

---

# Rapport Simulation et Optimisation Concept - MaxLean -

---

**Un rapport du programme IEA Solar Heating and Cooling -  
Task 32**

**Concept avancé de stockage pour des bâtiments solaires  
et à basse consommation**

**Rapport du sous-groupe D**

**Date: Mars 2008**

Auteurs:  
Robert Haberl  
Peter Vogelsanger  
With contributions by:  
Thomas Letz



# **Simulation et Optimisation du système MaxLean**

par

Robert Haberl  
Peter Vogelsanger

SPF Rapperswil, Switzerland

Avec des contributions de : Thomas Letz, INES, France

**Un rapport technique, partie du sous-groupe D**

Institut für Solartechnik SPF  
University of Applied Sciences of Rapperswil  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil

*Page non traduite***Contents**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Abstract.....   | 4  |
| 2     | General description of MaxLean system.....  | 6  |
| 2.1   | Main features.....  | 6  |
| 2.2   | Requirements for future solar combisystems in one-family houses and the MaxLean system..... | 6  |
| 2.3   | Modularity and material use.....  | 7  |
| 2.4   | Auxiliary heating and technical integration.....  | 8  |
| 2.5   | Charging and removing heat from the storage tank of the MaxLean system.....                 | 8  |
| 2.5.1 | The collector loop.....   | 8  |
| 2.5.2 | The auxiliary loop.....   | 9  |
| 2.5.3 | The space heating loop.....   | 10 |
| 2.5.4 | Hot water preparation.....  | 11 |
| 3     | Modelling of the system.....  | 13 |
| 3.1   | TRNSYS model.....   | 13 |
| 3.2   | Definition of the components included in the system and standard inputs data.....           | 13 |
| 3.2.1 | General settings.....   | 13 |
| 3.2.2 | Collector loop.....   | 13 |
| 3.2.3 | Store.....  | 14 |
| 3.2.4 | Auxiliary.....  | 15 |
| 3.2.5 | Building.....   | 16 |
| 3.2.6 | Heat distribution.....  | 16 |
| 3.2.7 | Control strategy.....   | 17 |
| 3.2.8 | Draw-off loop.....  | 17 |
| 4     | Simulations for testing the library and the accuracy.....                                   | 18 |
| 5     | Sensitivity analysis.....   | 19 |
| 6     | Results.....  | 28 |
| 6.1   | Effect of specific features.....  | 28 |
| 6.2   | Economic optimization of system dimensions.....   | 29 |
| 6.2.1 | Objective function.....   | 29 |
| 6.2.2 | Resulting dimension.....  | 33 |
| 7     | References.....   | 37 |
| 8     | Appendix 1: Analysis using FSC.....   | 38 |
| 9     | Appendix 2: Description of components specific to this system.....                          | 71 |
| 9.1   | Type 290 : Space heating pump controller.....   | 71 |

## 1 Abstract

Ce rapport décrit l'examen théorique d'un système solaire combiné de conception poussée. Les simulations ont été effectuées dans le cadre de la Tâche 32, des concepts avancés de stockage pour les bâtiments de l'énergie solaire et à basse consommation et du programme de l'AIE sur le chauffage solaire le refroidissement. Le concept du système étudié est approprié pour une réduction profonde des coûts : Il peut y avoir un réservoir léger, non pressurisé, avec quelques composants et des contrôles simples. Il peut facilement être intégré dans le système de chauffage d'une maison existante avec chauffage central à circulation d'eau. Il est appelé le système MaxLean parce que les auteurs estiment qu'il est aussi maigre qu'un système solaire combiné puisse être obtenu en termes de simplicité et de l'utilisation des matières. La Fig. 1 (page 6) montre le schéma hydraulique du système MaxLean. Ses caractéristiques distinctives sont les suivantes:

- Un circuit en auto-vidange des capteurs solaires. Un faible débit a été utilisé. On a supposé que le fluide caloporteur est de l'eau et le circuit des capteurs n'est pas sous pression sans débit (en raison d'un réservoir sans pression qui remplit le rôle de la réserve de vidange). Par conséquent le fonctionnement des capteurs est limitée à des températures inférieures à 100 ° C. Il est supposé que la pression dans les capteurs est montée et maintenue à plus de 1 bar pendant le fonctionnement du circuit des capteurs (au moyen d'une pompe adéquate et un réducteur de pression à la fin de la ligne d'alimentation du capteur) pour éviter la formation de vapeur et la cavitation. Une stratification est supposé parfaite à l'entrée du circuit solaire dans le réservoir.

