

## **Influence de l'utilisation de FMU issus de TRNSYS sur les résultats et temps de calcul d'un modèle de référence**

**Pauline Brischoux<sup>1</sup>, Antoine Leconte\*<sup>1</sup>, Gérald Danseux<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> Univ Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, LISE,  
INES, F-38000 Grenoble, France**

**\*[antoine.leconte@cea.fr](mailto:antoine.leconte@cea.fr)**

---

*RESUME. Les évolutions énergétiques et technologiques nécessitent de prendre en compte des interactions de plus en plus complexes impliquant de nombreuses compétences différentes. Le FMI (Functional Mock-up Interface) est un standard permettant d'échanger des modèles dynamiques entre différents outils de simulation. Son utilisation permettrait de combiner simplement l'expertise des différents acteurs impliqués dans ce genre de projet. Elle nécessite cependant d'imposer certaines contraintes sur l'architecture et la communication d'informations entre les modèles qui peuvent avoir un impact sur les résultats et les temps de calcul. Cette étude présente une expérience numérique comme une première évaluation de ces impacts potentiels avec TRNSYS. Un modèle de référence de Système Solaire Combiné est décomposé progressivement en plusieurs FMU (Functional Mock-up Unit). Les résultats et temps de calcul des différentes co-simulations sont comparés au cas de référence et analysés afin de souligner des points de vigilance quant à une utilisation plus larges de FMU dans le cadre de simulations thermiques dynamiques.*

*MOTS-CLÉS : Co-simulation, Functional Mock-up Interface, Système Solaire Combiné*

---

*ABSTRACT. Energy and technology developments have led to increasingly complex interactions between the different parts of energy systems, requiring a broad range of skills to take them into account. The FMI (Functional Mock-up Unit) standard provides the possibility to exchange dynamic models between different simulation tools. It allows for an easier collaboration between the different experts involved in this type of project. However, it is required to impose certain constraints on the architecture and communication protocol between the models, which can have an impact on the results and calculation time. This study presents a numerical experiment as a first evaluation of these potential impacts with TRNSYS. A reference solar combisystem modeled is gradually divided into several FMU (Functional Mock-up Unit). The results and calculation time of the different co-simulations are compared to the reference case and analyzed to highlight important aspects regarding a more extensive use of FMU models in the context of dynamic thermal simulations.*

*KEYWORDS : Co-simulation, Functional Mock-up Interface, Solar Combisystem*

---

### **1. CONTEXTE ET OBJECTIFS**

#### **1.1. PROBLEMES ENERGETIQUES DE PLUS EN PLUS COMPLEXES**

Les évolutions énergétiques et technologiques nécessitent de prendre en compte des interactions de plus en plus complexes impliquant de nombreuses compétences différentes. L'interconnexion entre les bâtiments et les réseaux énergétiques en est un exemple. En effet, ces derniers, qu'ils soient électriques ou thermiques, sont de plus en plus alimentés par des ressources renouvelables intermittentes. En outre, les bâtiments d'aujourd'hui ne sont plus seulement consommateurs mais également producteurs d'énergie.

Cette évolution implique le développement de nouvelles approches de conception comme l'optimisation de bâtiments performants NZEB (Net Zero Energy Building) en interaction avec les réseaux, développé par (Sun et al. 2020). Elle nécessite également de nouvelles méthodes de gestion, telles que le pilotage flexible de la demande de chauffage étudié par (Aoun et al. 2019), et même de nouveaux composants, comme la sous-station bidirectionnelle de chaleur décrite par (Lamaison et al. 2017).

Pour répondre à ce nouveau paradigme, les acteurs des différents domaines impliqués doivent faire évoluer leurs outils. La prise en compte d'interactions dynamiques est nécessaire pour répondre aux nouveaux besoins. Cependant, les outils numériques des différents acteurs ne sont pas forcément compatibles entre eux et il paraît trop fastidieux et redondant de traduire tous les modèles existants dans toutes les plateformes possibles. L'adaptation des modèles existants en modèles interopérables est un moyen judicieux pour pallier ce problème. Ceci peut être fait en utilisant le standard FMI (Functional Mock-up Interface).

