



Rapport à remettre par Moodle au plus tard le mercredi 12 février à 18:00

Pondération : voir plan de cours (tous les devoirs ont le même poids)

Ce devoir doit être réalisé individuellement

Révision : 2025-02-03

## Changements 3 février :

- Section 1.2, il y avait une confusion entre température extérieure (ou ambiante) et température intérieure. C'est la température intérieure que vous devez imposer.
- Ajout d'une annexe avec la description des variables pour la partie 1

## 1. Heat-Balance Method : conduction transitoire 1-D

### 1.1. Modèle TRNSYS de référence

On considère une version modifiée du bureau du devoir 1 dans laquelle toutes les parois sont opaques et soumises aux mêmes conditions extérieures (pas d'ensoleillement, pas de rayonnement de grande longueur d'onde, même coefficient de convection et même température extérieure). Il n'y a aucun gain (ni convectif ni radiatif) dans le bâtiment, seulement un chauffage convectif qui maintient la température intérieure voulue. Toutes les parois opaques sont identiques et consistent en une couche de béton (0.2 m) et une couche d'isolant (0.06 m). Deux variantes du bureau sont modélisées, une avec la couche de béton du côté intérieur des murs, l'autre avec la couche de béton à l'extérieur. Les propriétés thermiques des matériaux et les coefficients de convection utilisés sont spécifiés dans le modèle TRNSYS fourni sur Moodle, vous devez les récupérer dans le fichier décrivant le bâtiment (`TwoOffices-Opaque.b18`).

Fichiers de départ fournis sur Moodle pour la partie 1 :

- `Devoir2-1-TRNSYS.zip` : archive avec tous les fichiers nécessaires pour exécuter les simulations TRNSYS. Il suffit de décompresser l'archive et d'ouvrir les projets (`.tpf`) dans le répertoire « `Devoir2-1-TRNSYS` » créé.

Le projet TRNSYS fourni exécute une simulation avec des conditions qui imposent un échelon de température extérieure : on part avec toutes les températures initialisées à 0 °C, et la température intérieure augmente brusquement vers 20 °C. Notez qu'on ne peut pas amener la température intérieure à 20 °C instantanément dans la simulation (cela demanderait une puissance de chauffage infinie), donc on l'amène à 20 °C par une augmentation linéaire pendant le premier pas de temps de 0.25 h (15 min).

TRNSYS renseigne toujours les valeurs moyennes des variables sur le pas de temps, en les rapportant à la fin du pas de temps. Donc, par exemple, la valeur indiquée pour « 0.25 h » correspond à la moyenne entre 0 et 0.25 h si on utilise un pas de temps de 0.25 h. Dans le cas de la simulation présente, la température dans les bureaux vaut donc 0 °C pour les conditions initiales, 10 °C pendant le premier pas de temps (augmentation linéaire entre 0 et 20), et 20 °C pour tous les pas de temps suivants. Vous devrez imposer la même température du côté intérieur de votre modèle de conduction transitoire.

On évalue les densités de flux de chaleur qui rentrent et sortent du mur, en  $W/m^2$ , ainsi que l'énergie stockée par unité de temps et de surface. Dans le modèle TRNSYS, comme toutes les parois sont identiques, ce résultat peut être obtenu à partir de n'importe quelle paroi. Notez que comme toutes les températures de surface intérieures sont identiques, aucun rayonnement de grande longueur d'onde n'est échangé entre les surfaces.

## 1.2. Modèle de paroi par volumes de contrôles

On vous demande d'établir un modèle de paroi qui permet de calculer la réponse thermique du mur et d'évaluer la densité de flux de chaleur transmise depuis la zone vers la face intérieure ( $q''_{si}$ ), la densité de flux de chaleur transmise depuis la face extérieure vers l'ambiance ( $q''_{so}$ ), et la quantité d'énergie stockée dans la paroi par unité de surface ( $q''_{stored}$ ). Toutes ces grandeurs doivent être évaluées en  $W\ m^{-2}$  (attention aux conventions de signe, les flux demandés ici ne correspondent pas à  $q''_{ki}$  et  $q''_{ko}$  dans les notes de cours, on choisit ici un sens qui donnera des valeurs positives quand le côté intérieur du mur est plus chaud que le côté extérieur). Vous devez étudier cette réponse en régime transitoire jusqu'à l'obtention d'un régime stationnaire et comparer vos résultats avec ceux de la simulation TRNSYS.


