

Prévention des blackouts grâce au système de gestion d'énergie intelligent du bâtiment

Duy Long Ha, Stéphane Ploix, Eric Zamai et Mireille Jacomino
 G-SCOP, INPGrenoble, UJF, CNRS, 46 avenue Félix Viallet 38031
 Grenoble Cedex, France duy-long.ha, stephane.ploix, eric.zamai, mireille.jacomino@g-scop.fr

Abstract

Cet article est consacré à une application du système de gestion d'énergie pour le bâtiment dans le contexte de l'exploitation des réseaux électriques. L'objectif de cette application est de montrer l'intérêt du système de gestion de l'énergie dans le bâtiment pour le fournisseur d'énergie dans le problème de conduite et d'exploitation du réseau électrique. En effet, les bâtiments peuvent maintenant rendre des services dit "systèmes" au fournisseur grâce au système de gestion d'énergie. Nous pouvons donc envisager une nouvelle méthode d'exploitation du réseau en intégrant des flux d'information entre les fournisseurs d'énergie et les consommateurs. Un mécanisme de gestion des flux électriques composé de la coordination du système de production, du réseau de transport jusqu'au niveau le plus bas du réseau, le système gestion d'énergie dans le bâtiment, peut être imaginé.

I. INTRODUCTION

Face à l'augmentation de la consommation, le système de production et de distribution d'électricité révèle certaines vulnérabilités. La terme *blackout* désigne une coupure d'électricité à large échelle concernant plusieurs régions voire la totalité d'un pays. Lorsqu'un blackout à grande échelle se produit, il peut causer des dommages économiques et sociaux énormes. Par exemple, l'immense blackout qui s'est produit le 28 août 2003 a conduit à un dommage économique approximatif de 7 à 10 milliards de dollars et a laissé 50 millions d'Américains sans électricité plusieurs jours [1]. Son origine provenait de la station électrique de Parma dans l'Ohio, où l'entreprise FirstEnergy avait oublié d'ébrancher des arbres, causant une longue panne en cascade en période de forte consommation. L'analyse de 37 blackouts dans le monde [2], [3] a mis en évidence certains points communs entre les incidents de blackout : un blackout commence toujours sous certaines pré-conditions, par la propagation en cascade d'événements de déclenchement de protection conduisant à la coupure d'électricité dans une grande région.

[2] a proposé également une façon efficace de prévenir les blackouts en stoppant les effets de surcharge en cascade afin d'éviter la propagation. Dans les situations critiques où il existe une surcharge, un court-circuit, ou le réseau est incapable de transporter l'énergie demandée par les consommateurs. Dans ce cas, on recourt au délestage d'une partie des charges les moins importantes pour parvenir à un équilibre entre production et consommation. Mais c'est une solution radicale car la coupure brutale ne prend pas en compte le confort du consommateur et ne permet aucune souplesse quant à son utilisation. Une solution de compromis est l'affectation dynamique de l'énergie électrique qui vise à réduire la consommation des usagers.

Parallèlement au projet Multisol, nous nous sommes intéressés à l'impact de nos travaux de recherche sur la prévention des blackouts. La coopération avec le laboratoire G2ELab nous a permis d'une part de recevoir des avis d'experts, d'autre part de situer notre problème par rapport à l'ensemble de la thématique de conduite et d'exploitation des réseaux électriques. Durant la première étape de cette coopération, nous avons cherché à apporter un élément de réponse au problème de prévention des blackouts par un mécanisme de délestage intelligent. La solution apportée n'est pas une méthode de délestage radicale comme la méthode qui est appliquée aujourd'hui mais un mécanisme prenant en compte le confort de l'utilisateur. Dans le cas où un incident se produit dans le réseau de transport, le système demande une réduction de la consommation aux usagers. Ce message urgent se propage à travers le réseau d'information. Le système de gestion d'énergie va alors chercher à réduire la consommation des services les moins prioritaires dans le bâtiment en gardant un bon niveau de confort pour l'usager.