## 1.2. STANDARD FMI ET UTILISATION DE FMU

Le standard FMI permet d'encapsuler dans une boîte noire un modèle dynamique avec une interface standardisée, appelée FMU (Functional Mock-up Unit). Les FMU ainsi générés à partir d'outils différents peuvent alors être mis en relation à l'aide d'un logiciel de co-simulation.

Deux types de modèles FMU existent : Model Exchange (ME) et Co-simulation (CS)

- Un modèle FMU de type Model Exchange peut être importé dans un logiciel compatible et être exécuté comme un composant classique de cet outil. Le solveur utilisé pour calculer l'état du système à chaque pas de temps sera le solveur du logiciel dit « master », c'est-à-dire celui dans lequel le FMU a été importé.
- Un modèle FMU de type Co-simulation peut être importé dans un logiciel compatible. Le solveur utilisé pour calculer l'état du système à chaque pas de temps sera le solveur du logiciel dit « slave », c'est-à-dire celui depuis lequel le FMU a été exporté. Le logiciel « master » appelle donc l'outil d'origine du FMU pour effectuer les calculs liés à ce modèle et échange les valeurs d'entrée et de sortie avec ce logiciel à chaque pas de temps.

Le standard FMI permet donc de faire communiquer les modèles de différents acteurs utilisant des outils différents. Parmi les exemples dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, (Nouidui, Wetter, et Zuo 2013) mettent en relation des systèmes développés dans Modelica avec des bâtiments modélisés dans EnergyPlus. (Elsheikh et al. 2013), et plus récemment (Widl et Müller 2017) avec la librairie FMI++, montrent également la possibilité de coupler des modèles TRNSYS avec des modèles Modelica. Comme largement étudié et montré lors de l'Annexe 60 du programme EBC de l'IEA (Wetter et Van Treeck 2017), ce genre de couplage peut être utilisé dans diverses tâches dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, comme par exemple le développement de contrôles-commandes (Widl et al. 2015) (Eder et al. 2016). Ce standard permettrait donc de répondre aux nouveaux besoins liés à l'interconnexion bâtiments / réseaux énergétiques.

## 1.3. EVALUATION DE L'IMPACT DES FMU

L'utilisation de FMU est donc pratique et polyvalente, permettant de coupler des outils différents pour résoudre des problèmes complexes. Cependant, elle impose tout de même certaines contraintes sur l'architecture du modèle global et la communication des informations entre les composants. Ces contraintes peuvent avoir une influence sur les résultats, d'autant plus importante dans le cadre de FMU

en mode « Co-simulation » pour lesquels chaque FMU embarque son propre solveur. Dans ces conditions, selon le type de solveur et le pas de temps de simulation, l'échange d'information entre les composants peut être décalé et avoir une influence significative sur les résultats (Wetter et Van Treeck 2017). Il semble intéressant d'évaluer dans quelle mesure l'emploi de plusieurs « sous-solveurs » altère les résultats afin d'améliorer leur interprétation. En outre, des problèmes complexes tels celui de l'interconnexion bâtiments/réseaux peuvent potentiellement impliquer un grand nombre de FMU. Or utiliser un grand nombre de FMU va avoir une influence également sur les temps de calcul, potentiellement pénalisante selon l'étude.

Avant de s'attaquer à la résolution de problèmes complexes à grande échelle, étudier l'impact des FMU sur les résultats et les temps de calculs permettrait d'évaluer dans quelle mesure il est pertinent d'utiliser plusieurs FMU plutôt qu'un seul environnement de simulation. L'objectif de l'étude présentée ici est de faire émerger, à partir d'un cas de référence relativement simple, les premiers éléments à prendre en compte pour aborder au mieux la résolution de problèmes complexes utilisant des FMU, en particulier issus du logiciel de modélisation TRNSYS (Klein 2017). Une étude plus complète devra être faite par la suite, sur différents cas d'étude utilisant différents outils numériques, pour établir des préconisations concrètes afin d'élaborer au mieux un projet de co-simulation.

