

# **Chapitre II**

## **Modélisation**

## II.1 Introduction

La question de l'évaluation des performances énergétiques et environnementales des bâtiments a mené à la réalisation d'un grand nombre d'outils de calculs, qui se répartissent schématiquement selon deux familles : les outils d'analyse de cycle de vie et les outils de simulation énergétique. Certains outils plus vastes, de types progiciels, intègrent une multitude de problématiques comprenant entre-autres, l'énergie et les impacts environnementaux (THIERS 2008).

## II.2 Outils de simulation

### II.2.1 Les outils d'analyse de cycle de vie

Selon (ANALYSE-MANAGEMENT) une meilleure prise en compte des problématiques environnementales passe par une connaissance de plus en plus fine des impacts sur l'environnement et la santé humaine liés à la composition, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des produits. Initialement développée pour les produits industriels, la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (A.C.V.) est aujourd'hui utilisée dans le secteur de la construction. L'étude réalisée par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) dans le cadre du programme ECBCS (Energy Conservation in Building and Community Systems) a comptabilisé plus d'une vingtaine d'outils d'analyse de cycle de vie dédiés spécifiquement au bâtiment (EQUER, BEES, TEAM, ECOPR, EcoQuantum, ELODIE et Athena Environmental Impact Estimator ). Le principe de fonctionnement de ces différents outils reste assez similaire. Les données concernant le bâtiment, ses matériaux constitutifs, et son utilisation sont saisies ou partiellement fournies par un logiciel d'analyse énergétique. Ensuite, à partir d'une base de données d'inventaire, le logiciel calcule les impacts environnementaux engendrés sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Ces résultats concernent généralement une dizaine de catégories d'impacts (réchauffement global, pollutions, génération de déchets, etc.) présentés sous forme graphique (COLOMBERT et *al.* 2011; THIERS 2008).

## **II.2.2 Les outils de simulation énergétique**

Les besoins en termes d'environnement de simulation changent en fonction de l'état d'avancement d'un projet, ce qui explique la grande diversité des outils qui existent pour simuler le comportement énergétique des bâtiments. Il faut en effet disposer d'outils simples pour pouvoir faire rapidement, dès la phase d'esquisse, des choix judicieux qui sont primordiaux pour ne pas aboutir à une proposition qu'il sera par la suite difficile de rendre performante. Dans une phase un peu plus avancée, au niveau de l'avant projet, l'outil de simulation doit permettre d'optimiser l'enveloppe du bâtiment pour réduire ses besoins de chauffage et de rafraîchissement. Par la suite, on doit être capable de donner une estimation des consommations du bâtiment, de dimensionner leurs systèmes etc. On utilise alors des outils pour lesquels un plus grand nombre d'entrées est nécessaire et qui sont donc plus longs à prendre en main mais qui permettent de connaître avec précision le comportement dynamique du bâtiment sur le plan énergétique. Donc Les outils de simulation énergétiques permettent de calculer l'ensemble des besoins énergétiques (TITTELEIN 2008). La plupart des outils de simulation énergétiques du bâtiment qui sont utilisés aujourd'hui ont été répertoriés et décrits par le bureau de l'efficacité énergétique et de l'énergie renouvelable aux Etats-Unis d'Amérique (EERE : Energy Efficiency and Renewable Energy). Deux types se distinguent par leur niveau de complexité (THIERS 2008; TITTELEIN 2008):

### **II.2.2.1 Les outils de simulation simplifiés**

Ces outils s'appuient sur une description sommaire du bâtiment et sur des bilans énergétiques annuels ou mensuels. Ceux-ci sont destinés par exemple au dimensionnement de certains équipements ou à la vérification du respect des réglementations. C'est le cas de la méthode de 3CL-DPE utilisée en France pour l'établissement des diagnostics de performance énergétique (DPE), et PHPP ( pour « Passive House Planning Package » ) utilisé en Allemagne pour la conception et la certification des bâtiments basse consommation. Ces outils permettent d'obtenir rapidement des tendances sur le comportement thermique du bâtiment et ne peuvent évaluer ses consommations que par des règles

simples et statiques (pas de simulation dynamique des systèmes), ce qui les ramène à ignorer certains nombre de phénomènes tels que la variation horaire de divers paramètres (consignes de température, gains solaires, apports internes) ou la description précise de l'enveloppe du logement.