Comme les calculs sont effectués en valeurs instantanées, la température intérieure de l'air doit monter linéairement entre 0 °C et 20 °C pendant le premier quart d'heure, puis rester à 20 °C. Un exemple d'équation à utiliser pour la température intérieure est :

$$T_{int} = \min(20, t[h] \cdot 80 [^{\circ}C/h]) \quad [\text{en } ^{\circ}C]$$

Où la fonction min prend le minimum entre ses 2 arguments (donc la température vaudra  $80 \cdot t(h)$  où  $t(h)$  est le temps en heures, mais si la valeur calculée dépasse 20, on restera à 20).

Lorsque vous comparez vos résultats à ceux de TRNSYS, n'oubliez pas que ces derniers représentent des valeurs moyennes sur le pas de temps de 15 min.

## 2. Résilience d'une maison unifamiliale

 Fichiers de départ fournis sur Moodle pour la partie 2 :

- Devoir2-2-TRNSYS.zip : archive avec tous les fichiers nécessaires pour exécuter les simulations TRNSYS. Il suffit de décompresser l'archive et d'ouvrir les projets (.tpf) dans le répertoire « Devoir2-2-TRNSYS » créé.

On modélise une maison de 3 niveaux (sous-sol, rez-de-chaussée, et étage) occupée par une famille de 4 personnes (voir Figure 1).

Le projet TRNSYS fourni contient le bâtiment lui-même, ainsi que plusieurs composants qui modélisent l'infiltration d'air, les températures de contact du sol, la ventilation avec récupération de chaleur (HRV, *heat recovery ventilator*), et un chauffe-eau domestique. Vous ne devez pas modifier ces composants, vous devez seulement modifier les propriétés des parois opaques dans le bâtiment.

Le fichier météo utilisé est celui de l'année 1998 (CAN-QC-Montreal-YUL-716270-SIMEB-1998.epw). L'année 1998 correspond à la « crise du verglas » qui a causé de nombreuses pannes de longue durée, principalement au Québec ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Verglas\\_massif\\_de\\_janvier\\_1998\\_dans\\_le\\_Nord-Est\\_de\\_l%27Am%C3%A9rique\\_du\\_Nord](https://fr.wikipedia.org/wiki/Verglas_massif_de_janvier_1998_dans_le_Nord-Est_de_l%27Am%C3%A9rique_du_Nord)).

Les variables de sortie disponibles dans le fichier SmallDetached.csv sont décrites en annexe.