Pour cela, un modèle de référence de Système Solaire Combiné sous TRNSYS est décomposé en plusieurs FMU (de type Co-simulation) de différentes tailles. Ces FMU sont ensuite combinés à nouveau dans un master de co-simulation pour reproduire le cas de référence. Les résultats et temps de calcul des différentes co-simulations sont comparées au cas de référence et analysées. Les FMU en co-simulation ici viennent donc d'un même logiciel et ne présentent pas d'intérêt purement technique. Cependant, cela permet d'obtenir une comparaison fiable aux résultats de référence, pour laquelle le seul changement tient de la décomposition du système en plusieurs FMU. Aucun autre paramètre n'a été modifié ici.

## 2. MODELE DE REFERENCE

Template Solar Combisystem - IEA SHC Task 32

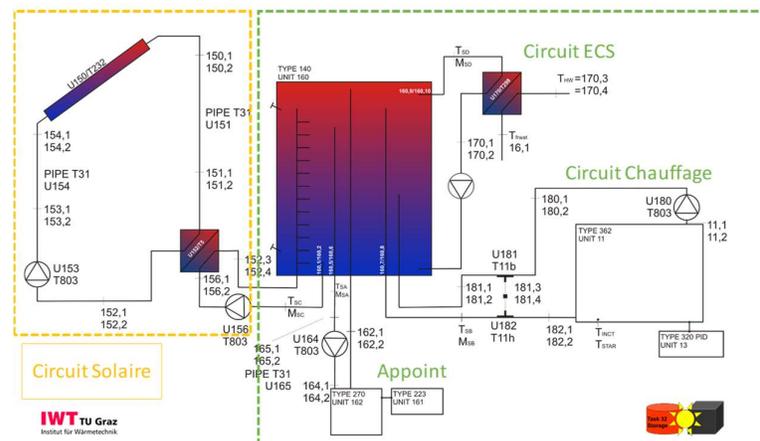


Figure 1 : Schéma du système solaire combiné de l'IEA-SHC Task 32 (Heimrath et Haller 2007)

La référence est le modèle de Système Solaire Combiné (SSC) développé lors de l'IEA-SHC Task 32 Subtask A2 (Heimrath et Haller 2007). Ce système comporte un ballon de stockage de chaleur alimenté par des capteurs solaires thermiques et une chaudière d'appoint. Il assure la production d'eau chaude

sanitaire et le chauffage à l'aide de radiateurs d'un bâtiment monozone. Le schéma du système est présenté sur la Figure 1.

Les principaux paramètres utilisés pour ce cas de référence sont décrits dans le Tableau 1 ci-dessous. Il est à noter que cette simulation est réalisée à pas de temps fixe de 3 minutes, ce qui impose des contraintes sur le paramétrage des solveurs des masters de co-simulations (voir paragraphe 3).

Paramètre	Valeur
Version de TRNSYS	TRNSYS18
Tolérance d'intégration	0.02
Tolérance de convergence	0.02
Début de la simulation	0 h (1er janvier à 0h00)
Fin de la simulation	8760 h (31 décembre à 24h00)
Pas de temps	0.05 h (3 min)
Fichier de données météo	Zürich (*.txt)
Volume du réservoir de stockage	1 m <sup>3</sup>
Surface de collecteurs thermiques	20 m <sup>2</sup>
Azimut des collecteurs	0° (face au sud)
Angle d'inclinaison des collecteurs	45° (par rapport à l'horizontale)
Orientation du bâtiment	0° (pas de rotation)

Tableau 1 : Principaux paramètres du modèle « SolarSDS » pour cette étude

### 3. DECOMPOSITION DU MODELE DE REFERENCE EN PLUSIEURS FMU

Plusieurs FMU sont générés à partir du cas de référence, chacun représentant une partie spécifique du modèle complet : bâtiment, processeur météo, circuit solaire et le reste du système pour chacun des cas envisagés. Cette décomposition permet de reconstituer de 4 manières différentes le même cas de référence en utilisant de 2 à 4 FMU. Les différents FMU et les configurations étudiées sont décrits dans le Tableau 2, dans lequel Dymola est pris pour exemple en tant que master de co-simulation. Les principales variables échangées, ainsi que le nombre total de variables (entre parenthèse), sont représentés sur les schémas correspondants à chaque configuration.

