HAL
open science

Démarche de conception d'un réseau électrique intelligent et de son système d'information par cosimulation

David Oudart, Jérôme Cantenot, Frédéric Boulanger, Sophie Chabridon

▶ **To cite this version:**

David Oudart, Jérôme Cantenot, Frédéric Boulanger, Sophie Chabridon. Démarche de conception d'un réseau électrique intelligent et de son système d'information par cosimulation. CIEL 2018 : 7ème Conférence en IngénieriE du Logiciel, Jun 2018, Grenoble, France. pp.9-1 - 9-5. hal-01821675

HAL Id: hal-01821675

https://hal.science/hal-01821675

Submitted on 22 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Démarche de conception d'un réseau électrique intelligent et de son système d'information par cosimulation

David Oudart[1,2], Jérôme Cantenot[1], Frédéric Boulanger[3], Sophie Chabridon[2]

[1] EDF R&D, Palaiseau, France
[2] SAMOVAR, CNRS, Université Paris-Saclay, Télécom SudParis, Évry, France
[3] LRI, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, France

Abstract

Les réseaux électriques intelligents, dits *Smart Grids*, sont la prochaine génération de réseaux de distribution d'électricité, qui s'appuient sur les technologies de l'information pour soutenir l'intégration des sources de production d'énergie décentralisées et intermittentes telles que les parcs éoliens et les centrales photovoltaïques. Ils dépendent de plusieurs domaines comme ceux de la physique et du génie électrique, du logiciel et des réseaux de télécommunications. La conception de réseaux électriques intelligents est donc complexe en raison des différents domaines techniques et outils de modélisation en jeu. Dans cet article, nous présentons une approche de conception s'appuyant sur l'ingénierie dirigée par les modèles, les modèles exécutables et la cosimulation FMI. Cette approche est illustrée sur le cas d'utilisation de la conception d'un réseau électrique insulaire, et permet d'étudier l'effet des décisions de production d'électricité.

1 Introduction

Les réseaux électriques intelligents (*Smart Grids*) sont la prochaine génération de réseaux de distribution électrique, augmentés par les technologies de l'information. Ils participent à la transformation du paysage électrique et de ses nouveaux usages, en favorisant par exemple l'insertion des énergies renouvelables, décentralisées, et permettent la prévention, une meilleure réactivité et une meilleure réponses à certains évènements du réseau tels que les pannes électriques. Il s'agit donc de systèmes critiques, de grande échelle et impactant potentiellement de nombreuses personnes : il est donc important de s'assurer de leur bon fonctionnement avant leur mise en oeuvre. Dans de tels cas, la simulation se révèle très utile pour effectuer des vérifications, et évaluer différentes hypothèses et scénarios. Néanmoins, parce qu'ils impliquent de nombreux domaines techniques, notamment l'électronique, le traitement de l'information et les télécommunications, les *Smart Grids* sont un exemple typique de système complexes, difficiles à concevoir.

Les principes de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM, ou MDE en anglais) sont particulièrement adaptés pour répondre aux problématiques de conception et dévelopement de systèmes industriels complexes, en raisonnant sur différents modèles interdépendants et exécutables, tout au long du cycle de vie du produit [2]. Ces modèles sont conçus à l'aide de différents outils et langages pouvant manipuler aussi bien des machines à état, des systèmes équationnels, des événements discrets que des modèles statistiques. Ceci jutifie la mise en place d'un environnement de cosimulation afin de conserver et profiter de cette diversité. Cependant, il manque une approche générale pour interconnecter les modèles des différents domaines techniques pour la simulation de tels systèmes. La précision et la valeur prédictive de la cosimulation dépendent d'une bonne intégration des outils entre eux et de la synchronisation correcte de leur exécution.

Cet article propose une approche pour aider les concepteurs de *Smart Grids* à évaluer le comportement global de leur solution et à évaluer l'impact de leurs choix de conception. Notre

approche est basée sur les principes de l'IDM et la norme FMI [1] pour la cosimulation de modèles dynamiques, et se concentre sur la modélisation du domaine informatique et applicatif.

2 Etat de l'Art

Dans la communauté de la distribution électrique, le défi de simuler des *Smart Grids* n'est pas nouveau. Des chercheurs définissent un environnement pour cosimuler un *Smart Grid* avec un contrôle distribué [5]. Leur approche intègre le logiciel et le matériel dans les simulations, avec des contrôleurs réels interagissant avec une simulation Matlab d'une centrale électrique à travers des communications en UDP et TCP, basées événement. Cependant, l'intégration de mécanismes de décision élaborés reste limitée. Une autre approche entièrement numérique consiste à proposer un simulateur basé sur des algorithmes numériques au lieu d'équations uniquement afin de combiner des simulations discrètes et continues dans un même moteur de simulation [3]. Les composants sont modélisés en C++ directement, intégrés aux moteurs de simulation OMNET++ ou NS2 pour les aspects télécoms, et une interface permet d'injecter de l'extérieur des données discrètes et temporelles. Cette approche est efficace, mais fournit une solution très spécifique pour la cosimulation de *Smart Grids* et manque donc d'extensibilité.