II. MISE EN PLACE D'UN SYSTÈME DE PILOTAGE

A. Principe du mécanisme de prévention des blackouts

Selon une analyse de 37 incidents de blackouts dans le monde réalisée par [2], les blackouts se produisent en général dans les réseaux de transport et on peut retenir certaines caractéristiques communes à ces incidents qui sont considérés comme les plus redoutables dans le problème de conduite et d'exploitation du réseau :

- Le blackout se compose en général de 5 phases différentes (voir la figure 1). Tous les blackouts commencent avec certaines pré-conditions, ensuite ils entrent dans la phase de propagation et de cascade et finissent par la phase de restauration (voir la figure 2). Certains incidents de blackout n'ont pas de phase de propagation régulière mais entrent tout de suite dans la phase de cascade rapide.
- 60% des cas de blackout ont commencé par une chute de tension et 70% des cas sont initialisés par une surcharge en cascade.
- 30% des cas se produisent dans la période de pic en hiver, et 35% dans la période de pic en été. Seulement 35% des blackouts se produisent dans des conditions normales du réseau.

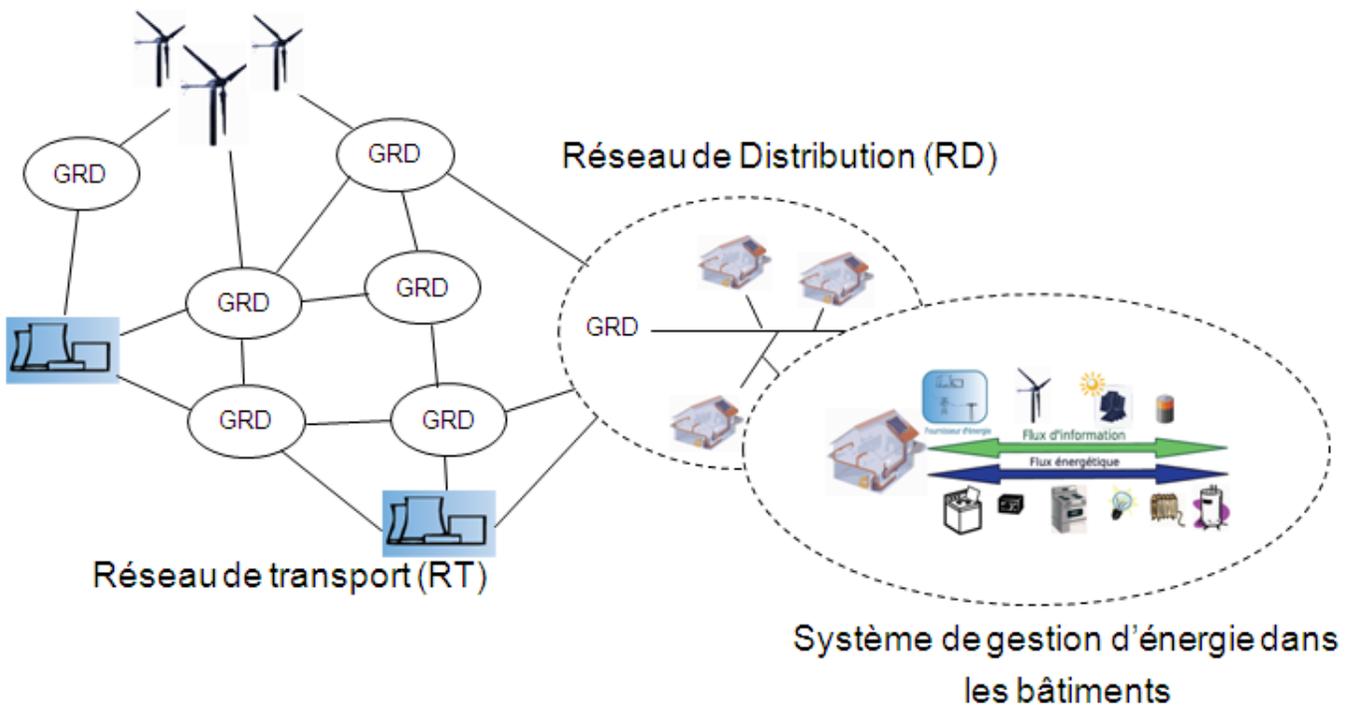


Fig. 1. Principe du mécanisme de prévention des blackouts en utilisant un Système de Gestion Technique du Bâtiment.