Les 3 co-simulations « 2 FMU », « 3 FMU » et « 4 FMU » sont réalisées à l'aide de Dymola et DACCOSIM comme « master » de co-simulation. Le choix de Dymola relève de la disponibilité d'outils de modélisation des réseaux d'énergie directement dans le logiciel (Giraud et al. 2015), ainsi que la possibilité d'importer des FMU et de les connecter au reste du modèle (par exemple des modèles de bâtiments issus de TRNSYS). Dymola n'étant cependant pas un logiciel dédié à la co-simulation à l'aide de FMU, il peut présenter certaines limites. Notamment, une étude (Galtier et al. 2015) montre que l'utilisation de DACCOSIM permet, entre autres, d'aboutir à des temps de calculs bien plus faibles qu'avec Dymola pour une même co-simulation.

Les versions et configurations utilisées sont :

- Dymola 2018 FD01 avec le compilateur Microsoft Visual Studio 2015 ; algorithme Dassl avec une tolérance de 0.0001 pour l'intégration.
- DACCOSIM NG 2020 v2.4 avec « Iterative Propagation » en méthode de co-initialisation (tolérance :  $1e^{-5}$  ; itérations max : « 1000 ») et un pas de temps constant de 3 min pour la co-simulation (identique au modèle TRNSYS de référence).

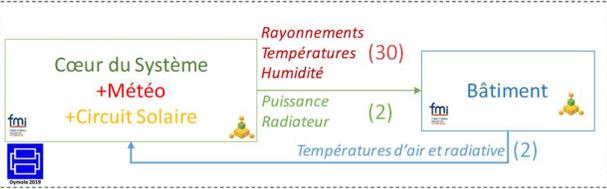
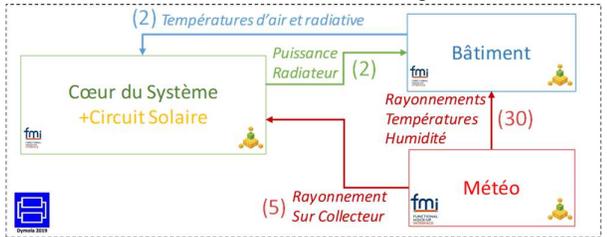
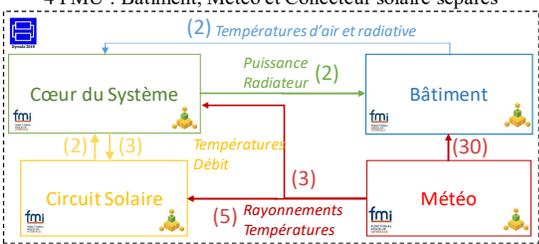
Configuration	Schéma et variables échangées
<p>« 0 FMU »</p> <p><i>Cas de référence, 100% TRNSYS.</i></p> <p>Il s'agit d'un couplage entre des collecteurs solaires thermiques et un appoint alimentant un ballon de stockage. Ce dernier est relié aux boucles de chauffage et ECS d'une maison de 140 m<sup>2</sup>.</p>	<p>0 FMU : Cas de Référence</p> 
<p>« 2 FMU »</p> <p><i>FMU Bâtiment distinct.</i></p> <p>Les données météorologiques sont envoyées depuis le modèle de référence duquel a été ôté le modèle de bâtiment.</p>	<p>2 FMU : Bâtiment séparé</p> 
<p>« 3 FMU »</p> <p><i>Bâtiment et météo séparés.</i></p> <p>Le FMU « Météo » délivre les données climatiques au FMU « Bâtiment » ainsi qu'au FMU regroupant le reste du système (cœur du système et circuit solaire).</p>	<p>3 FMU : Bâtiment et Météo séparés</p> 
<p>« 4 FMU »</p> <p><i>Bâtiment, Météo et Collecteurs solaires séparés.</i></p> <p>Le FMU « Circuit Solaire » est alors relié au FMU Météo et au FMU « Cœur du système ». Bâtiment et Météo fonctionnent de la même façon que pour les cas précédents.</p>	<p>4 FMU : Bâtiment, Météo et Collecteur solaire séparés</p> 