### **II.2.2.2 Les outils de simulation dynamique**

À partir de la description du bâtiment (surface, orientation, volumes...etc.), des charges internes (nombre d'occupants, appareils électroménagers...etc.), de ses équipements (systèmes de chauffages, ventilation et climatisation) et de scénarios de fonctionnement, ces logiciels réalisent le calcul de différentes températures, des besoins de chauffage, de rafraichissement et de la consommation énergétique totale du bâtiment. Le bâtiment y est traité de manière multi-zonale. Les principaux outils de simulation dynamique du bâtiments sont ESP-r, CoDyBa, EnergyPlus, SPARK, TAS, COMFIE et TRNSYS. Parmi l'ensemble des outils identifiés précédemment, la réalisation de ce travail de thèse nécessite l'outil le plus adapté à ses objectifs. En particulier, il devrait permettre la modélisation d'une maison bioclimatique et de son système de chauffage solaire, d'une part, et pouvoir calculer les différents paramètres des performances énergétiques de la maison. Notre choix s'est porté sur le logiciel TRNSYS pour l'évaluation des performances énergétiques de la maison, et par manque de données sur l'étape de la construction de la maison nécessaires à l'analyse du cycle de vie, n a choisit une simple analyse du taux d'émission de CO<sub>2</sub> comme méthode pour l'évaluation des performances environnementales.

### **II.3 Présentation du logiciel TRNSYS**

TRNSYS « TRaNsient SYstem Simulation program » est développé depuis 1975 en collaboration de l'université de Wisconsin (Madison), une entreprise privée de la même ville (TESS), le groupe TransSolar en Allemagne et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) en France. Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques du bâti (emplacement, matériaux de construction utilisés, architecture globale...) mais aussi des systèmes de chauffage ou de climatisation afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques.

Estimations de consommations d'énergie, confort thermique, hygrométrie, etc. sont autant d'éléments considérés. C'est un outil de simulation en régime dynamique multi zones, structuré de manière modulaire, ce qui assure au programme une grande flexibilité et facilité par l'insertion des sous-programmes développés sous Fortran.

La bibliothèque de modèles disponibles est très importante et toujours en cours de développement. Chaque modèle possède sa propre méthode de résolution ce qui fait la force de ce logiciel. Une interface graphique performante (IISIBAT « pour Interface Intelligente de Simulation des BATiments ») permet de visualiser tous les composants d'un système, de réaliser la construction de la simulation et la saisie des données (TITTELEIN 2008; TRNSYS-MODELISATION). Il est l'un des logiciels les plus connus et largement utilisés dans la simulation thermique du bâtiment (MONSEN *et al.* 1981; BRAUN 1990; MEI *et al.* 2003; ARKAR *et al.* 2007; MARSHALL *et al.* 2012; VOLLARO *et al.* 2015; LIN *et al.* 2016)

Ce logiciel informatique, se caractérise par ses trois fonctions qui se résument comme suit :

- Les entrées (inputs): elles concernent toutes les informations à introduire et à stocker selon l'ergonomie du logiciel dans des bibliothèques que le concepteur peut utiliser. Ces entrées englobent l'environnement physique (climat, site), le bâtiment (l'enveloppe), les apports internes (occupants...) et les équipements (Chauffage, Ventilation et Climatisation...)
- Le traitement des données : se fait en fonction d'un modèle de représentation du bâtiment et la demande de l'utilisateur.
- Les sorties (outputs): sont les ensembles des résultats qui peuvent être fournis par le logiciel à l'issue d'une exécution

### II.3.1 Description du modèle de simulation avec le logiciel TRNSYS

Une maison d'habitation individuelle couplée avec un système de chauffage solaire est modélisée dans cette étude (figure II.1). Le système de chauffage solaire comprend un capteur plan relié au réservoir de stockage thermique entièrement mélangé, pour l'eau chaude sanitaire (ECS). Le système de

chauffage solaire est couplé avec la maison par un chauffage par le sol. Les équations de base sur lesquelles repose le logiciel TRNSYS seront présentées selon chaque modèle au fur et à mesure que l'on présente la maison multizones considérée avec ses systèmes de chauffage et rafraîchissement.