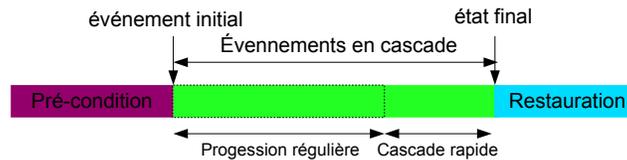


Fig. 2. Les phases de blackout dans le cas général [2]

L'inquiétude que fait peser la menace d'incidents de type blackout dans le contexte de libéralisation du marché de l'énergie est très grande. Il est nécessaire de mettre en place un système de prévention des blackouts. Ce mécanisme doit privilégier tout d'abord l'étude des pré-conditions conduisant souvent à la phase des événements en cascade. A travers l'analyse de [2], on peut constater qu'il y a une grande probabilité qu'un blackout se produise lorsque la production ne peut pas suivre la consommation dans des conditions difficiles du réseau (une période de pic de consommation et des conditions météorologiques extrêmes). Dans le cadre de la coopération avec le laboratoire G2ELab, nous avons défini un mécanisme de prévention des blackouts composé de deux phases principales (voir illustration dans la figure 1) :

- 1) **Étape de détection** D'abord, lorsque les pré-conditions du blackout sont détectées, le gestionnaire du réseau doit réagir pour ramener le réseau dans son état de fonctionnement normal. Le gestionnaire du réseau de transport établit un délestage optimal qui consiste à déterminer la limite maximale de puissance consommée dans chaque nœud au réseau de transport. Ce mécanisme permet au réseau de retrouver des conditions normales. Ces travaux sont réalisés par le laboratoire G2ELab.
- 2) **Étape de délestage** Ensuite, grâce au système de communication entre le Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD) et le système de gestion d'énergie dans le bâtiment, le GRD impose dynamiquement une contrainte de puissance maximale consommée par chaque consommateur dans le réseau de distribution. Ce mécanisme permet de coordonner les activités énergétiques des différents consommateurs pour arriver à respecter la contrainte imposée par le délestage optimal déterminé. Au niveau du bâtiment, grâce au système de gestion d'énergie, on arrive à obtenir une solution permettant une dégradation maîtrisée du confort de l'utilisateur en suivant les contraintes imposées par le GRD.

B. Mécanisme de pilotage multi-échelle

Dans le problème de prévention des blackouts, la plus grande difficulté est de traiter le problème d'optimisation de grande taille en respectant les contraintes de temps de réponse très court avec un ordre de grandeur de moins de 10 secondes. L'origine de cette contrainte de temps de réponse provient des caractéristiques du blackout. Dans certains blackouts, il peut arriver que

le temps entre la phase de pré-condition et la phase de cascade rapide soit inférieure à 30 secondes (Blackout en Italie du 12 Janvier 2003). En conséquence, si le système ne récupère pas l'énergie nécessaire dans un temps très court, cela risque probablement de produire un blackout dans le réseau de transport.

Notre idée principale est d'utiliser l'architecture de conduite introduite dans [4] en ajoutant un niveau de coordination de la consommation pour différents bâtiments. Ce mécanisme de pilotage permet de découper le problème suivant plusieurs échelles soit spatiales soit temporelles. Chaque couche de commande embarque une connaissance de son contexte qui n'est pas partagée avec les autres couches : les couches ne communiquent que par des flux d'informations très synthétiques. Cette organisation permet de mieux gérer les problèmes de grande taille, de plus, les aspects confidentiels ou privés des informations dans les bâtiments sont respectés. En assemblant les résultats de différentes couches, on retrouve la solution globale approchée tout en ayant un temps de calcul relativement faible pour assurer la réactivité du système.