Tableau 2 : Représentation des différents cas de fractionnement en plusieurs FMU étudiés

Les configurations de l'ordinateur utilisé pour cette étude sont présentées dans le Tableau 3 ci-dessous. Chaque modèle est simulé trois fois afin de vérifier la répétabilité des résultats, notamment en termes de temps de calculs.

Paramètre	Valeur
OS	Microsoft Windows 10 Entreprise
RAM	8 Go
Processeur	Intel® Core™ i5-8250 CPU @ 1.60GHz, 1800 MHz
Nombre de cœurs	4 cœurs, 8 processeurs logiques

Tableau 3 : Configuration du PC utilisé pour l'étude

#### 4. RESULTATS ET ANALYSE

La partie gauche de la Figure 3 ci-dessous représente le bilan thermique, en kWh, du SSC pour les co-simulations réalisées, avec pour nomenclature : QSH, le besoin de chauffage du bâtiment ; QDHW, le besoin d'eau chaude sanitaire (ECS) ; QBoiler, la consommation d'énergie de la chaudière d'appoint ; QColl, la production d'énergie des collecteurs thermiques.

Une couleur est associée pour chaque configuration de co-simulation (de 0 à 4 FMU). Les deux nuances utilisées distinguent les co-simulation Dymola et DACCOSIM.

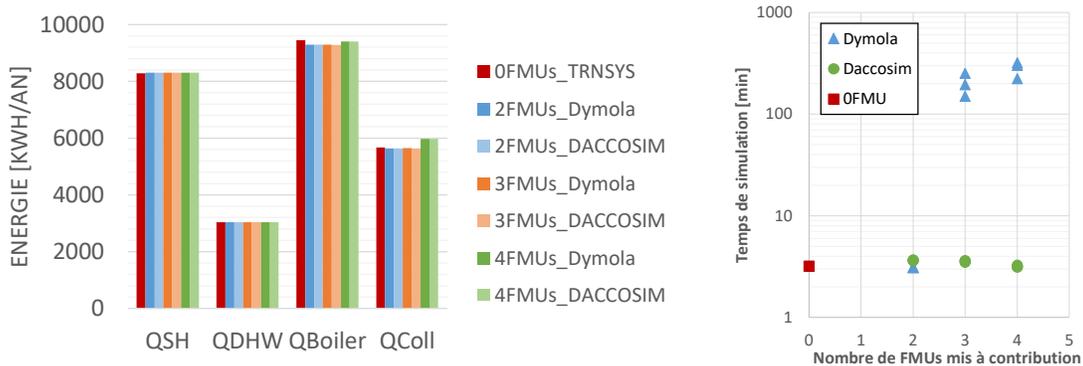


Figure 3 : A gauche : Bilan d'énergie thermique pour le cas de référence et toutes les co-simulations réalisées. A droite : Temps de calcul pour l'ensemble des configurations testées.

Le bilan énergétique pour chacun des cas est globalement similaire. Bien qu'utilisant des méthodes de résolution différentes, les résultats entre les deux masters de co-simulation sont quasiment identiques (différences inférieures ou égales à 0.1%). Pour les deux premières configurations de co-simulation (« 2 FMU » et « 3 FMU »), les différences par rapport à la référence sont inférieures à 1% pour les charges du bâtiment et la production solaire, et inférieures à 2% en ce qui concerne le bilan de la chaudière. Lorsque le circuit solaire se trouve dans un FMU séparé, la différence devient de moins en moins négligeable : celle sur l'énergie solaire produite par les capteurs s'élève alors à 5%. La séparation des solveurs (un solveur par FMU au lieu d'un solveur pour l'ensemble du modèle) dans ce cas de base ne permet pas de résoudre l'ensemble des équations d'un même pas de temps simultanément. Ceci a donc une influence sur les résultats qui dépend du pas de temps et de l'architecture d'échange des données communiquées.