- Une intégration simple de la chaudière d'appoint dans le système. Le chauffage d'appoint (une chaudière à condensation gaz par hypothèse) est directement relié à la citerne. La température d'alimentation est invariable (63 ° C). Le pilotage de la chaudière est déterminé en mesurant la température à un niveau approprié dans le réservoir. Cette connexion et l'interaction de la chaudière avec le réservoir combiné est bénéfique car elle est simple à installer et à configurer. Il est désavantageux parce que - dans cette configuration la plus simple - des gains possibles dues à la modulation de la chaudière sont négligés. (une régulation plus soignée de la chaudière pourrait accroître l'efficacité de la chaudière en optimisant sa modulation. Ceci n'a pas été simulé.)

- Une connexion directe de la boucle de chauffage de l'espace au réservoir. Il y a un mitigeur thermostatique avec une température de consigne fixe (50 ° C) et une variation du taux de débit (vers les radiateurs ou le chauffage par le sol) afin de moduler le chauffage des locaux (DFFC, flux d'alimentation directe contrôlée) au lieu de la modulation courante de la température du fluide circulant avec une vanne de mélange et une variation du réglage de la température selon une courbe de chauffage. Une stratification parfaite a été supposée à l'entrée du chauffage de retour au réservoir.

La performance énergétique du système MaxLean a été comparée à un «système solaire de référence» qui est prévu pour représenter l'état de l'art de la technique des systèmes solaires combinés. Le système de référence a été calculée à partir du système de la base commune de travail de la Task 32 , décrit en détail dans « the reference heating system, the "template solar system" »[1]. La surface de capteurs a été fixée à 20 m<sup>2</sup> et le volume du réservoir à 800 l : Quelques modifications ont été apportées au modèle d'origine du système solaire pour qu'il serve de point de départ pour l'étude de simulation : L'efficacité de l'échangeur de chaleur pour eau chaude de chauffage a été réduite à une valeur typique et certains critères importants (les positions de port de retour de chauffage, la puissance de la chaudière, la température de consigne de la chaudière d'appoint, la position des capteurs de température dans le réservoir, le débit spécifique dans le circuit des capteurs ; la bande morte de la boucle de contrôle solaire), ont été optimisés pour atteindre le meilleur rendement énergétique pour une charge particulière et le climat ( 60kWh / A par m<sup>2</sup> de surface habitable de la maison [1], la consommation normalisée d'eau chaude domestique de 3000 kWh / an; Zürich).

Le système de simulation de référence a été ensuite transformé par étapes vers le concept du système MaxLean. Par la suite, le système MaxLean a été optimisé utilisant la même procédure et les critères qui étaient auparavant utilisées pour optimiser le système solaire de référence. Les mêmes caractéristiques ont été optimisées et la même charge et le climat ont été utilisés pour réaliser l'optimisation.

Le résultat des simulations montrent que le concept de système MaxLean réduit la consommation d'énergie d'appoint (gaz naturel) à partir de 8544 kWh (référence optimisée) à 8162 kWh /an (MaxLean optimisé). La réduction de la consommation d'énergie est de 382 kWh /an, soit 4,5%). Près de la moitié de ces économies (170 kWh /a, 2%) sont dues à la boucle de chauffage avec la température à débit fixe, et le contrôle de flux (DFFC). L'étude de la simulation confirme les résultats des travaux antérieurs [9]. Elle révèle qu'une simplification en profondeur des systèmes solaires combinés est non seulement une opportunité de réduction importante des coûts, mais peut aussi améliorer considérablement le rendement énergétique solaire. En outre, une optimisation du volume de stockage et la surface de capteurs basée sur des critères économiques et écologiques est explorée. La méthode appliquée et les résultats obtenus sont décrits.

## 2 Description générale du système MaxLean

### 2.1 Fonctions principales

Le système dit MaxLean est un système théorique. Les données et les résultats présentés sont basés sur des hypothèses et des simulations. Les résultats sont entièrement dépendants des hypothèses (par exemple, l'épaisseur et la conductivité de l'isolant du réservoir). Le système simulé pourrait être construit avec des composants facilement disponibles sur le marché (à l'exception de certaines fonctions de régulation spécifique, qu'il serait facile de mettre en œuvre). Même si plusieurs systèmes solaires combinés intégrant des fonctions du concept de système MaxLean<sup>1</sup> sont disponibles sur le marché, aucune d'entre elles ne comprend toutes les caractéristiques du concept MaxLean. Ces caractéristiques sont décrites ci-dessous. Dans le chapitre 3.2.1 sont décrits les aspects généraux. Dans les chapitres 3.2.2 - 3.2.8, les caractéristiques de chaque boucle de chargement et de déchargement sont expliqués. Les paramètres choisis sont également énumérés dans le chapitre 3.2.1.