1) *La couche de gestion d'énergie dans le bâtiment*: Nous supposons que l'ensemble des bâtiments connectés au réseau dispose d'un système de gestion d'énergie intégré. Une interface de communication entre le bâtiment et le GRD permet d'échanger des informations. L'idée de communiquer la satisfaction du gestionnaire de réseau aux différents consommateurs est abordée dans [5]. Une amélioration de ce mécanisme est abordée ici pour réduire la phase d'échange de messages. La satisfaction $S_{\mathcal{B}}(i, k)$ du bâtiment \mathcal{B}_i reflète la satisfaction de l'utilisateur par rapport à la stratégie de délestage du GRD. Elle est calculée par le système de gestion. Supposons que le bâtiment \mathcal{B}_i propose un ensemble de services $Svr(j), j \in \{1, \dots, \mathcal{N}_i\}$. La satisfaction $S_{\mathcal{B}}(i, k)$ est calculée à partir de la satisfaction du service le moins satisfait en sachant que le critère de satisfaction est un critère à minimiser :

$$S_{\mathcal{B}}(i, k) = \text{Max} \{S(Svr(j)) \mid \forall j \in \{1, \dots, \mathcal{N}_i\}\} \quad (1)$$

L'affectation dynamique dans le bâtiment est réalisée par la couche réactive présentée dans [6].

2) *La couche de commande du GRD*: Supposons que le GRD dispose d'un mécanisme de pilotage qui se situe à un niveau plus haut que le mécanisme de gestion de l'énergie dans le bâtiment. On prend également pour hypothèse que le délestage optimal a été effectué en imposant une puissance consommée maximale au GRD, et ce seuil est noté $\overline{P_g(k)}$. Pour simplifier le problème, on suppose que la puissance consommée dans le bâtiment est purement active. Le GRD joue le rôle de fournisseur d'électricité pour un ensemble de bâtiments $\mathcal{B}_i, i \in \{1, \dots, \mathbf{N}\}$. La puissance consommée à l'instant k dans le bâtiment \mathcal{B}_i est notée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$. La contrainte de ressource maximale du GRD est écrite sous la forme :

$$\sum_{i=1}^{\mathbf{N}} P_{\mathcal{B}}(i, k) \leq \overline{P_g(k)} \forall k \quad (2)$$

On suppose que chaque bâtiment \mathcal{B}_i a une limite inférieure de puissance consommée $\underline{P_{\mathcal{B}}(i)} > 0$ qui est une réserve nécessaire pour alimenter les besoins critiques dans le bâtiment. Le seuil supérieur de puissance consommée noté $\overline{P_{\mathcal{B}}(i)}$ correspond à la puissance souscrite avec le fournisseur d'énergie. La contrainte de puissance affectée au bâtiment \mathcal{B}_i doit respecter la contrainte suivante :

$$\overline{P_{\mathcal{B}}(i)} \geq P_{\mathcal{B}}(i, k) \geq \underline{P_{\mathcal{B}}(i)} \forall i, \forall k \quad (3)$$

a) *Régulation des puissances affectées $P_{\mathcal{B}}(i, k)$* : A chaque période k , le système de gestion d'énergie dans le bâtiment remonte une information concernant la satisfaction ou le confort de l'utilisateur notée $S_{\mathcal{B}}(i, k)$. Le GRD va interpréter cette information pour redistribuer l'énergie en fonction de la satisfaction courante.

En général, les charges dans le bâtiment fonctionnent selon un mode tout ou rien. En conséquence, la puissance consommée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ de chaque bâtiment est une variable entière qui est générée par la combinaison des consommations des équipements. Supposons qu'un équipement dans le bâtiment a deux états différents soit activé, soit désactivé. La combinaison de toutes les possibilités de contrôler \mathcal{N} équipements est $2^{\mathcal{N}}$. En évitant l'explosion combinatoire, nous proposons une relaxation sur la variable $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ en considérant cette variable comme continue.