La partie droite de la Figure 3 illustre l'influence du schéma de co-simulation sur les temps de calcul. Les temps de calculs sont similaires pour le cas de référence (0 FMU – 100% TRNSYS) et le cas divisé en 2 FMU, environ 3 minutes dans ce cas. Avec Dymola en master de co-simulation, à partir de 3 FMU originaires de TRNSYS, le temps de calcul augmente brutalement : il passe ici entre 2.5h et 4h environ pour 3 FMU, en fonction des exécutions. Pour les cas à 4 FMU, ce phénomène est à nouveau observé puisque le temps de calcul monte jusqu'à 5h pour deux des trois exécutions du modèle. Avec DACCOSIM en master de co-simulation, les temps de calcul ne dépassent pas 5 minutes, même pour le cas « 4 FMU ». Le nombre de FMU n'a pas d'influence significative sur le temps de calcul dans ce cas.

Ces observations pour ce cas d'étude sont liées à la gestion de la puissance de calcul par le master de co-simulation lors de l'utilisation de FMU issus de TRNSYS. En effet, le master de co-simulation lance une instance de l'exécutable TRNSYS pour chaque FMU TRNSYS du modèle. La part allouée à chaque instance TRNSYS est différente selon le master de co-simulation et le nombre de FMU TRNSYS. On observe dans ce cas d'étude qu'à partir de 3 FMU TRNSYS, Dymola alloue une part bien plus réduite de processeur à l'ensemble des instances TRNSYS. Ce qui explique l'augmentation brusque des temps de calculs dans ce cas. A l'opposé, avec DACCOSIM, la part du processeur allouée à chaque instance de TRNSYS diminue progressivement lorsque le nombre de FMU impliqués augmente.

Ces résultats offrent un retour d'expérience sur l'utilisation de FMU issus de TRNSYS. Ils sont propres au cas étudié et dépendent de plusieurs facteurs à prendre en compte dans l'élaboration de projets complexes de co-simulations :

- *Complexité du modèle* : Le modèle choisi est très complexe et il inclut de nombreux éléments du système – potentiellement répartis en plusieurs FMU. Un grand nombre de variables d'entrée/sortie doivent être échangées entre les divers FMU à chaque pas de temps ce qui influence les résultats et potentiellement les temps de calculs selon le master utilisé. Il est préférable de rester parcimonieux dans le nombre de FMU en co-simulation impliqués.
- *Logiciels « master » et « slave »* : Les modèles utilisés proviennent tous de TRNSYS. Ils sont co-simulés à l'aide de Dymola et DACCOSIM. La gestion de la puissance de calcul et des appels des instances de chaque FMU a une importance sur les temps de calcul et sera différente avec d'autres logiciels « master » et d'autres logiciels « slave ». Il est pour le moment préférable d'utiliser DACCOSIM pour traiter les problèmes impliquant plus de 2 FMU issus de TRNSYS.
- *Méthode de résolution* : Le solveur de base des masters de co-simulation sont utilisés. Bien que le pas de temps de simulation TRNSYS soit assez réduit (3 minutes), la méthode de résolution de plusieurs FMU en co-simulation entraîne des différences non-négligeables. D'autres méthodes et d'autres pas de temps auront des influences différentes sur les résultats mais également sur les temps de calculs. Ceci devra être évalué dans des études complémentaires.

## 5. CONCLUSIONS

L'évolution des enjeux énergétiques, comme celle de l'interconnexion entre les réseaux et les bâtiments, nécessite de prendre en compte des interactions de plus en plus complexes entre différents domaines scientifiques. L'utilisation du standard FMI permettrait de faire communiquer les modèles des différents acteurs impliqués dans cet enjeu. Avant de généraliser l'utilisation de ce protocole, cet article propose un retour d'expérience sur l'utilisation de FMU issus de TRNSYS en co-simulation. A partir d'un modèle complexe de référence de Système Solaire Combiné, plusieurs co-simulations sont réalisées pour comparer les résultats obtenus et les temps de calcul.