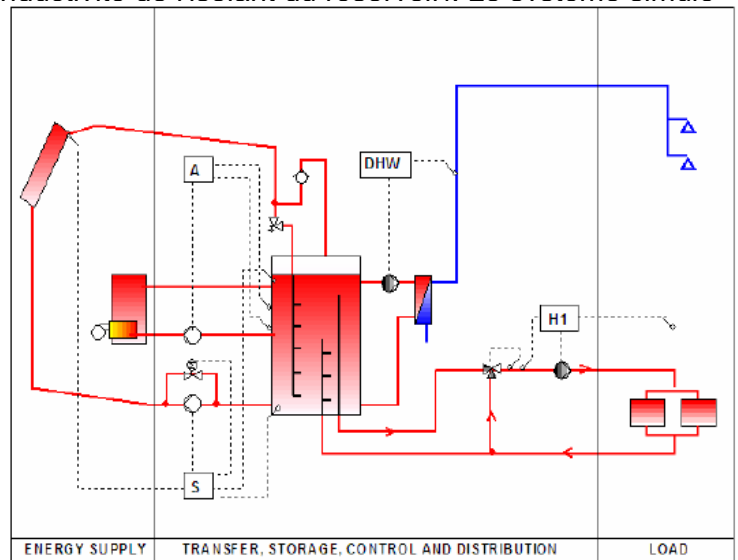


Figure 1: Schéma hydraulique du système MaxLean

### 2.2 Exigences pour les systèmes solaires combinés dans les maisons particulières et le système MaxLean

Les systèmes combinés solaires les plus courants sont relativement petits. NEGST [2] indique que les tailles typiques sont de 5 m<sup>2</sup> (aux Pays-Bas) et 18 m<sup>2</sup> (en Autriche, respectivement 20 m<sup>2</sup> pour les systèmes spéciaux norvégiens). Une étude d'optimisation séparée, résumée dans le chapitre 6.2 et décrite en détail dans la thèse de diplôme « Simulations des concepts de stockage innovants » [3] a montré une taille optimale de système pour le cas de base utilisé dans cette étude<sup>2</sup> de seulement 0,7 m<sup>3</sup> environ de réservoir et de 10 m<sup>2</sup> de capteurs solaires. Si l'énergie solaire thermique doit jouer un rôle important dans les économies d'énergie ou pour des fractions d'énergie solaire importante (plus de 50%) comme le suggère le "Solar Thermal Vision 2030" [4], de grands systèmes avec une capacité de stockage élevée sont nécessaires. Cela implique des surfaces de collecte importantes. Avec l'efficacité énergétique grandissante des bâtiments, l'énergie solaire couvrira toutefois un besoin thermique relativement faible et les gains spécifiques du système (l'énergie solaire utilisée par unité de taille) devient relativement faible. Par conséquent, la quantité de matière utilisée doit être contenue afin de limiter le coût, l'énergie intrinsèque implicite et l'impact indirect sur l'environnement causés par l'utilisation des matières. Le concept étudié dans cette étude est appelé le système MaxLean, parce que les composants et le matériel utilisé est réduit autant que (probablement) possible. Cette section explique que le concept s'adapte parfaitement aux exigences

<sup>1</sup> Les systèmes proposés comme SolarPur par Consolar ([www.consolar.de](http://www.consolar.de)), Solaris par ROTEX ([www.rotex.de](http://www.rotex.de)) et le concept Solarnor ([www.solarnor.com](http://www.solarnor.com)) ont tous des réservoirs non pressurisés et une boucle de vidange collecteur qui est directement connectée au réservoir de stockage. Le fluide caloporteur dans le circuit des capteurs solaires est également le support de stockage de la chaleur. Le réservoir a également la fonction de réceptacle de la vidange. Dans le cas du système Solarnor, le chauffage des locaux (généralement par un plancher chauffant) est directement relié à la réserve. En outre, si la chaudière est adaptée, elle est reliée directement au réservoir, sans échangeur de chaleur. Les réservoirs de Rotex et Consolar sont fabriqués en matière synthétique, le réservoir du système Solarnor est de conception plus classique en acier inoxydable.

<sup>2</sup> Lieu : Zürich, besoins spécifiques annuels de chaleur : 60 kWh/m<sup>2</sup>; besoins annuels de chauffage : 8485 kWh

de la future utilisation de l'énergie solaire thermique dans les maisons. Plusieurs conséquences résultent de l'hypothèse de rendements relativement faibles spécifiques solaire :

- Dans les applications futures, la surface de capteurs par installation est susceptible d'être importante, avec les conséquences suivantes :
  - L'investissement total pour l'installation du circuit des capteurs est relativement importante. En conséquence, l'investissement et les contraintes spécifiques liées à la technologie de vidange sont moins rédhibitoires.
  - La durée de stagnation du circuit des capteurs (lié à l'arrêt de la collecte de l'énergie solaire, si le réservoir est entièrement chargée) est conséquente, qui appelle à une technologie qui permet d'éviter en toute sécurité les problèmes de durabilité provoquée par la stagnation.
  - Si des fluides séparés sont utilisés pour la collecte de la chaleur et stockage de la chaleur, l'échangeur de la boucle solaire thermique doit être de grande capacité pour s'adapter à la surface importante de capteurs. L'avantage de sa suppression est plus significatif.