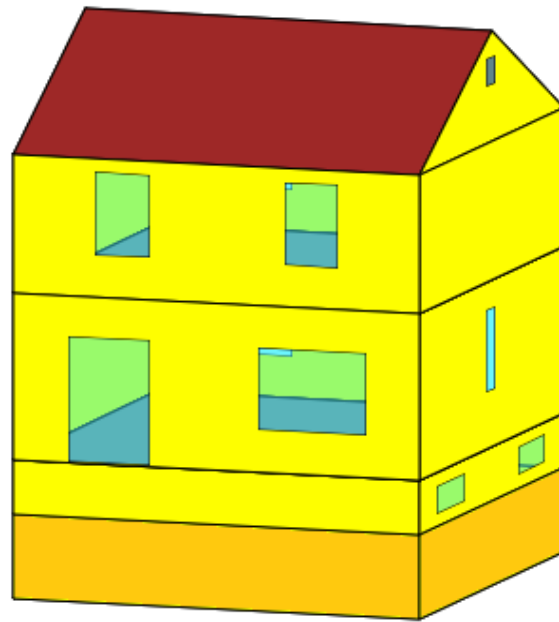


Figure 1 : Vue de la maison modélisée

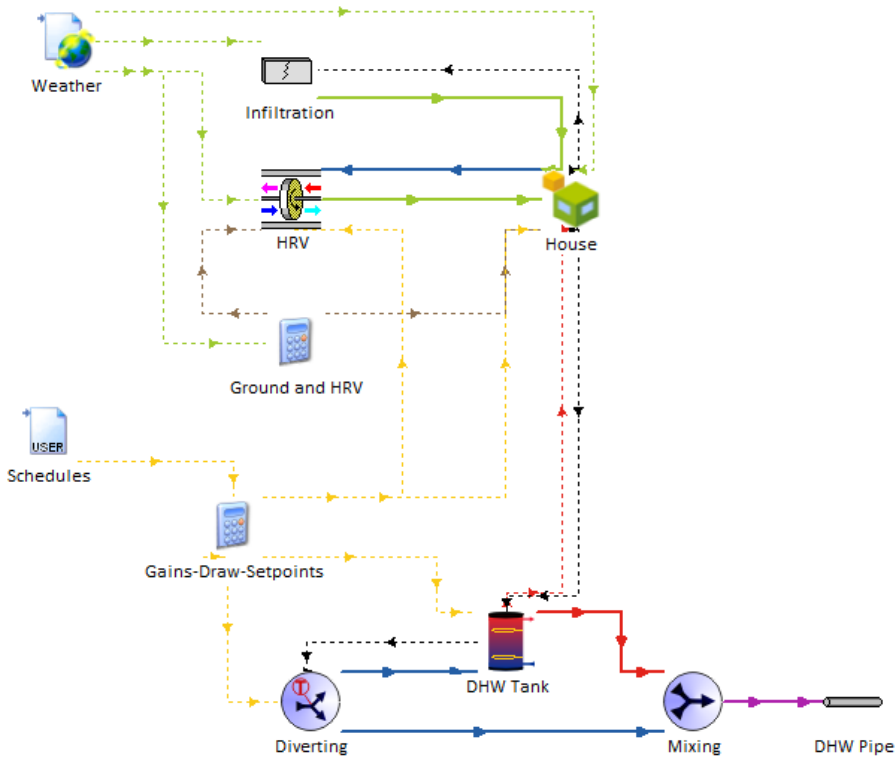


Figure 2 : Projet TRNSYS

## 2.1. Évaluation de la résilience thermique de la configuration de départ

La résilience thermique peut être définie comme la capacité d'un bâtiment à maintenir des conditions vivables pendant une période donnée après une panne totale d'électricité (Kesik & O'Brien, 2019). On utilise souvent une période de 72 h après une panne pour quantifier la résilience des systèmes, en estimant que, dans cet intervalle, soit l'alimentation électrique sera rétablie, soit les autorités auront eu le temps de mettre des mesures d'urgence en place pour évacuer les occupants. Dans le cas d'une panne par temps froid, la résilience thermique d'un bâtiment doit lui permettre de maintenir une température intérieure supérieure à une certaine limite pendant ces 72 h. La limite considérée est souvent de 15 °C.

Vous devez simuler une panne complète d'électricité le 9 janvier à 18 h, qui correspond à l'heure 210 de la simulation, et présenter le comportement des températures dans la maison pour évaluer sa résilience thermique. Pour simuler la panne, vous devez modifier les consignes dans le bloc d'équations « Gains-Draws-Setpoints », par exemple en abaissant la consigne de chauffage à 0 °C au moment de la panne. Note : en cas de panne complète, tous les appareils électriques (y compris la ventilation) s'arrêtent.

## 2.2. Enveloppe améliorée

Proposez une construction différente pour les parois opaques en contact avec l'extérieur ou des zones froides (plancher du sous-sol, murs extérieurs enterrés et hors sol, et plancher du grenier) qui permet de maintenir la température dans toutes les zones de la maison au-dessus de 15 °C après 72 h. Vous pouvez par exemple vous inspirer des documents fournis sur le site de la certification Novoclimat (<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/en/residentiel/programmes/novoclimat-professionnels-construction/novoclimat-maison/dessins-assemblage>) ou encore des parois utilisées dans la partie 1 en faisant varier le niveau d'isolation thermique de façon réaliste et en plaçant la masse thermique judicieusement.

Décrivez les parois choisies, et analysez l'impact de ce changement sur la résilience, mais aussi sur la consommation d'énergie annuelle et sur la pointe par journée froide.

Note : le couplage avec le sol est modélisé de façon simplifiée, vous ne devez pas changer les équations qui fixent les températures de contact (bloc d'équations « Ground and HRV »), mais vous pouvez ajouter de l'isolant sous la dalle du sous-sol. L'infiltration correspond déjà à un bâtiment performant, de même que la fenestration, donc vous ne devez pas changer ces aspects.

## 3. Rapport et fichiers à remettre

Remettez un rapport de 7 pages maximum qui décrit vos résultats et vos analyses pour les parties 1 et 2. Vous devez également remettre par Moodle les codes utilisés pour faire vos calculs de la conduction transitoire (fichiers EES, Matlab, Julia, Python, etc.)