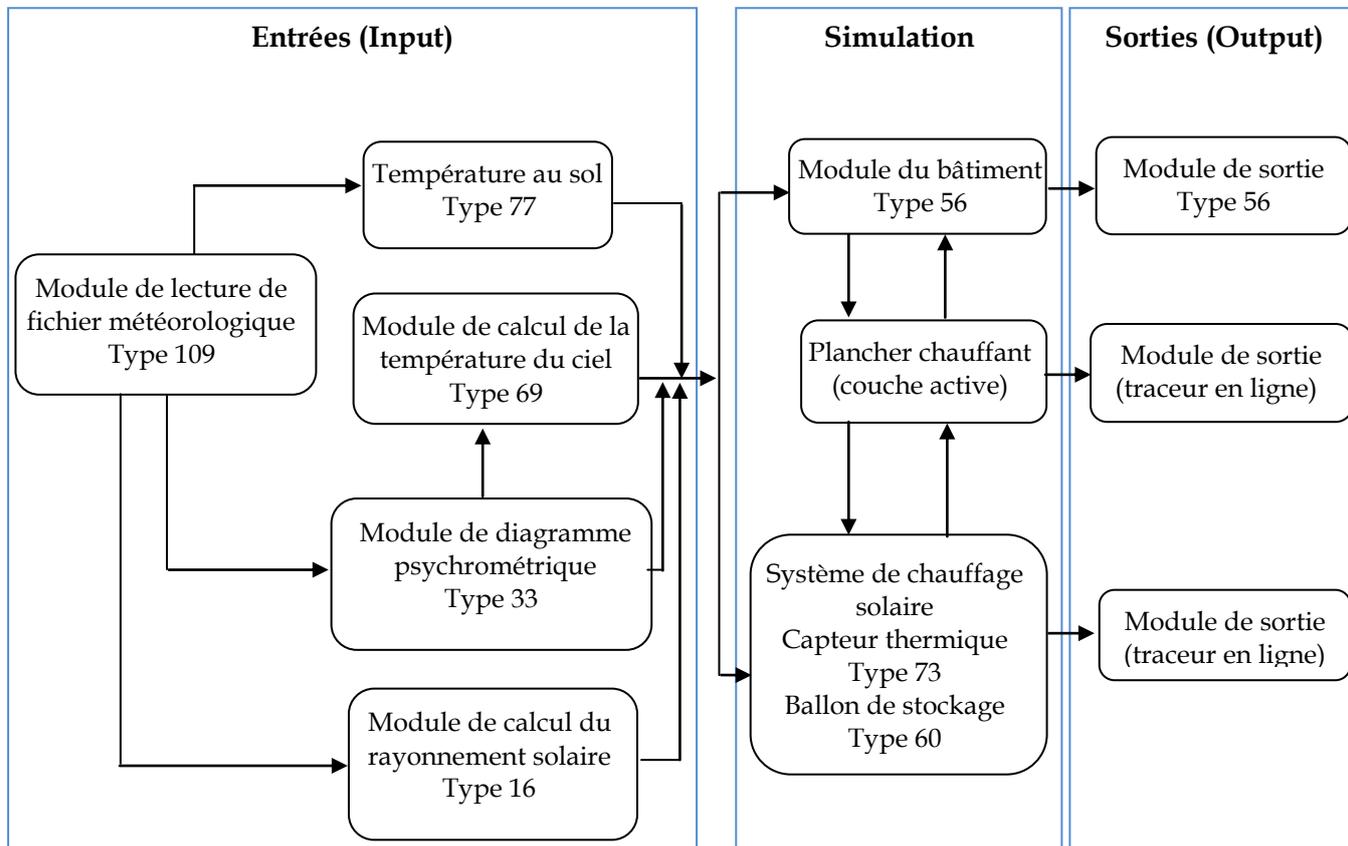


Figure II.1 Processus de simulation par TRNSYS

### II.3.1.1 Modèle de la maison

La maison, avec un système de chauffage solaire, est simulée en utilisant le code de TRNSYS (KLEIN et *al.* 2004) comme un bâtiment multizone (Type 56) ayant un plancher radiant défini comme une couche active du plancher entre le niveau du sol et sous-sol. Comme le montre la figure II.2, les caractéristiques de la maison (orientation, caractéristiques thermiques des composants, etc.), l'infiltration d'air et les gains thermiques internes sont les principales entrées du type 56.