Les phénomènes mentionnés ci-dessus plaident en faveur de la technologie de vidange pour le circuit des capteurs solaires. Le concept du système MaxLean se dispense de l'échangeur de chaleur dans la boucle solaire ou dans le circuit de chauffage. L'un des aspects essentiel du système MaxLean est de réduire l'utilisation des matières. Le réservoir lui-même est l'élément déterminant à cet égard. Ceci est expliqué dans la section suivante.

### **2.3 La modularité et l'utilisation des matières**

Du fait que le medium de stockage est en quantité importante, celui-ci doit être peu coûteux et écologique. Le coeur du système MaxLean est un simple réservoir d'eau qui peut être non pressurisé. Par conséquent, il peut comporter des parois minces ou des parois planes. Les parois peuvent être faites en matière plastique qui, en raison de la quantité moindre de matériel nécessaire, ne se doit pas d'être bon marché. Elles peuvent également être en matériau durable comme l'acier inoxydable. Ses parois étant potentiellement être planes, le réservoir est particulièrement bien adapté pour l'isolation avec des panneaux sous vide. Si le réservoir est non-pressurisé, il peut être ventilé ou fermé. S'il est fermé, il devra être prévu pour permettre l'expansion de l'eau induite par variation de la température (en plus de l'air ou du gaz pour la fonction de vidange). Même si un réservoir non pressurisé semble être la solution logique, aucun problème technique ne s'oppose à l'utilisation d'un réservoir sous pression à la place. Un compromis raisonnable pourrait être un réservoir qui est fermé et accepte d'être modérément sous pression. Une autre possibilité à considérer est un réservoir fermé non pressurisé, et la dilatation est absorbée par une simple vessie en communication hydraulique comme un sac imperméable souple. La vessie "flexible" peut être reliée à la partie supérieure du réservoir et de contenir de l'air ou de gaz uniquement. Ou il pourrait être relié à la partie inférieure du réservoir (mais au dessus du niveau de l'eau). Il pourrait également être situé nettement au-dessus du réservoir afin de mettre le réservoir sous une pression modérée, mais clairement prédéfinie.

- Pour s'adapter à la grande variété des situations provoquées par la variété de volumes à chauffer, des climats et des budgets, et d'atteindre des quantités de production raisonnable, le concept du système est bien adapté à une conception modulaire :
  - Le concept MaxLean est basé sur un concept de simple réservoir et de composants distincts à sa périphérie qui sont connectés à la réserve par des circuits hydrauliques indépendants, comme par exemple la chaudière. Il n'y a pas d'échangeurs de chaleur intégrés dans le réservoir (à l'exception, peut-être, du chauffage de l'eau chaude sanitaire, qui pourrait être réalisé par l'une des méthodes conventionnelles de ballons solaires combinés).
  - Le réservoir étant peu coûteux, on peut en installer plusieurs connectés en parallèle pour adapter la capacité de stockage aux conditions et besoins spécifiques.
  - Si le réservoir de stockage est non-pressurisé, il peut être de forme rectangulaire avec des parois planes. Plusieurs réservoirs peuvent être placés côte à côte. Ils pourraient être isolés ensemble.
  - Si le réservoir a des parois minces, le réservoir est léger et facile à transporter pour l'installer.
- Avec un concept de stockage écologique et économique adapté aux taux élevés de couverture solaire, le système MaxLean pourrait combler le fossé entre les petits systèmes solaires combinés

habituels dans les maisons individuelles et les grands systèmes solaires combinés collectifs avec stockage saisonnier.

## **2.4 Chauffage d'appoint et techniques d'intégration**

En dépit des scénarios optimistes pour l'avenir sur l'utilisation de l'énergie solaire thermique, il est permis de supposer qu'à moyen terme, les fractions solaires approchent rarement les 100%. Par conséquent, les systèmes solaires combinés doivent être bien adaptés à l'intégration et l'interaction avec un chauffage d'appoint. Les types de chauffage d'appoint du système qui sont bien adaptés pour être combinés avec sont :

