2. Température du sol en contact avec un élément de construction

La température du sol en contact avec un élément de construction situé à une profondeur donnée au-dessous du niveau du sol, est déterminée analytiquement à l'aide de l'équation de conduction de la chaleur :

$$c\rho \frac{\partial\theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}(\theta))$$

dans laquelle  $c$ ,  $\rho$  et  $\lambda$  représentent la chaleur massique, la masse volumique et la conductivité thermique du sol. Les hypothèses suivantes sont faites :

- le terrain est homogène (conductivité thermique, chaleur massique et masse volumique constantes) ;
- l'élément de construction en contact avec le sol est homogène quant à sa valeur  $U$  et grand (pas d'effet de bord) ;
- la température du sol en surface peut être considérée comme une fonction harmonique dont la période est une année (1<sup>re</sup> composante du développement en série de Fourier de la température extérieure) ;
- la température du local en contact avec le sol est constante tout au long de l'année.



La température du terrain ainsi déterminée tient compte des déperditions du local vers le terrain.

### 3.3. Rayonnement solaire

L'irradiance incidente  $G_k$  sur une fenêtre d'orientation arbitraire  $k$  est calculée par *bSol*, à partir des données horaires brutes des irradiances globale  $G_h$  et diffuse  $D_h$  sur un plan horizontal, sans aucun effet d'horizon.

$$G_k = B_k + D_{sky} + D_{reflected}$$

$$B_k = (G_h - D_h) \frac{\cos \theta}{\sin \eta}$$

Pour le rayonnement diffus en provenance du ciel,  $D_{sky}$ , un modèle isotrope est considéré ; en ce qui concerne l'albédo du sol  $\rho$ , il est pris en compte sous la forme de valeurs mensuelles qui dépendent uniquement de la température mensuelle moyenne du lieu [réf]. Les effets d'horizon agissent à la fois sur l'irradiance directe  $B_k$  (ligne d'horizon) et sur les irradiances diffuses  $D$  par l'intermédiaire des facteurs de vue du ciel et du sol  $r_D$  et  $r_R$ ).

$$D_{sky} = r_D D_h$$

$$D_{reflected} = r_R \rho G_h$$

$$r_D + r_R = 1$$

$$\rho = 0.5 \quad \text{pour} \quad \bar{\theta}_e \leq -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = \rho_0 + \delta_\rho \exp(-0.038(\bar{\theta}_e + 3 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad \text{pour} \quad \bar{\theta}_e > -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_0 = 0.2 \quad \delta_\rho = 0.3$$

## 4. Capacité calorifique

Un élément de construction en contact avec le climat intérieur peut accumuler de la chaleur à certaines heures de la journée (apports solaires à travers les vitrages, production de chaleur de par la présence de personnes ou le fonctionnement d'appareils électriques, etc.) et la restituer à la pièce lorsque la température de cette dernière baisse. *bSol* traite ces phénomènes en admettant que [réf] :

- la température à la surface intérieure de l'élément considéré varie suivant la relation :

$$\theta_i(t) = \theta_{oi} + \Delta\theta \cos\left(\frac{2\pi t}{1 \text{ day}} + \phi\right)$$

- le flux de chaleur sur l'autre face de l'élément de construction est nul (plan adiabatique) ; cette situation est réalisée dans une bonne approximation dans de nombreuses situations, par exemple pour la face supérieure d'une dalle de béton sur laquelle repose une isolation thermique, pour la face inférieure d'une chape reposant sur une couche d'isolation thermique, pour un mur extérieur en maçonnerie muni d'une isolation thermique périphérique ; on peut aussi très bien considérer que le plan médian d'un mur intérieur est lui aussi un plan adiabatique : de cette façon, toute cloison intérieure doit être découpée en deux demi-épaisseurs, chacune appartenant à une des pièces attenante à la cloison.
- la chaleur stockée dans un élément k de construction  $Q_k^{\text{sto}}$  est considérée comme l'intégrale durant toute une journée des flux de chaleur entrant dans l'élément considéré.
- la capacité calorifique de l'élément est le quotient de la chaleur stockée par le double de l'amplitude de variation de température :