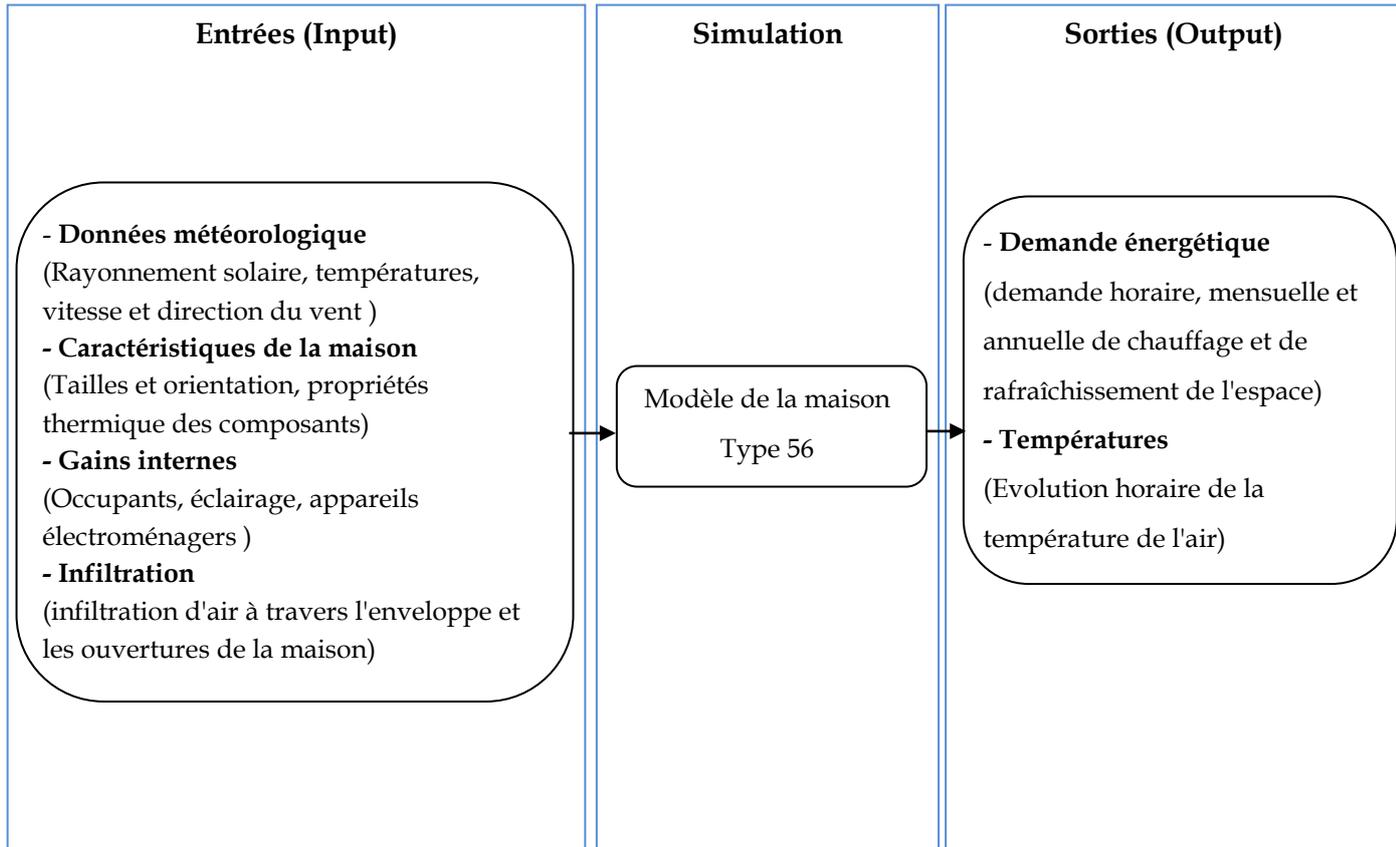


Figure II.2 Entrées et sorties du modèle de la maison

En considérant que le taux de variation de l'énergie interne pour la zone thermique est égal au gain de chaleur net, le bilan énergétique global peut être illustré comme suit:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{gain} + \dot{Q}_{cplg} \quad (II.1)$$

avec:

$$Q_{surf} = h_c \rho_a c_a (T_{s,i} - T_i) \quad (II.2)$$

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} \rho_a c_a (T_o - T_i) \quad (II.3)$$

$$Q_{gain} = h_c \rho_a c_a (T_s - T_i) \quad (II.4)$$

$$Q_{cplg} = \dot{m}_{j \rightarrow i} \rho_a c_a (T_{zone,i} - T_i) \quad (II.5)$$

Dans notre cas, comme la maison est naturellement ventilée, les gains par ventilation du système CVC ( $\dot{Q}_{vent}$ ) sont nuls.

A noter que l'infiltration affecte la charge de climatisation, et la température de l'air intérieur dans la maison. En général, le taux d'infiltration est calculé par la

loi de puissance qui établie une relation entre la chute de pression ( $\Delta P$ ) et le débit volumique ( $Q$ ) arrivant par les ouvertures, selon la relation suivante:

$$Q = \Delta P^n \quad (II.6)$$

La littérature indique que la valeur de l'exposant  $n$  doit être comprise entre 0,5 et 1. Il convient de noter que de grandes ouvertures sont caractérisées par des valeurs très proches de 0,5, tandis que les valeurs proches de 0,65 caractérisent les petites ouvertures sous forme de fissures (SADINENI et al. 2011).