La conséquence de cette relaxation est que la puissance consommée réellement $p_{\mathcal{B}}(i, k)$ par le bâtiment \mathcal{B}_i pourrait effectivement être inférieure à la limite de puissance déterminée par le GRD, alors que la limite de puissance affectée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ n'est pas utilisée totalement. L'efficacité du système pourrait être améliorée en reprenant la puissance non-utilisée $P_{\mathcal{B}}(i, k) - p_{\mathcal{B}}(i, k)$ pour l'affecter à un autre bâtiment. Pour minimiser cet effet, on définit la notion suivante :

b) *Définition 1*: L'efficacité de l'affectation de puissance du bâtiment \mathcal{B}_i est définie par l'équation suivante :

$$\eta_{\mathcal{B}}(i, k) = \begin{cases} \frac{P_{\mathcal{B}}(i, k)}{p_{\mathcal{B}}(i, k)} & \text{Si } p_{\mathcal{B}}(i, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } p_{\mathcal{B}}(i, k) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Les échanges de puissance non-utilisée sont réalisés par le programme linéaire suivante

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^N (\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)) \times P_{\mathcal{B}}(i, k) \right. \\ \text{Pour que} \\ \sum_{i=1}^N P_{\mathcal{B}}(i, k) \leq \overline{P_g(k)} \forall k \\ \left. \overline{P_{\mathcal{B}}(i)} \geq P_{\mathcal{B}}(i, k) \geq \underline{P_{\mathcal{B}}(i)} \forall i, \forall k \right. \end{array} \right. \quad (5)$$

L'objectif du programme linéaire (5) est de maximiser l'efficacité de l'affectation de la puissance du GRD. Le coefficient $\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)$ est utilisé pour appliquer une heuristique visant à affecter plus d'énergie au bâtiment qui est le moins satisfait en utilisant la puissance affectée le moins efficacement. La fonction objectif du programme linéaire (5) est sous la forme d'une somme de variables multipliées par des coefficients. La solution optimale du problème a tendance à privilégier les variables ayant les plus grandes. En conséquence, la programmation linéaire (5) va assigner une puissance plus grande aux bâtiments ayant la somme $\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)$ plus grande. En fait, ce bâtiment est prioritaire parce que la puissance affectée est insuffisante pour qu'il réalise certains services. En conséquence le critère de confort est dégradé. Le principe de cette programmation linéaire est simple mais approprié au problème traité. Elle permet de traiter un problème de grande taille avec un temps de calcul qui est relativement faible.

III. MISE EN ŒUVRE

A. Structure du simulateur

Dans un premier temps, on a cherché à valider nos résultats de recherche avec un simulateur. Dans le cadre de la coopération avec le G2ELAB, on propose un simulateur composé de trois éléments principaux :

- Un simulateur de réseau qui consiste à simuler le comportement du réseau de transport par le logiciel Eurostag
- Un algorithme de délestage optimal du réseau du transport qui est écrit sous Matlab
- Un mécanisme de délestage entre le GRD et le système de gestion d'énergie dans le bâtiment est implémenté dans le langage Java en utilisant la programmation multithreading pour modéliser l'évolution des charges dans les bâtiments. Chaque équipement et bâtiment évolue indépendamment des autres. Cela permet d'avoir un comportement dynamique de la consommation et une gestion d'énergie plus réaliste.

Pour l'instant, les trois simulateurs communiquent par l'intermédiaire de Matlab, le temps de de l'envoi des messages dans le réseau d'information est considéré comme négligeable.

B. Exemple d'application

Exemple 1 : Pour faciliter la visualisation des résultats du simulateur, nous prenons un exemple académique composé de 2 habitats différents qui sont gérés par un GRD. On simule le comportement de la consommation du bâtiment en période de pic de consommation en hiver. Pour avoir une modélisation plus proche de la réalité, on suppose que, durant cette période, les consommations des services de chauffage et des services de cuisson sont dominantes au niveau du secteur résidentiel.