- Les pompes à chaleur à leurs difficultés pour atteindre les températures nécessaires à la production d'eau chaude: En combinaison avec le concept MaxLean, les pompes à chaleur peuvent atteindre une température suffisamment élevée de sortie (pour la préparation d'eau chaude sanitaire), car il y a un transfert direct, sans étage d'échange supplémentaire. En outre, une élévation à haute température implique des températures de sortie élevées. Pour réaliser cette caractéristique importante, le débit de la chaudière d'appoint doit être adapté pour chauffer l'eau à la température souhaitée en un cycle. Cela est relativement facile à atteindre si la boucle auxiliaire est totalement indépendante du chauffage et de l'eau chaude. En collaboration avec la stratification élevée, la température moyenne de la boucle auxiliaire reste faible pour un rendement élevé.
- Les chaudières à condensation qui exigent une faible température de retour pour une grande efficacité : les températures de retour basses sont possibles avec une bonne stratification dans le réservoir. Comme dans le cas des pompes à chaleur, il est important de pouvoir ajuster le débit dans la boucle auxiliaire.
- Les chaudières à bois qui exigent une capacité de stockage suffisante : une certaine capacité de stockage est également bénéfique pour chaudières à granulés et autres grosses chaudières. Elle réduit le nombre de cycles de marche-arrêt, ce qui augmente l'efficacité de la chaudière et réduit ses émissions.
- Toute chaudière auxiliaire existante : dans de nombreux cas, un dispositif de chauffage existant reste en place lorsque le chauffage solaire est installé. Le concept du système devrait permettre une intégration facile de pratiquement n'importe quelle chaudière existante avec le système d'énergie solaire. Le raccordement hydraulique doit être simple et clair. Le contrôle de la chaudière d'appoint et de la stratégie de contrôle (nouveau) du chauffage d'appoint et de son (ancien) contrôleur doit être aussi simple.

Dans les sections suivantes les principes de chaque circuit de charge et de décharge de l'énergie sont décrits. Il est expliqué comment le système MaxLean répond aux exigences décrites ci-dessus.

## **2.5 Charge et prélèvement de la chaleur du réservoir de stockage du système MaxLean**

### **2.5.1 La boucle solaire**

Le circuit des capteurs solaires est directement connecté au réservoir de stockage, de telle sorte que le fluide dans le circuit des capteurs peut être de l'eau. Lorsque le circuit des capteurs n'est pas en fonctionnement, l'eau s'écoule dans le réservoir de stockage. La prise en glace est évitée, mais les tuyaux doivent être installés avec une légère inclinaison. (Une bonne description de la technologie de vidange est donnée par Huib Visser et Markus Peter: "Solar heating systems for houses, a design handbook for solar combisystems" [5]. Il n'est pas nécessaire de prévoir un échangeur de chaleur solaire et le réservoir lui-même est également la réserve "drainback". La pompe du circuit solaire remplit le système chaque fois qu'elle est active. Si la hauteur du système (la différence d'altitude entre le réservoir et le point le plus haut de la boucle solaire) est élevé, la pression de refoulement de la pompe doit être au moins aussi élevé, éventuellement grâce à l'utilisation d'une pompe volumétrique. Dans ce cas, il doit y avoir une vanne de dérivation à travers la pompe comme indiqué dans la figure 1 pour vidanger les capteurs. l'air du haut de la cuve entre dans la ligne d'alimentation par l'intermédiaire du clapet anti-retour représenté au-dessus du

réservoir sur la figure 1. A la place de la valve, un tuyau réhaussé pourrait être utilisé comme cela a été démontré dans «Installations solaires combinés pour villas : optimisation eau chaude, chauffage et climatisation» [6].

Dans les simulations, il est supposé un débit constant dans le circuit des capteurs solaires. Si le réservoir est non pressurisé, le fonctionnement de la pompe doit cesser si la température du fluide dans le réservoir est proche de 100 ° C. Cette limite a été respectée dans les simulations. En pratique, un réducteur de pression doit maintenir la pression fournie par la pompe dans le circuit des capteurs solaires. De cette façon, la pression dans le circuit des capteurs solaires est au-dessus du point d'ébullition pendant le fonctionnement de la pompe, même si les capteurs sont situés au-dessus du réservoir. Dans la pratique, la soupape de maintien de la pression pourrait être un robinet thermostatique pour réduire la consommation électrique de la pompe. Dans les simulations, on a supposé que la consommation électrique de la pompe du circuit solaire est la même que dans le système solaire de référence. Cela devrait être pris en compte dans l'interprétation des résultats de la simulation. Toutefois, la consommation supposée pour la pompe du système MaxLean est réaliste. En outre, il est supposé que le flux d'entrée entre le réservoir à travers un dispositif de stratification qui dirige parfaitement l'eau entrant au niveau dans le réservoir ayant la même température. Dans une étude expérimentale un dispositif de stratification spécialement conçu et peu coûteux a été étudié pour une utilisation dans le système MaxLean. Le dispositif consiste simplement en des plaques parallèles avec un espacement approprié. Ce dispositif est particulièrement adapté si le débit à travers l'orifice d'entrée est faible. Si au moins l'un des parois du réservoir est plate, celle-ci pourrait agir comme une des plaques. Les expériences sont décrites dans une présentation qui comprend des films [7] et un rapport technique de la Tâche 32 [8].