### II.3.1.2 Modèle du capteur thermique

Une plaque plane de Type 73 représente le modèle de capteur solaire théorique adopté pour modéliser les performances des capteurs solaires. Les principaux paramètres d'entrée et de sortie du capteur solaire thermique sont illustrés dans la figure II.3.

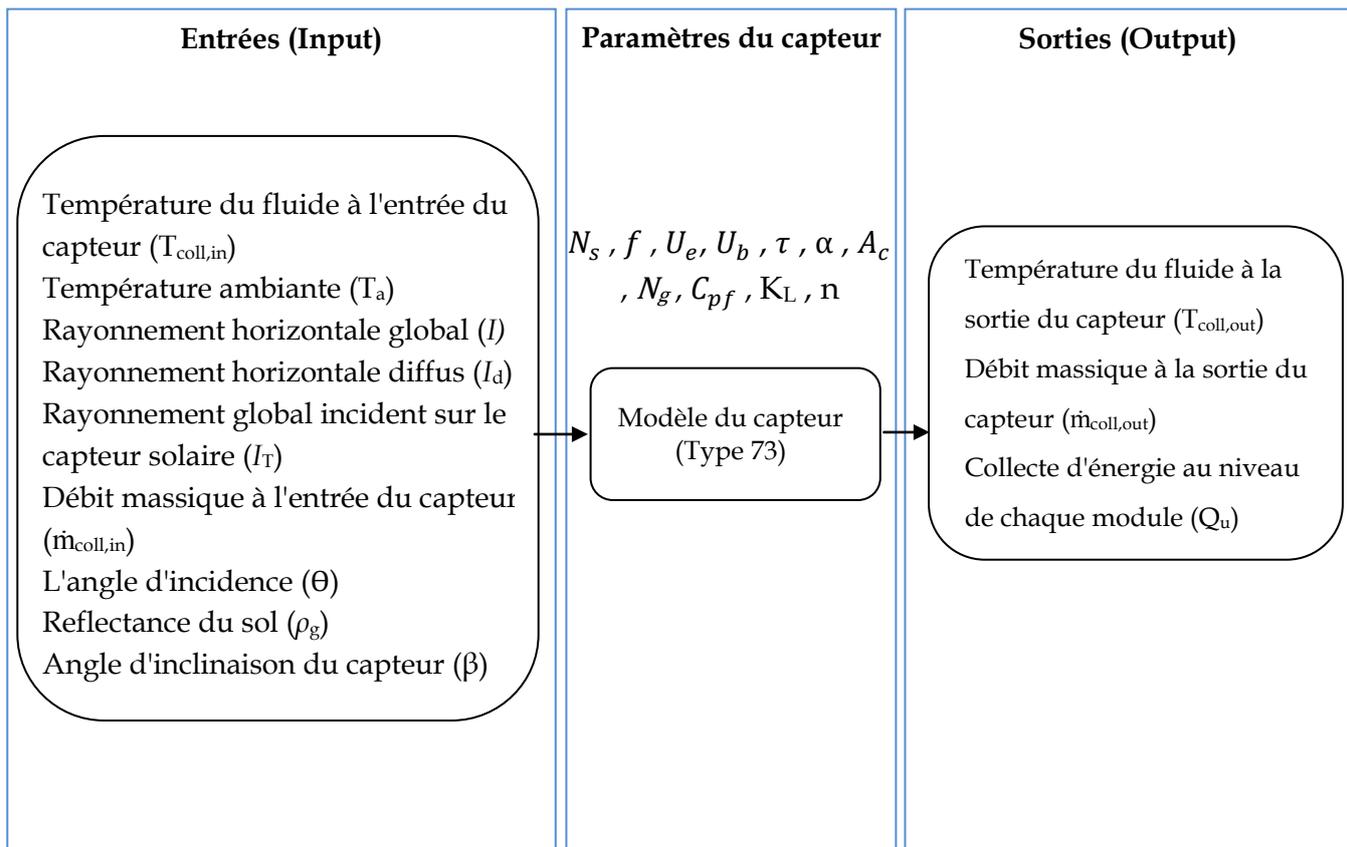


Figure II.3 Entrées et sorties du capteur thermique

Les performances thermiques du champ de capteurs sont déterminées par le nombre de modules en série et les caractéristiques de chaque module. La collecte d'énergie de chaque module dans un réseau de modules  $N_s$  (en série)

est modélisée selon l'équation Hottel-Whillier suivante (DUFFIE & BECKMAN 1980):

$$Q_u = \frac{A_c}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} F_{R,j} [I_T(\tau\alpha) - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a)] \quad (\text{II.7})$$

$$F_{R,j} = \frac{N_s \dot{m}_f C_{pf}}{A_c N_{L,j}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{f U_{L,j} A_c}{N_s \dot{m}_f C_{pf}}\right) \right) \quad (\text{II.8})$$