Dans chaque maison, deux types de charges sont modélisées : les systèmes de chauffage électrique qui représentent un service permanent et des services temporisés illustrés par des services de cuisson de type four ou plaque chauffante. On suppose que ces équipements sont interruptibles. On suppose aussi que les modèles de la zone thermique sont identiques avec un temps d'échantillonnage $T_s = 1$ seconde et chaque service de chauffage a une puissance de 1 kW :

$$\begin{bmatrix} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,028 \\ 0,0085 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,00047 & 0,039 & 0,014 \\ 2 \times 10^{-6} & 0,00029 & 6,06 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_s \\ P_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

Le service de cuisson est modélisé par un modèle thermique du premier ordre. La commande locale joue le rôle de régulateur de température de la plaque chauffante autour de 250°C. La puissance consommée par la plaque chauffante est de 2kW.

$$T_f(k+1) = 0,99T_f(k) + 2,05P_f \quad (7)$$

Le premier habitat compte 4 services de chauffage $\{Svr(1), Svr(2), Svr(3), Svr(4)\}$ et un service de cuisson $Svr(5)$. Le deuxième habitat ne dispose que de trois services de chauffage $\{Svr(6), Svr(7), Svr(8)\}$. Le scénario de simulation consiste à baisser la puissance limite proposée par le GRD pendant 42 minutes pour expérimenter le mécanisme de pilotage multi-échelle composé du GRD et des deux habitats.

Le résultat est illustré dans la figure 3. On commence avec une puissance maximale égale à 10kW, ensuite nous réduisons la puissance maximale $\overline{P_g(k)}$ par pas de 1kW à chaque fois. Nous conduisons la simulation jusqu'à l'état critique de 3kW pour voir son impact sur les consommateurs. Le moment de la réduction de puissance est généré aléatoirement pour tester la réactivité du système. On constate d'abord que cette réactivité est largement suffisante pour répondre aux contraintes nécessaire à la prévention d'un blackout. Ensuite en regardant le critère de satisfaction de l'utilisateur, on constate qu'il y a une légère