### 2.5.2 La boucle d'appoint

La boucle de chauffage d'appoint est connectée séparément et directement au réservoir. Elle est hydrauliquement indépendante de toutes les autres connexions et de tous les autres circuits. Elle peut être commandée séparément, ce qui est une caractéristique importante pour l'intégration pratique du système (voir également l'explication donnée dans le chapitre 1.4 sur le chauffage auxiliaire et l'intégration technique, ci-dessus). Pour cette raison, la stratégie de contrôle de la chaudière d'appoint peut être choisie pour répondre au mieux aux particularités de la chaudière et de la situation. Dans les simulations, on a supposé que le chauffage d'appoint - une chaudière à gaz à condensation - élève la température de 10 K en passant par la chaudière. Cette stratégie est celle utilisée dans le modèle du système solaire de la tâche 32. C'est loin d'être la meilleure stratégie possible pour une chaudière à gaz à condensation. Dans une étude précédente [9], une meilleure stratégie avait été étudiée par simulation : la consigne de température du chauffage d'appoint est invariable. Lorsque le système de chauffage est allumé, il fournit l'eau à une température de consigne au sommet du réservoir. Cette température devrait être suffisante pour la préparation de l'eau chaude sanitaire. Cette stratégie de contrôle est relativement facile à mettre en œuvre si un nouveau système combiné solaire doit être combiné avec un chauffage auxiliaire existant. Dans les simulations présentées dans ce rapport, le modèle retenu pour la chaudière gaz à condensation est celui recommandé pour les simulations de la tâche 32 de l'AIE SH & C. En ce qui concerne les critères de contrôle pour l'allumage et l'extinction de la chaudière d'appoint, il y a une multitude de possibilités :

- Dans les simulations du système MaxLean - comme dans le modèle de système solaire de simulation de tâche 32 - le fonctionnement de la boucle d'appoint est contrôlée par deux capteurs. La chaudière et la pompe sont en marche si la température de l'eau de stockage est inférieure à un seuil inférieur de température (47 degrés) au niveau du capteur supérieur et éteint si la température au niveau du capteur inférieur dépasse un certain plafond (55 degrés).
- Dans une stratégie sans doute plus avantageuse, les deux capteurs de déclenchement déclencheraient le chauffage d'appoint de manière distincte selon deux fins de chauffage ou d'eau chaude sanitaire : le chauffage est activé si la température à la position du capteur du haut

indique un besoin de stocker de la chaleur pour être prêt à préparer de l'eau sanitaire ou si la température à la position du capteur inférieur est insuffisante pour couvrir le besoin de chauffage. Avec cette stratégie, le système de chauffage ne doit pas fonctionner si le besoin de chauffage des locaux peut être couvert par l'énergie solaire. Cette stratégie a été simulée dans le travail de simulation déjà cité [9]. Le capteur supérieur est en mesure de s'assurer que l'énergie et la température dans le haut du réservoir est suffisante pour l'eau chaude sanitaire. Le capteur inférieur est placé en dessous du piquage de sortie de la boucle de chauffage et le volume de stockage entre les deux devrait être choisi (ou adapté) pour limiter la fréquence des démarrages. Les températures mesurées par les deux capteurs pourraient être utilisées pour décider de l'arrêt : lorsque la température à l'un des capteurs est inférieure au seuil supérieur, le chauffage d'appoint peut continuer (dans le cas d'une chaudière à gaz à condensation de préférence à une vitesse de chauffage réduite pour optimiser le rendement). Le fonctionnement de la chaudière doit être arrêté lorsque les températures des deux capteurs sont égales ou supérieures à leurs limites supérieures.

- Dans une conception pratique, la boucle auxiliaire pourrait fonctionner avec un seul capteur. Dans ce cas, le capteur peut être placé au niveau ou juste au-dessous du piquage de sortie de la boucle de chauffage. Cette stratégie de contrôle est facile à mettre en œuvre avec pratiquement n'importe quel contrôleur de chauffage d'appoint. Les simulations effectuées par Poretti suggèrent que cette stratégie simple pourrait ne réduire que marginalement l'efficacité des systèmes par rapport à la stratégie de l'aide de deux capteurs tel que décrite ci-dessus.