### II.3.1.3 Modèle du réservoir de stockage

Le réservoir de stockage entièrement mélangé, avec des échangeurs de chaleur en serpentin immergés, est modélisé par le type 60 de la bibliothèque TRNSYS standard.

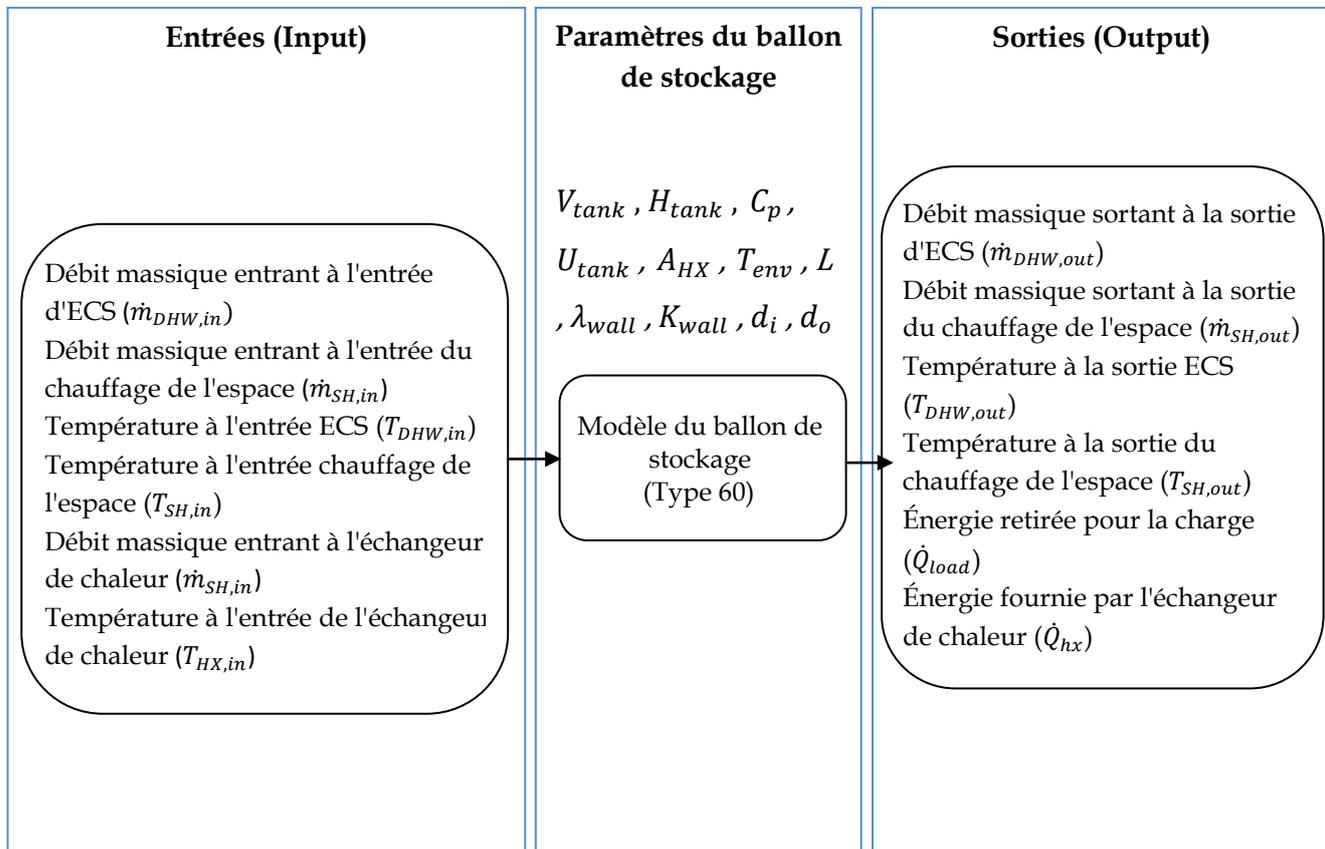


Figure II.4 Entrées et sorties du ballon de stockage

Le bilan énergétique de la cuve de stockage entièrement mélangé s'exprime comme suit :