- Partie 1 (2-4 pages, 12 points)

- Présentez brièvement votre modèle. Il n'est pas nécessaire de retranscrire vos équations dans le rapport, mais plutôt de donner un aperçu des principaux choix que vous avez faits (nombre de volumes de contrôle, pas de temps, etc.)
- Comparez graphiquement les réponses de la densité de flux de chaleur  $q''_{si}$ ,  $q''_{so}$  et  $q''_{stored}$  en  $W\ m^{-2}$  de votre modèle avec TRNSYS.
- Donnez des courbes de température à l'intérieur de la paroi à 0 h, 6 h, 24 h, 72 h et en régime permanent (on parle ici de courbes de la température en fonction de la position dans le mur).
- Présentez l'intégrale de la quantité d'énergie stockée en fonction du temps, et discutez de l'énergie totale stockée entre les conditions initiales et le régime permanent pour les 2 variantes.
- À l'aide des résultats précédents, discutez des avantages des deux types de parois (isolant à l'extérieur ou à l'intérieur).
- Partie 2 (2-3 pages, 8 points)
  - Présentez le comportement des températures dans la maison après une panne complète d'électricité, dans la configuration initiale. Commentez la résilience thermique du bâtiment.
  - Décrivez la composition des parois opaques que vous proposez pour améliorer la résilience et comment vous les avez modélisées.
  - Analysez la résilience thermique avec les nouvelles parois, pour démontrer que vous atteignez la cible de 72 h.

## 4. Références

Kesik, T., & O'Brien, W. (2019). *Thermal Resilience Design Guide V1.0*. University of Toronto.  
<https://academic.daniels.utoronto.ca/pbs/wp-content/uploads/sites/13/2023/04/Thermal-Resilience-Guide-v1.0-May2019.pdf>

## 5. Annexe 1 : variables de sortie, simulation de référence de la partie 1

Variable	Unités	Description
Tamb	°C	Température (sèche) ambiante
Tair_insout	°C	Température de l'air du bureau, variante « isolant à l'extérieur »
Tsi_insout	°C	Temp. de surface intérieure de la paroi, variante « isolant à l'extérieur »
Tso_insout	°C	Temp. de surface extérieure de la paroi, variante « isolant à l'extérieur »
Tair_insins	°C	Température de l'air du bureau, variante « isolant à l'intérieur »
Tsi_insins	°C	Temp. de surface intérieure de la paroi, variante « isolant à l'intérieur »
Tso_insins	°C	Temp. de surface extérieure de la paroi, variante « isolant à l'intérieur »
q_pp_si_insout	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux à la surface intérieure de la paroi, cas « isolant à l'ext. »
q_pp_so_insout	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux à la surface extérieure de la paroi, cas « isolant à l'ext. »
q_pp_stored_insout	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux stockée dans la paroi, cas « isolant à l'ext. »
q_pp_si_chk_insout	W m <sup>-2</sup>	Comme q_pp_si_insout mais calculé différemment
q_pp_si_insins	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux à la surface intérieure de la paroi, cas « isolant à l'int. »
q_pp_so_insins	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux à la surface extérieure de la paroi, cas « isolant à l'int. »
q_pp_stored_insins	W m <sup>-2</sup>	Densité de flux stockée dans la paroi, cas « isolant à l'int. »
q_pp_si_chk_insins	W m <sup>-2</sup>	Comme q_pp_si_insins mais calculé différemment

## 6. Annexe 2 : variables de sortie, simulation de la maison (partie 2)

Les variables les plus importantes sont celles en **bleu**.