Les solutions existantes pour la simulation de *Smart Grids* montrent ce qui est techniquement possible et le type de résultats auxquels nous pouvons nous attendre. Cependant, ces approches sont souvent liées à des outils spécifiques et à des connecteurs non-standards développés pour les interfacer directement.

Notre but est de fournir un cadre permettant une simulation évolutive des *Smart Grids*, depuis des modèles abstraits au comportement simplifié, jusqu'à des modèles très détaillés du réseau de puissance, du réseau de télécommunication et des algorithmes de contrôle intelligents. La cosimulation, c'est-à-dire l'interconnection de différents simulateurs dans une même simulation, permet d'apporter une plus grande flexibilité au niveau des outils utilisés. Les recherches dans ce sens ont mené à la création du standard FMI (Functional Mockup Interface), qui établit une norme pour la cosimulation basée sur une interface d'échanges entre différents moteurs d'exécution et leurs modèles, en les encapsulant dans des "boîtes noires" appelées FMU (Fonctional Mockup Units) [1]. En plus de la flexibilité, l'utilisation d'un standard apporte une réutilisabilité et une modularité importante.

3 Cas d'Application

Nous choisissons d'illustrer notre démarche sur un exemple réel de notre entreprise, ce qui nous permettra de nous comparer par rapport aux méthodes précédentes. L'Île de Sein est une île française possédant son propre réseau électrique, indépendant du continent. La production est principalement assurée par une **centrale diesel**, accompagnée d'une **ferme photovoltaïque**. Néanmoins, parce qu'elle dépend de la météo, la production photovoltaïque est imprévisible et incertaine. Afin de répondre à la contrainte d'équilibre instantané entre production et consommation sur le réseau, on peut être amené à faire fonctionner cette source d'energie en dessous de son maximum de production, occasionnant un manque à gagner ainsi qu'une empreinte carbone non-optimale. L'une des solutions proposée est d'ajouter sur le réseau une **batterie de stockage** afin de contrebalancer l'instabilité de la production (renouvelable) et donc d'optimiser l'utilisation de la ferme photovoltaïque. Pour assurer l'efficacité du système et de ses différentes sources de production, un pilotage intelligent doit être mis en oeuvre au travers d'un **Système de Gestion de l'Energie (EMS, Energy Management System en anglais)**, doublé d'un

Système d'acquisition et de contrôle de données (SCADA). L'architecture cible est présentée dans la figure 1.

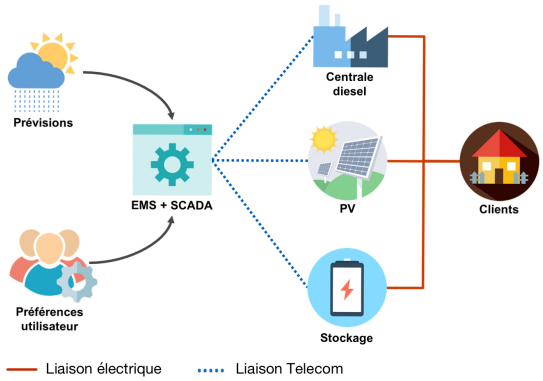

Figure 1: Infrastructure cible du Smart Grid de l'Île de Sein

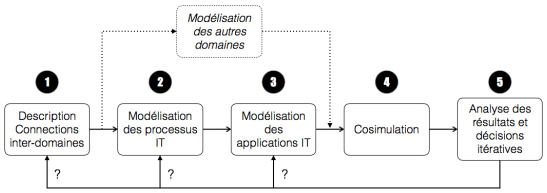

Figure 2: Une approche par étape de cosimulation de Smart Grid

4 Démarche de Cosimulation et Modélisation du Système d'Information

La conception du Smart Grid est évaluée à travers les modèles de ses différents domaines, en interfaçant entre eux les outils Le standard FMI est notre choix d'interface ; en conséquence, chaque *modèle de domaine* sera encapsulé dans une FMU avec son moteur d'exécution. Notre démarche sera illustrée avec le cas de l'Île de Sein, sur les domaines applicatifs et électriques uniquement. La figure 2 montre les différentes étapes de notre démarche, allant de la définition de l'interface entre les domaines jusqu'à l'analyse des résultats de la cosimulation, en passant par la réalisation des modèles des différents domaines.