$$\dot{Q}_{acum} = \dot{Q}_{hx} - \dot{Q}_{load} - \dot{Q}_{loss} \quad (\text{II.9})$$

avec:

$$\dot{Q}_{acum} = \rho C_p V_{tank} \frac{T_{tank-n} - T_{tank}}{\Delta t} \quad (\text{II.10})$$

$$\dot{Q}_{HX} = UA_{HX} \times (LMDT) \quad (II.11)$$

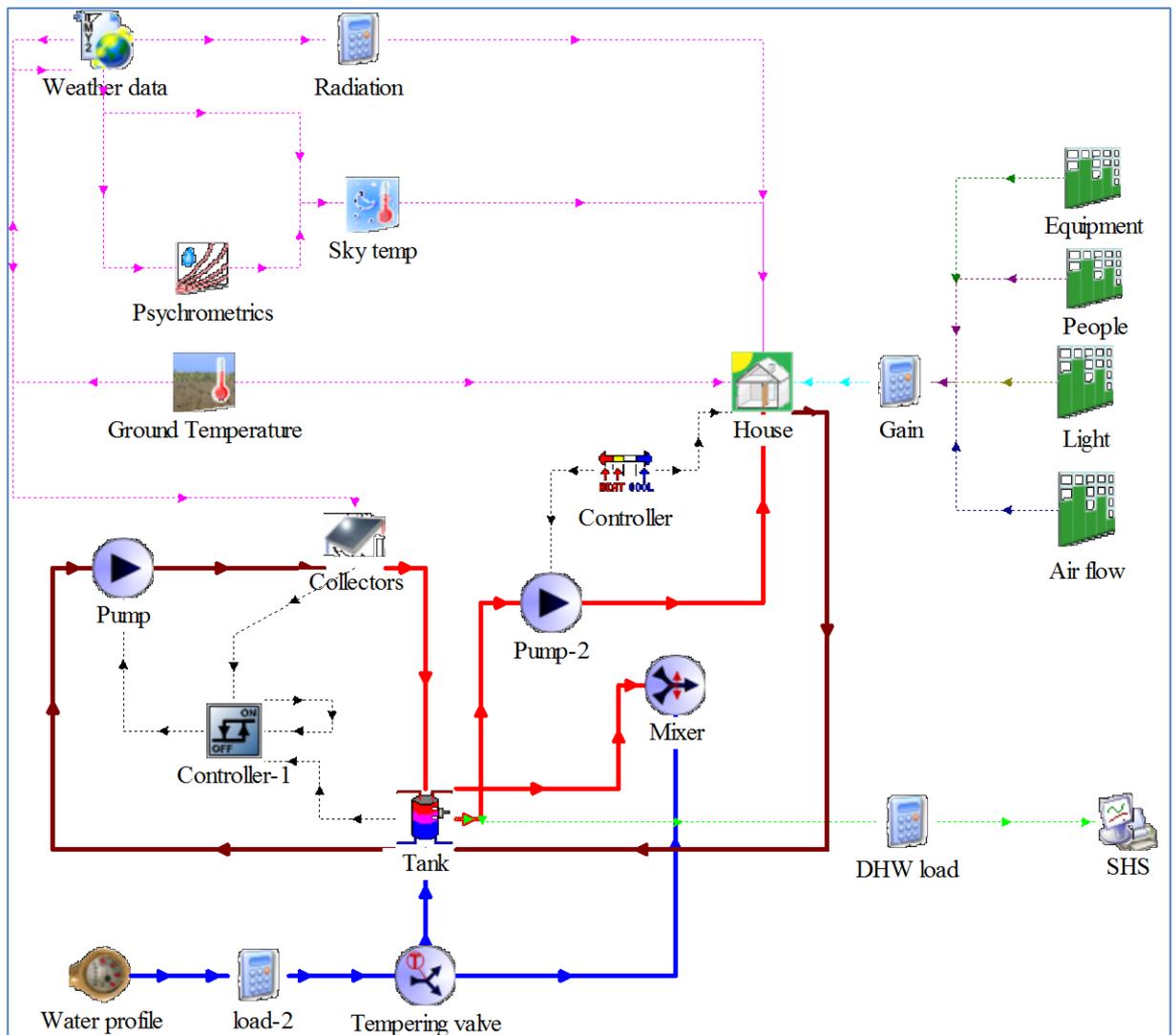
$$\dot{Q}_{load} = \dot{m}_{DHW} C_p (T_{DHW,in} - T_{DHW,out}) + \dot{m}_{SH} C_p (T_{SH,in} - T_{SH,out}) \quad (II.12)$$

$$\dot{Q}_{loss} = (U_{tank} + \Delta U) \times A_{tank} \times (T_{env} - T_{tank}) \quad (II.13)$$