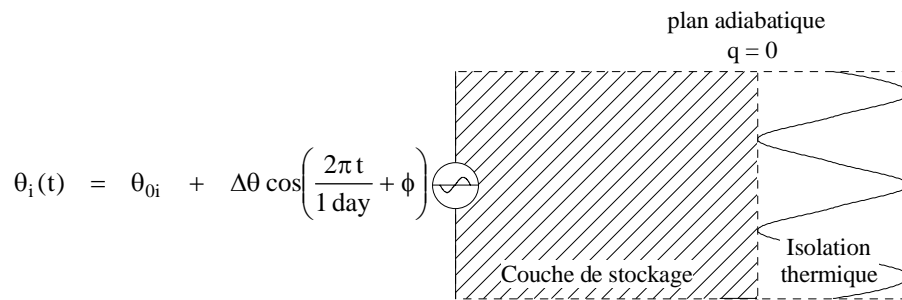
$$C_k = \frac{Q_k^{\text{sto}}}{2 \Delta\theta}$$

- En ce qui concerne la capacité calorifique  $C$  associée au nœud intérieur, elle est considérée comme la somme de toutes les capacités calorifiques de chacun des éléments en contact avec l'air intérieur, la capacité calorifique de l'air lui-même étant négligée :

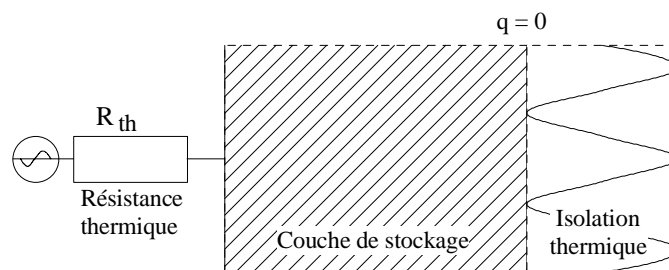
$$C = \sum_{(k)_i} C_k$$

Du point de vue pratique, *bSol* permet de traiter trois variantes :

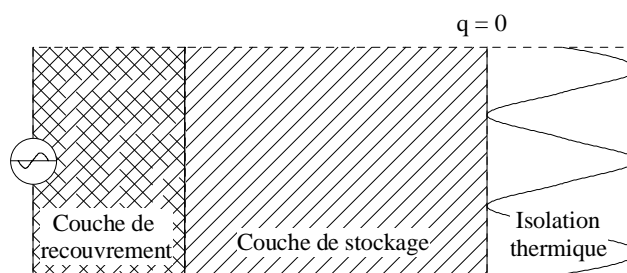
1. la couche de stockage k est directement en contact avec l'air de la pièce.



2. la couche de stockage est en contact avec l'air de la pièce au travers d'une **résistance thermique**, telle que boiserie, tapisserie, tapis, dont la capacité calorifique peut être négligée.



3. la couche de stockage est recouverte d'une **couche de recouvrement**, telle que crépis, boiserie épaisse ; dans ce cas, les capacités calorifiques des deux couches sont rigoureusement considérées.



## 5. Eléments de réglage

### 5.1. Déstockage thermique par aération

Lorsque la température intérieure dépasse la valeur de consigne  $\theta_v$  et que la température de l'air extérieur est inférieure à la température intérieure d'au moins  $\Delta\theta_v$ ,

le débit de renouvellement d'air prend sa valeur supérieure  $\dot{v}_{sup}$ . Il reprend sa valeur inférieure  $\dot{v}_{inf}$  dès que l'une des deux conditions n'est plus remplie.