En tout cas, pour une efficacité et des performances élevées, il convient de vérifier que le débit dans la boucle auxiliaire est compatible avec la puissance de chauffage d'appoint. Pour ce faire, le débit dans la boucle auxiliaire peut être réglé à une valeur convenable, mais invariable. Ce choix le plus simple a été supposé pour les simulations. Dans de nombreuses applications pratiques de conception le besoin de chauffage (maximum supposé) est d'environ 5 kW, mais la chaudière à gaz peut moduler sa puissance dans une gamme bien au-dessus (par exemple entre 3 kW et 30 kW). Dans un tel cas, la puissance maximale de chauffage de la chaudière à gaz pourrait être limitée à environ 6 kW. Le débit doit être réduit en conséquence. Si possible, les paramètres du contrôleur de la chaudière seraient également ajustés afin de limiter la puissance de chauffage. Ainsi, le réservoir serait toujours au travail à une puissance relativement faible et à haut rendement. Il serait, toutefois, être encore mieux de faire varier le débit dans la boucle auxiliaire. Il pourrait être modifié au moyen d'une pompe à vitesse variable, d'une vanne thermostatique ou d'une vanne motorisée. En particulier, si la puissance de chauffage d'appoint est variable, comme c'est le cas avec l'état de l'art des chaudières à gaz modulantes, un débit variable dans la boucle auxiliaire pourrait être avantageux. Avec une chaudière adaptée ou avec une pompe à chaleur, la circulation pourrait être en thermosiphon. Dans ce cas, la puissance de chauffe de la chaudière serait modulée en fonction du débit et le débit serait ajusté en fonction de la température du réservoir. De cette façon que le circuit auxiliaire et le débit sont adaptés aux besoins de chaleur à tout moment. Dans toutes les stratégies de contrôle décrites ci-dessus le système de chauffage est mis en service quand il est nécessaire pour couvrir les besoins (dès que la température dans le réservoir est trop faible), au moyen d'un simple signal "Exécuter". Il n'y a pas d'autres échanges d'information entre le contrôleur de chauffage d'appoint et le contrôleur de système solaire. Si la chaudière est modulante, elle ajuste sa puissance pour répondre à la consigne de température avec son propre contrôleur et son capteur.

Dans une stratégie de contrôle plus complexe, le réglage de puissance de la chaudière d'appoint (ou le débit de la boucle auxiliaire) peut être subordonné non seulement sur la température à la sortie du chauffe-eau, mais aussi de la température (ou la variation de température) mesuré par le(s) capteur(s) dans le réservoir.

Le raccordement de la boucle auxiliaire directement dans le réservoir a plusieurs avantages. Toutefois, en pratique, une éventuelle limitation doit être prise en compte : si le système de chauffage n'est pas conçu pour être utilisé dans des circuits ouverts (avec renouvellement de l'oxygène et par conséquent de la corrosion), le réservoir devra être une conception fermée ou la boucle de chauffage auxiliaire doit inclure un échangeur de chaleur pour le transfert de chaleur.

### 2.5.3 La boucle de chauffage des locaux

Dans les simulations, le flux de retour de la boucle de chauffage est dirigé vers le réservoir via un dispositif de stratification. Comme dans le cas de la boucle des capteurs solaires, le modèle informatique suppose une stratification parfaite dans la plage spécifiée du dispositif de stratification (entre la hauteur de l'entrée et la sortie). L'eau est prélevée directement dans le réservoir à une hauteur donnée pour être fournie au système de distribution de chaleur (dans la pratique des radiateurs ou un plancher chauffant). Une vanne de mélange limite la température de départ à 50 °C. Cette température a été choisie parce que c'est souvent la température maximale permise dans le cas du chauffage par le sol. Dans les simulations, la température disponible au piquage dans le réservoir est presque toujours supérieure à 50 °C. La température d'alimentation après la vanne de mélange est de 50 °C dès que le chauffage est nécessaire. Une étude de simulation antérieure avait révélé que l'effet sur l'efficacité du système de la diminution de la température à la vanne mélangeuse est négligeable (voir [9], fig. 9-43, p. 70). La raison n'en a pas été étudiée.

Vraisemblablement, si le débit et la température de retour est faible les effets néfastes du mélange (et la légère augmentation de la température de retour) n'a pas d'influence.

Toutefois, il convient d'être prudent avant de généraliser cette hypothèse : l'effet du mélange du débit vers les radiateurs peut dépendre des dimensions (de la capacité de transfert de chaleur) des diffuseurs, qui étaient supposées être assez élevées dans les simulations.

En général, il existe deux façons de faire varier la distribution de l'énergie pour le chauffage d'un bâtiment : par la variation de la température de l'alimentation ou par la variation du débit massique. Dans la pratique, habituellement la plupart des concepts de chauffage combinent les deux en adaptant la température d'alimentation à la température ambiante, d'une part et à l'aide de vannes thermostatiques qui adaptent le débit du radiateur ou de la section respective de plancher chauffant, d'autre part. Dans cette étude, l'alimentation en énergie des radiateurs a été contrôlée par la modulation du débit dans le système de distribution de chaleur. On a supposé qu'il n'y a pas de court-circuit, mais bien une distribution à flux équilibré dans les sections parallèles du système de distribution dans le volume chauffé. L'équilibrage du système de distribution de chaleur est toujours important lorsque la performance du système de chauffage dépend de la température de retour. Dans le cas du système MaxLean il est raisonnable de supposer que l'équilibrage des circuits est particulièrement important.