Variable	Unités	Description
TdbAmb	°C	Température (sèche) ambiante
rhAmb	%	Humidité relative ambiante
vWind	m s <sup>-1</sup>	Vitesse du vent
GHoriz	kJ h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Irradiation solaire horizontale
GSouth	kJ h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Irradiation solaire sur la façade sud
achInf	h <sup>-1</sup>	Taux d'infiltration d'air (en volumes par heure)
TBndFront	°C	Température de contact, mur enterré avant
TBndBack	°C	Température de contact, mur enterré arrière
TBndLeft	°C	Température de contact, mur enterré gauche
TBndRight	°C	Température de contact, mur enterré droit
TBndBottom	°C	Température de contact, dalle du sous-sol
TSetHeatBasement	°C	Température de consigne en chauffage, sous-sol
TSetHeatLiving	°C	Temp. de consigne en chauffage, rez-de-chaussée (espace de vie)
TSetHeatSleeping	°C	Temp. de consigne en chauffage, étage (chambres)
TSetCoolBasement	°C	Température de consigne en climatisation, sous-sol
TSetCoolLiving	°C	Temp. de consigne en climatisation, rez-de-chaussée (espace de vie)
TSetCoolSleeping	°C	Temp. de consigne en climatisation, étage (chambres)
TSetDhwLower	°C	Température de consigne du chauffe-eau (élément du bas)
TSetDhwUpper	°C	Température de consigne du chauffe-eau (élément du haut)
TMains	°C	Température de l'eau (froide) de l'aqueduc
mDotDhw	kg/h	Débit massique d'eau chaude domestique
nOccupants	-	Nombre d'occupants présents dans la maison
fanOnOff	-	Signal On/Off pour le ventilateur récupérateur de chaleur (HRV)
ToutDhwTank	°C	Température de l'eau chaude domestique à la sortie du réservoir
TavgDhwTank	°C	Température moyenne du réservoir d'eau chaude
QAuxDhwUpper	kJ h <sup>-1</sup>	Puissance thermique (et électrique) de l'élément du haut
QAuxDhwLower	kJ h <sup>-1</sup>	Puissance thermique (et électrique) de l'élément du bas
QAuxDhw	kJ h <sup>-1</sup>	Puissance thermique (et électrique) totale du chauffe-eau
QLossDhwTank	kJ h <sup>-1</sup>	Pertes thermiques du chauffe-eau
DhwTankBalError	%	Erreur sur le bilan du réservoir
TupperDhwTank	°C	Température du réservoir au niveau de l'élément du haut
TlowerDhwTank	°C	Température du réservoir au niveau de l'élément du bas
TDhwSupply	°C	Température de l'eau chaude alimentée au bâtiment
QDhwLoad	kJ h <sup>-1</sup>	Énergie utile transmise à l'eau chaude domestique

<b>Variable</b>	<b>Unités</b>	<b>Description</b>
TdbBasement	°C	Température (sèche) dans le sous-sol
TdbLiving	°C	Température (sèche) au rez-de-chaussée
TdbSleeping	°C	Température (sèche) à l'étage
TdbAttic	°C	Température (sèche) dans le grenier (non-chauffé)
rhBasement	%	Humidité relative dans le sous-sol
rhLiving	%	Humidité relative au rez-de-chaussée
rhSleeping	%	Humidité relative à l'étage
rhAttic	%	Humidité relative dans le grenier (non-chauffé)
QsHeatBasement	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage sensible dans le sous-sol
QsHeatLiving	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage sensible au rez-de-chaussée
QsHeatSleeping	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage sensible à l'étage
QsCoolBasement	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation sensible dans le sous-sol
QsCoolLiving	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation sensible au rez-de-chaussée
QsCoolSleeping	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation sensible à l'étage
QlHeatBasement	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage latente dans le sous-sol
QlHeatLiving	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage latente au rez-de-chaussée
QlHeatSleeping	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de chauffage latente à l'étage
QlCoolBasement	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation latente dans le sous-sol
QlCoolLiving	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation latente au rez-de-chaussée
QlCoolSleeping	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance de climatisation latente à l'étage
QcomoFront	$\text{kJ h}^{-1}$	Transfert de chaleur depuis le sol vers le mur enterré, avant
QcomoBack	$\text{kJ h}^{-1}$	Transfert de chaleur depuis le sol vers le mur enterré, arrière
QcomoLeft	$\text{kJ h}^{-1}$	Transfert de chaleur depuis le sol vers le mur enterré, gauche
QcomoRight	$\text{kJ h}^{-1}$	Transfert de chaleur depuis le sol vers le mur enterré, droite
QcomoBottom	$\text{kJ h}^{-1}$	Transfert de chaleur depuis le sol vers le plancher du sous-sol
QHeatLoad	$\text{kJ h}^{-1}$	Besoins en chauffage
QCoolLoad	$\text{kJ h}^{-1}$	Besoins en climatisation
PHeat	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour le chauffage (= besoins)
PCool	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour la climatisation (= besoins/2.5)
PDhw	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour l'eau chaude
PLight	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour l'éclairage
PAppl	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour les appareils
PFan	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique pour la ventilation (HRV)
PTot	$\text{kJ h}^{-1}$	Puissance électrique totale appelée par le bâtiment