Plusieurs profils de compétence sont impliqués, généralement représentés par différents acteurs : le **chef de projet** possède la connaissance des objectifs du futur système à concevoir, les **experts de domaine** maîtrisent les langages et outils de simulation pour leurs domaines respectifs, et **l'architecte de cosimulation** intervient sur les problématiques propres à la mise en oeuvre de la cosimulation (les interfaces, les outils, etc.). Dans cet article, on se concentrera sur la modélisation du système d'information (SI), considérant que la simulation électrotechnique est un sujet beaucoup mieux maîtrisé dans l'industrie.

Le standard FMI utilise une stratégie de simulation plus adaptée à des systèmes continus, manipulant des variables de modèles physiques plutôt que les variables discrètes des systèmes cyber-physiques. En outre, il n'existe pas d'outil de simulation explicitement dédié aux systèmes d'information. Certains cadres d'architecture d'entreprise (Zachman, TOGAF, etc.) ont pour but de modéliser l'infrastructure et le comportement du système d'information (SI), souvent à travers la décomposition en plusieurs modèles de différents points de vue et de niveaux d'abstraction. Mais ces modèles ne sont pas fait pour être exécutables et donc pas adaptés à une démarche d'IDM. Nous nous appuyons sur des travaux antérieurs [4] pour modéliser et exécuter des processus de traitement de l'information, et les étendons pour intégrer FMI.

La première étape de notre démarche (figure 2) consiste à établir une description des échanges et interactions nécessaires entre les différents domaines à simuler. Cette étape est

supposée assurer un minimum de cohérence entre les futurs *modèles de domaine*. Il est important que les interactions identifiées puissent être transposées aux concepts de FMI : les variables d'échange FMI doivent être au moins continues par morceaux, et être de type primitif (Booléen, Entier, Réel, Texte ou Enumération). Par exemple, dans le cas de l'Île de Sein, le tableau 3 définit les échanges entre les deux domaines électrique (Electric) et information (IT) grâce aux concepts FMI.

Nom de la connection	Unité	Type FMI	Depuis	Vers
PV_Max_Power	Watt	Real	Electric	IT
PV_Limitation_control	Watt	Real	IT	Electric
Battery_SOC	%	Real	Electric	IT
Battery_Power	Watt	Real	Electric	IT
Battery_Power_control	Watt	Real	IT	Electric
Diesel_Power	Watt	Real	Electric	IT
Grid_State_control	Ø	Enumeration ["coupled", "islanded"]	IT	Electric

Figure 3: Description des interactions entre domaines

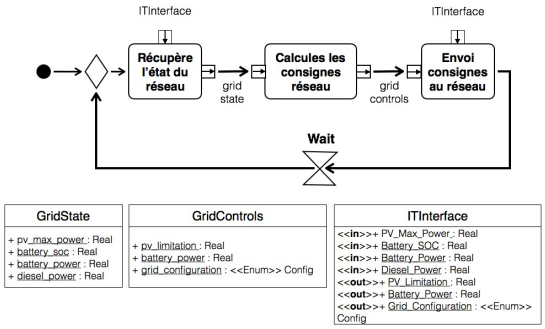

Figure 4: Processus métier du SI, en UML

Nous avons choisi de décomposer la réalisation du modèle du système d'information, également considéré comme un système complexe, en deux étapes, en nous inspirant du principe de décomposition en points de vue des *frameworks* d'architecture d'entreprise, correspondant à deux acteurs et experts différents. Ainsi, **l'étape 2** consiste à faire réaliser par un *architecte fonctionnel* la décomposition fonctionnelle du système d'information. Les différentes fonctions du système sont identifiées, intégrées à des processus métier définissant son comportement, et les flux d'information entre fonctions sont spécifiés. Les entrées et sorties du modèle correspondent aux interactions du système d'information avec les autres domaines, identifiées dans la première étape. La figure 4 montre notre modèle du processus de pilotage intelligent et centralisé de la production des sources d'énergie de l'Île de Sein, à l'aide d'un diagramme d'activité UML (les actions UML représentent les fonctions, l'activité UML le processus métier).

Dans le système réel, ce sont généralement les logiciels et applications du SI qui réaliseront les fonctions définies dans ce *modèle fonctionnel*. **L'étape 3** consiste justement à modéliser l'implémentation de ces fonctions. À cette occasion, différents langages et outils peuvent être utilisés si les experts applicatifs les estiment plus adaptés, tant que les modèles respectent l'interface des fonctions (entrées / sorties), définie dans le *modèle fonctionnel*. Pour notre exemple de l'Île de Sein, nous avons directement modélisé l'algorithme de calcul et d'optimisation de la production dans le langage Java.