Le débit peut être ajusté en fonction de la température extérieure, la température ambiante ou la température du retour (ou de toute combinaison de ces options). La possibilité d'utiliser la température de retour pour la modulation de débit pourrait être une caractéristique importante : si aucune vanne thermostatique n'est utilisée et que la puissance de diffusion de la chaleur est élevée (ces deux caractéristiques sont typiques du chauffage par le sol), la température de retour dépend de la température ambiante et l'influence de la température ambiante peut être considérée. Cette fonction et ses avantages ont été étudiés dans [10]. Dans les simulations du système MaxLean, le débit varie pour répondre à une demande de chaleur donnée qui était connue à partir d'un fichier. La stratégie de contrôle de flux, appelé DFFC (Direct Feed Flow Control), est différente de la pratique actuelle. Dans cette étude théorique, la stratégie DFFC améliore les performances du système. La température accrue d'alimentation conduit à un faible débit et une faible température de retour. Par conséquent, la stratification dans le réservoir est meilleure, ce qui améliore l'efficacité à la fois du chauffage d'appoint au gaz et des capteurs solaires. De précédents travaux de simulation, qui ont utilisé un autre (et sans doute meilleur) modèle de simulation de la chaudière à gaz [11], ont suggéré que le concept DFFC réduit la consommation de gaz de 2,4% ([9], p. 91). (Dans cette étude, la réduction est de 2%, voir la section sur les résultats p. 28). Selon Poretti ([9], tableau 10-1, p. 91), environ la moitié de cette réduction est attribuable à un gain solaire supérieur, l'autre moitié est due à une plus grande efficacité de la chaudière. Toutefois, le DFFC n'est qu'une caractéristique - insolite - spécifique du concept de système MaxLean, que tout fabricant peut décider d'adopter, rejeter ou examiner plus tard. La même constatation vaut pour la boucle de chauffage de l'espace non pressurisée et ouverte : l'étude de simulation publiée dans [9] a quantifié l'effet d'un échangeur de chaleur (de 2 m<sup>2</sup> pour une taille moyenne) immergé pour permettre de

fermer et pressuriser la boucle (à peu de frais). Dans ce cas, l'échangeur de chaleur supplémentaire réduit les performances du système de 2,2% (augmentation de la consommation des accessoires, voir [9], p. 103). Il est également possible de prévoir une boucle de chauffage et un réservoir fermé non pressurisé ou légèrement sous pression : ce n'est pas compliqué à mettre en pratique et pourrait être un compromis pragmatique, parce que de nombreux systèmes de chauffage (radiateurs et chaudières les plus nombreuses et la plupart des tuyaux ) ne résistent pas à l'effet corrosif d'une boucle ouverte. Dans cette étude, différentes tailles différentes de systèmes de distribution de chaleur ont été simulées pour des maisons et pour des climats différents selon le schéma convenu dans le projet. Toutefois, l'étude ne se concentre pas sur l'influence des caractéristiques du système de distribution de chaleur. La question a été abordée dans les travaux précédents, où il a été constaté que le système DFFC fonctionne bien dans une maison avec un système de chauffage moins puissant (par exemple des radiateurs plus petits ou moins nombreux, moins de surface de plancher chauffant, voir [9], fig. 10-5, p . 92: avec le DFFC le taux de capacité de diffusion de chaleur du système de distribution de chaleur peut être réduite d'un tiers avec la même consommation de gaz que le scénario de référence).

#### **2.5.4 Préparation de l'eau chaude sanitaire**

Dans les simulations du concept MaxLean, l'eau chaude sanitaire était préparée de la même manière que dans les simulations du système solaire de référence de la tâche 32 : génération instantanée de l'eau chaude par un échangeur de chaleur. Les mêmes composants (y compris le contrôleur) étaient utilisés.

Cependant, la puissance de l'échangeur de chaleur était légèrement réduite. Le concept de chauffage instantané de l'eau sanitaire via un échangeur avec une puissance élevée induit une forte stratification et en conséquence des gains solaires importants, ce qui n'est pas représentatif. Le ballon combiné moyen a vraisemblablement :

- soit une méthode de régulation moins favorable du chauffage de l'eau sanitaire instantanée,
- soit un échangeur interne,
- soit un réservoir d'eau sanitaire interne (conception tank-in-tank).

Le concept MaxLean peut être mis en oeuvre avec n'importe lequel de ces concepts de préparation de l'eau chaude sanitaire. La stratification induite par le prélèvement est ainsi susceptible d'être moins importante que celle du système de référence simulé. Pour simuler une situation réaliste, la puissance de l'échangeur a été réduite.