## 5.2. Echange d'air avec l'autre zone

La valeur supérieure pour le débit d'échange d'air entre les deux zones est prise en compte chaque fois que la situation est favorable pour réchauffer une zone qui est en dessous de la valeur de consigne de chauffage ou pour refroidir une zone qui est au-dessus de la valeur de consigne de climatisation. Dans tous les autres cas, c'est la valeur inférieure de ce débit qui est considérée

## 5.3. Protections solaires mobiles

L'effet des protections solaires mobiles est pris en compte par le biais d'un facteur de transmission énergétique  $g_s$  des protections solaires : lorsque la température intérieure atteint la valeur de consigne  $\theta_s$  et/ou l'irradiance globale sur la fenêtre considérée passe au-dessus de la valeur de consigne  $G_s$ , le facteur de transmission énergétique prend la valeur qui caractérise la protection solaire abaissée ; sitôt que les conditions d'intervention des protections solaires ne sont plus remplies, le facteur de transmission de transmission énergétique retrouve la valeur 1.

## 5.4. Installations techniques

Lorsque le chauffage est activé et que la température intérieure tombe en dessous de la valeur de consigne, le chauffage comble, en une heure de temps, le déficit calorifique intérieur, et ceci jusqu'à utilisation de la puissance maximale que le système de chauffage peut livrer. Dans le cas d'un abaissement nocturne de température, la relance matinale s'effectue en une heure de temps, à moins que la puissance de chauffage disponible n'y suffise pas.

De même, lorsque la climatisation est active et que la température est supérieure à la température de consigne pour le rafraîchissement, les installations techniques extraient, en une heure de temps, l'excès calorifique constaté, et ceci jusqu'à utilisation de la puissance maximale disponible.

## 6. Variation des paramètres

En plus de déterminer les besoins énergétiques (chauffage et climatisation), *bSol* propose une aide à l'optimisation : l'idée consiste à varier successivement chacun des 8 paramètres constructifs différents et à en quantifier les modifications de la réponse en énergie et en puissance :

- $U_{\text{opaque}}$  : valeur U des éléments opaques de l'enveloppe du bâtiment
- $U_{\text{vitrage}}$  : valeur U des vitrages
- $U_{\text{cadre}}$  : valeur U des cadres de fenêtres
- $\eta$  : rendement du récupérateur de chaleur sur l'air renouvelé
- $S_{\text{fenêtre}}$  : surface des fenêtres
- $g_{\text{vitrage}}$  : gain énergétique total des vitrages
- $g_{\text{store}}$  : facteur d'atténuation des stores
- $C_{\text{cal}}$  : capacité calorifique

### Principe appliqué pour la variation des paramètres (surface des fenêtres exceptée).

La valeur du paramètre est comparée à une valeur idéale associée à ce paramètre. Le paramètre est alors modifié, de façon à combler, sur une échelle logarithmique, le quart de l'écart qui sépare sa valeur initiale de la valeur idéale. Cette manière de faire tient compte du fait que, si un élément de construction est très faible comparé au standard idéal actuel, il est très facile de l'améliorer, alors que c'est beaucoup plus difficile de le faire si la valeur initiale est proche de la valeur idéale.

Par exemple pour un vitrage : si la valeur U initiale est de  $2.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ , et la valeur U idéale de  $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , la valeur U après variation sera de  $\sqrt[4]{(2.9)^3(0.6)} \approx 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  ; si, en revanche, la valeur U initiale avait été de  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , la valeur U après variation aurait été de  $\sqrt[4]{(1.1)^3(0.6)} \approx 0.95 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

$(U_{\text{opaque}})_{\text{idéal}}$	$0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$
$(U_{\text{vitrage}})_{\text{idéal}}$	$0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$

$(U_{\text{cadre}})_{\text{idéal}}$	0.9 W/m <sup>2</sup> K
$(1 - \eta)_{\text{idéal}}$	0.1
$(g_{\text{vitrage}})_{\text{idéal}}$	0.85
$(g_{\text{store}})_{\text{idéal}}$	0.15
$(C_{\text{cal}})_{\text{idéal}}$	1.5 MJ/Km <sup>2</sup>

Table 2 : Valeurs idéales 2003 admises pour les différents paramètres

### Principe appliqué pour la variation de la surface des fenêtres

Sur la base des orientations de chacune des fenêtres du projet, la « direction dominante » est identifiée (par exemple le sud pour un projet dans lequel il y a de larges baies vitrées vers le sud et uniquement des ouvertures réduites vers le nord).