Le système d'information est ainsi modélisé à partir de plusieurs modèles, cohérents entre eux s'ils respectent les contraintes du *modèle fonctionnel*. De même que nous utilisons le standard FMI pour connecter entre eux les modèles hétérogènes des différents domaines du *Smart Grid*, nous pouvons utiliser ce mécanisme pour relier entre eux les différents modèles du SI seul, en générant des FMU pour chaque modèle et son simulateur. Enfin, le principe d'opacification des FMU nous permet de générer une unique FMU pour le domaine SI, comme présenté dans la figure 5.

Finalement, la figure 6 montre les résultats de la cosimulation du *Smart Grid* de l'île de Sein, après cosimulation des deux FMU du domaine SI et Electrique. Les barres négatives représentent la consommation sur le réseau, les barres positives la production. Si l'on peut

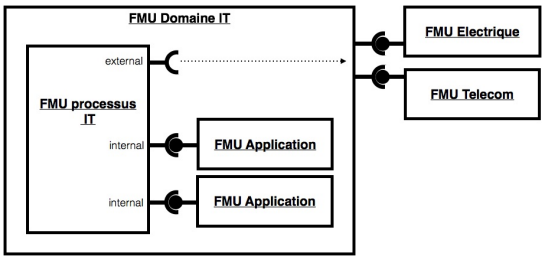

Figure 5: FMU du domaine SI composée de deux FMU internes

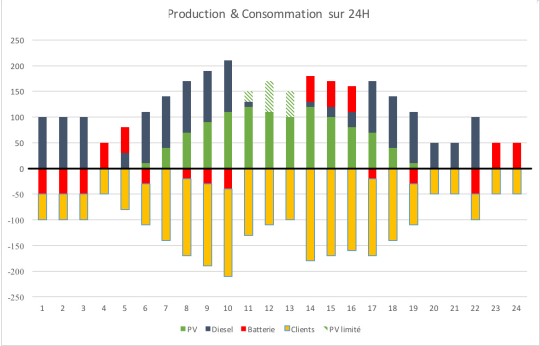

Figure 6: Evolution de la production et consommation simulée sur un jour

remarquer que le service et l'équilibre est maintenu tout au long de la journée, la production de PV a été limitée autour de midi. Dans la prochaine itération sur les modèles, on pourra par exemple modéliser un algorithme de gestion de la production plus intelligent, ou simplement augmenter le dimensionnement de la batterie.

5 Conclusion

Nous proposons une approche de cosimulation fondée sur un enchaînement de plusieurs étapes, illustrée par l'exemple du réseau de distribution d'électricité de l'île de Sein. Nos travaux portent aujourd'hui sur la réalisation initiale d'un modèle de haut niveau de l'architecture globale du système, mêlant un ensemble minimal des notions de chaque domaine technique, dans le but d'améliorer et de valider la cohérence des futurs modèles de domaine. De même, le passage entre les étapes pourrait être facilité par des transformations et générations automatiques, afin de s'aligner plus encore avec les principes de l'IDM. En définitive, la simulation de *Smart Grid* est pertinente si l'on peut s'assurer que l'implémentation finale du système sera conforme aux modèles. Les simulations dites *Hardware-in-the-loop* ou *Software-in-the-loop*, ainsi que la génération automatique de code sont des pistes potentielles de développement.

References

[1] T. Blochwitz, M. Otter, M. Arnold, C. Bausch, H. Elmqvist, A. Junghanns, J. Mauss, M. Monteiro, T. Neidhold, Dietmar Neumerkel, and others. The Functional Mockup Interface for Tool Independent Exchange of Simulation Models. In *8th Int. Modelica Conf., Dresden, Germany*, pages 105–114, March 2011.

[2] J. Hutchinson, M. Rouncefield, and J. Whittle. Model-Driven Engineering Practices in Industry. In *2011 33rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*, pages 633–642, May 2011.

[3] J. Nutaro. Designing Power System Simulators for the Smart Grid: Combining Controls, Communications, and Electro-Mechanical Dynamics. In *2011 IEEE Power and Energy Society Gen. Meet.*, 2011.

[4] R. Seghiri, F. Boulanger, C. Lecocq, and V. Godefroy. An Executable Model Driven Framework for Enterprise Architecture Application to the Smart Grids Context. In *49th Hawaii Int. Conf. on System Sciences, HICSS 2016, Koloa, HI, USA, January 5-8, 2016*. IEEE Computer Society, 2016.

[5] C. Yang, G. Zhabelova, C. Yang, and V. Vyatkin. Cosimulation Environment for Event-Driven Distributed Controls of Smart Grid. *IEEE Trans. Industrial Informatics*, 9(3):1423–1435, 2013.