En remplaçant chaque terme de l'équation (II.9), la variation de la température du réservoir de stockage selon un pas de temps est donnée par:

$$T_{tank-n} = T_{tank} + \dot{m}_{DHW} C_p (T_{DHW,in} - T_{DHW,out}) + \dot{m}_{SH} C_p (T_{SH,in} - T_{SH,out}) + UA_{HX} \times (LMDT) + (U_{tank} + \Delta U) \times A_{tank} \times (T_{env} - T_{tank}) \quad (II.14)$$

La modélisation d'une maison multizones, ainsi que son système de chauffage composé d'un capteur thermique relié à un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire et à un plancher chauffant permettant le chauffage de la maison, permet d'avoir un aperçu maison avec système de chauffage solaire dans le studio TRNSYS (figure II.5).



**Figure II.5 Aperçu d'une maison avec système de chauffage solaire dans le studio TRNSYS**

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre un modèle dynamique d'une maison multizone couplée à un système de chauffage solaire sous le logiciel TRNSYS a été présenté. Nous avons commencé par une description mathématique d'une maison multizone intégrant un système de chauffage au sol. Ensuite, on a modélisé un capteur plat et un réservoir de stockage, ainsi qu'un modèle TRNSYS du système de chauffage solaire. Le système de chauffage est couplé à la construction à travers le système de plancher chauffant. Le modèle développé dans ce chapitre sera

utilisé dans le chapitre suivant pour l'évaluation des performances énergétique d'une maison bioclimatique pilote.

(ARKAR *et al.* 2007)

ARKAR C., VIDRIH B., MEDVED S., Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, N° 1, pp. 134-143, 2007.

(BRAUN 1990)

BRAUN J. E., Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, *ASHRAE transactions*, Vol. 96, N° 2, pp. 876-888, 1990.

(COLOMBERT *et al.* 2011)

COLOMBERT M., PEUPORTIER B., de CHASTENET C., DIAB Y., Gobin C, HERFRAY G, JARRIN T, TARDIEU C., TROCME M., Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France), *Environnement Urbain/ Urban Environment*, Vol. 5, pp. c1-c21, 2011.

(THIERS 2008)

THIERS S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.

(DUFFIE & BECKMAN 1980)

DUFFIE J.A, BECKMAN W.A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, New York, 1980.

(KLEIN *et al.* 2004)

KLEIN S.A., BECKMAN W.A., MITCHELL J.W., DUFFIE J.A., FREEMAN T.L., *et al.*, TRNSYS 16–A Transient system simulation program, user manual, Solar Energy Laboratory, Université de Wisconsin-Madison, 2004.

(LIN *et al.* 2016)

LIN Y. H., TSAI K. T., LIN M. D., YANG M. D. (2016). Design optimization of office building envelope configurations for energy conservation, *Applied Energy*, VOL. 171, pp. 336-346, 2016.

(MARSHALL *et al.* 2012)

MARSHALL L., Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 289-300, 2012.

(MEI *et al.* 2003)

Mei L., Infield D., Eicker U., Fux V., Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade, *Energy and buildings*, Vol. 35, N°6, pp. 605-617, 2003.

(MONSEN *et al.* 1981)

MONSEN W. A., KLEIN S. A., BECKMAN W. A., Prediction of direct gain solar heating system performance, *Solar Energy*, Vol. 27, N° 2, pp. 143-147, 1981.

(SADINENI *et al.* 2011)

SADINENI S.B., MADALA S., BOEHM R.F., Passive building energy savings: a review of building envelope components, *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 15, pp. 3617-3631, 2011.

(THIERS 2008)

THIERS S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.

(TITTELEIN 2008)

TITTELEIN P., Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation, thèse de doctorat, Sciences de l'ingénierie, Université de Savoie, 2008.

(TRNSYS-MODELISATION)

TRNSYS - une percée dans la modélisation thermique de bâtiments, CSTB le futur en construction.

URL: <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/edition-du-14-decembre-2010/trnsys-17-une-percee-dans-la-modelisation-thermique-de-batiments.html>

(VOLLARO *et al.* 2015)

VOLLARO R. D. L., GUATTARI C., EVANGELISTI L., BATTISTA G.,  
CARNIELO E., GORI P., Building energy performance analysis: A case  
study, *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 87-94, 2015.