Pour ce cas d'étude, selon l'architecture de communication entre les FMU, les résultats présentent au maximum des différences de l'ordre de 2% à 5% par rapport au cas de référence. Les temps de calculs sont similaires avec un faible nombre de FMU, mais peuvent considérablement augmenter à partir de 3 FMU (multiplié par 65 avec Dymola dans ce cas) selon la gestion des cœurs de calcul par le master de co-simulation.

Ces résultats sont propres au cas d'étude présentés mais soulignent les principaux aspects à bien prendre en compte avant la résolution de problèmes complexes de co-simulation : complexité du modèle (parcimonie du problème à résoudre), master de co-simulation et méthode de résolution.

Des études complémentaires devront être réalisées pour établir des règles concrètes et génériques pour le bon développement de projets de co-simulation à grande échelle en général. Elles devront évaluer, à partir des cas différents, d'outils différents, et de manière plus détaillée, l'influence de la gestion des pas de temps (variable/fixe) et des méthodes de résolution des FMU par exemple.

## 6. REFERENCES

- Aoun, Nadine, Roland Bavière, Mathieu Vallée, Antoine Arousseau, et Guillaume Sandou. 2019. « Modelling and Flexible Predictive Control of Buildings Space-Heating Demand in District Heating Systems ». *Energy* 188 (décembre): 116042. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116042>.
- Elsheikh, Atiyah, Edmund Widl, Peter Palensky, Florian Dubisch, Markus Brychta, Daniele Basciotti, et Wolfgang Müller. 2013. « Modelica-enabled rapid prototyping via TRNSYS ». In *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*.
- Galtier, Virginie, Stephane Vialle, Cherifa Dad, Jean-Philippe Tavella, Jean-Philippe Lam-Yee-Mui, et Gilles Plessis. 2015. « FMI-Based Distributed Multi-Simulation with DACCOSIM ». *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, Society for Computer Simulation International, , 39-46.
- Giraud, Loic, Roland Bavière, Mathieu Vallée, et Cédric Paulus. 2015. « Presentation, Validation and Application of the DistrictHeating Modelica Library ». In *Proceedings of the 11th International Modelica Conference*, 79-88. <https://doi.org/10.3384/ecp1511879>.
- Heimrath, Richard, et Michel Haller. 2007. « Project Report A2 of Subtask A : The reference heating system, the template solar system. A report of IEA SHC - Task 32 ». [http://task32.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-Reference\\_Heating\\_System.pdf](http://task32.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-Reference_Heating_System.pdf).
- Klein, S.A. 2017. *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- Lamaison, Nicolas, Roland Bavière, David Cheze, et Cedric Paulus. 2017. « A Multi-Criteria Analysis of Bidirectional Solar District Heating Substation Architecture ». In *Proceedings of SWC2017/SHC2017*, 1-11. Abu Dhabi: International Solar Energy Society. <https://doi.org/10.18086/swc.2017.10.02>.
- Nouidui, Thierry Stephane, Michael Wetter, et Wangda Zuo. 2013. « Functional Mock-Up Unit import in EnergyPlus for co-simulation ». In *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Chambéry, France: IBPSA.
- Sun, Yongjun, Rui Ma, Jiayu Chen, et Tao Xu. 2020. « Heuristic Optimization for Grid-Interactive Net-Zero Energy Building Design through the Glowworm Swarm Algorithm ». *Energy and Buildings* 208 (février): 109644. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109644>.
- Wetter, Michael, et Christoph Van Treeck. 2017. *IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems*.
- Widl, Edmund, Florian Judex, Katharina Eder, et Peter Palensky. 2015. « Fmi-Based Co-Simulation of Hybrid Closed-Loop Control System Models ». In *2015 International Conference on Complex Systems Engineering (ICCSE)*, 1–6.
- Widl, Edmund, et Wolfgang Müller. 2017. « Generic FMI-Compliant Simulation Tool Coupling ». In *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*, 321-27. <https://doi.org/10.3384/ecp17132321>.