Dans la direction dominante, la variation des surfaces des fenêtres se fait en agrandissant ces dernières au point de diminuer d'un quart la surface de mur opaque restante dans cette direction ; dans la direction opposée à la direction dominante, la variation des surfaces de fenêtre se fait en les diminuant d'un quart par rapport à leur surface initiale.

Pour une orientation de fenêtre intermédiaire entre les deux directions précédentes, la variation est effectuée sur la base de l'un des deux principes précédents en utilisant un facteur de projection (cosinus de l'angle situé entre l'orientation de la fenêtre et la direction dominante).

## 6. Notation

Indice	Notion	Begriff
0	température constante	konstante Temperatur
C	rafraîchissement	Kühlung
D	diffus	Diffus
e	extérieur	Aussen
E	appareils électriques	Elektrogeräte
F	cadre de fenêtre	Fensterrahmen
G	terrain	Erdreich
H	chauffage	Heizung
h	plan horizontal	Horizontale Ebene
i	intérieur	Innen
in	autre zone	Andere Zone
j, k	indice de sommation	Summenindex
k	plan d'orientation quelconque	Ebene mit beliebiger Orientierung
P	personnes	Personnen
R	réfléchi	Reflektiert
S	protection solaire	Sonnenschutz
W	fenêtres	Fenster
V	ventilation	Lüftung

Grandeur	Unités	Notion	Begriff
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Débit d'échange d'air	Luft-Volumenstrom
A	m <sup>2</sup>	superficie	Fläche
L	m	longueur	Länge
B	W/m <sup>2</sup>	irradiance directe	Direkte Einstrahlung
C	J/K	capacité calorifique	Wärmespeicherkapazität
c <sub>a</sub>	J/kgK	chaleur massique de l'air	Spezifische Wärmekapazität der Luft
H	W/K	départitions thermiques spécifiques	Spezifische Wärme-Verluste
D	W/m <sup>2</sup>	irradiance diffuse	Diffuse Einstrahlung
F	-	facteur de réduction	Abminderungsfaktor
g	-	coefficient de transmission énergétique d'un vitrage	Gesamtenergiedurchlassgrad einer Verglasung
G	W/m <sup>2</sup>	irradiance globale	Globale Einstrahlung
P	W/m <sup>2</sup>	densité de puissance calorifique par m <sup>2</sup> de SRE	Wärmeleistungsdichte pro m <sup>2</sup> EBF
Q <sup>sto</sup>	J	chaleur stockée journallement	täglich gespeicherte Wärme

r	-	facteur de vue	
SRE	m <sup>2</sup>	surface de référence énergétique	Energiebezugsfläche
SRE <sub>0</sub>	m <sup>2</sup>	Surface de référence énergétique sans correction de hauteur	Energiebezugsfläche ohne Höhenkorrektur
U	W/m <sup>2</sup> K	coefficient de transmission de chaleur	Wärmedurchgangskoeffizient
ψ	W/mK	coefficient linéique de transmission de chaleur	
χ	W/K	coefficient ponctuel de transmission de chaleur	
Δθ	°C	amplitude de variation journalière de la température	Tages-Temperaturamplitude
α	-	azimuth du soleil à partir du sud	Azimuthwinkel der Sonne bezüglich des Süden
η	-	rendement thermique du récupérateur de chaleur sur l'air renouvelé	thermischer Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage der Lüftung
η	-	angle d'élévation du soleil au-dessus de l'horizontale	Höhenwinkel der Sonne über der Horizontale
θ	°C	température	Temperatur
θ	-	angle d'incidence	Einfallswinkel
ρ <sub>a</sub>	kg/m <sup>3</sup>	masse volumique de l'air	Dichte der Luft
ρ	-	Albédo du sol	Albedo der Erdoberfläche