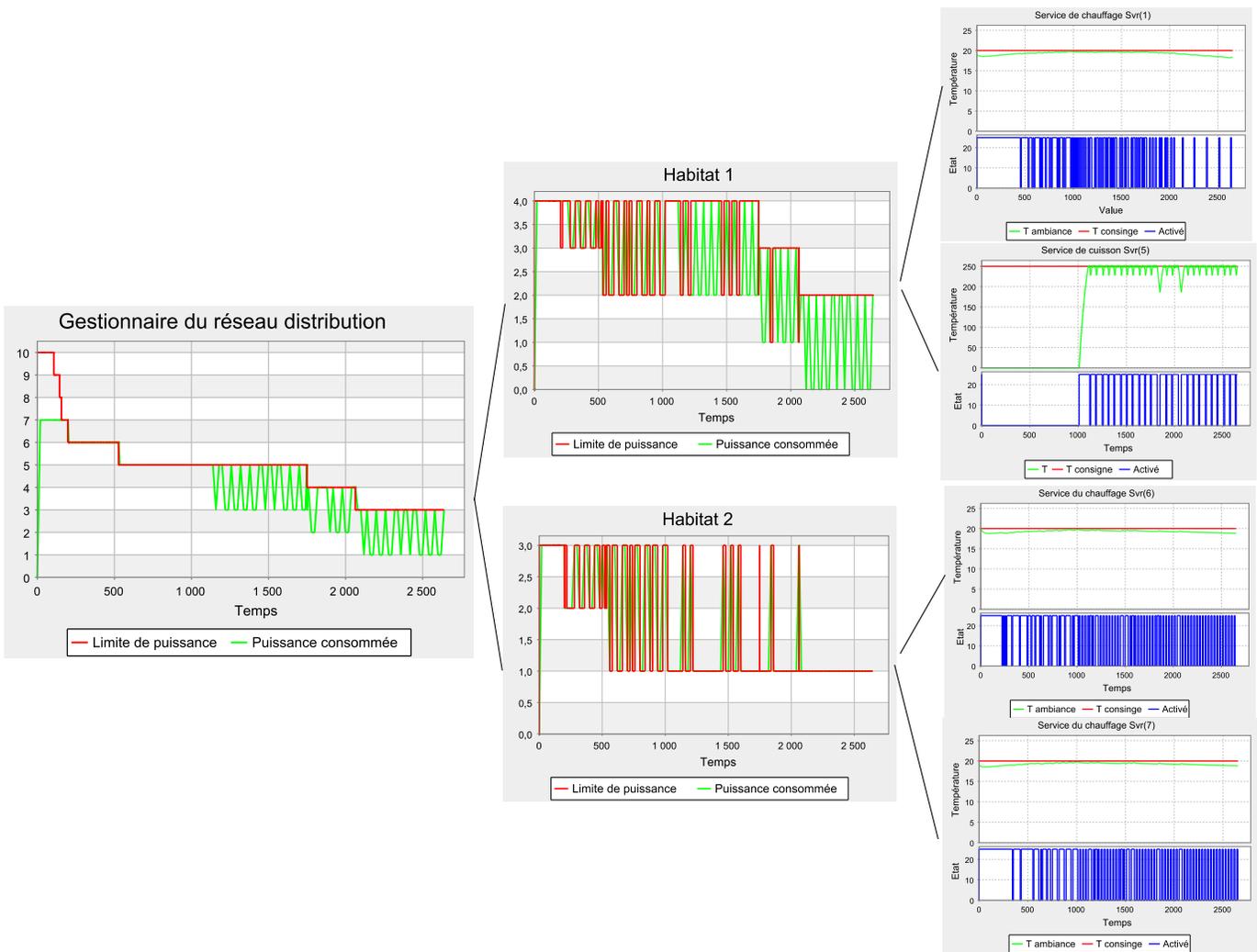


Fig. 3. Résultat de simulation sur l'exemple 1

dégradation du confort reflétée par une baisse de la température ambiante dans la zone thermique et de la température de la plaque chauffant. Le comportement des 7 services de chauffage étant assez similaires, nous n'avons pris que trois services pour l'illustration. Mais le plus intéressant à observer est que le critère de satisfaction pour les différents services dans les deux habitats sont équilibrés : aucun service n'est plus pénalisé que les autres. Dans habitat 1, on peut observer une dégradation de la satisfaction du service $Srv(1)$ par rapport au service de cuisson $Srv(5)$ car le service de cuisson a une configuration plus prioritaire que les services de chauffage.

En comparant l'affectation des puissances entre les deux habitats, nous pouvons observer que l'affectation de la puissance est fonction de la puissance disponible et de la satisfaction des différents services. Nous observons que l'affectation de l'énergie est plus favorable à l'habitat 2 tout simplement parce qu'à l'origine l'habitat 1 a une charge plus importante que celle de l'habitat 2.

Exemple 2 : Partons du même principe que dans l'exemple 1. Nous voulons cette fois simuler un problème à grande échelle pour avoir une vision plus réaliste du problème. Une simulation de 400 habitats est effectuée, avec deux types de maisons différentes : 200 maisons correspondent à l'habitat 1 qui contient 4 services interruptibles et 200 maisons sont du type de l'habitat 2 composées de 3 services interruptibles. Le simulateur doit exécuter une grande quantité de processus en parallèle pour simuler les 400 habitats : 1400 services de chauffages, 200 services de cuisson et un GRD. Le pic de puissance consommée totale peut atteindre théoriquement 1,8GW.

Le résultat de la simulation est illustré par la figure 4. Pour l'ensemble de 400 habitats gérés par GRD, on choisit aléatoirement deux habitats pour illustrer l'impact de la gestion sur le confort de l'utilisateur. On suppose que la consommation dans le bâtiment se produit durant la période de pic de consommation. La prévention du blackout a imposé une contrainte forte sur chaque GRD. La puissance maximale $\overline{P}_g(k)$ est fixée d'abord à 1,2GW. Ensuite, nous prenons un scénario pour réduire ce seuil de la même manière que celle expérimentée dans l'exemple 1. La période $[866, 1028]$ est une période critique lorsque $\overline{P}_g(k)$

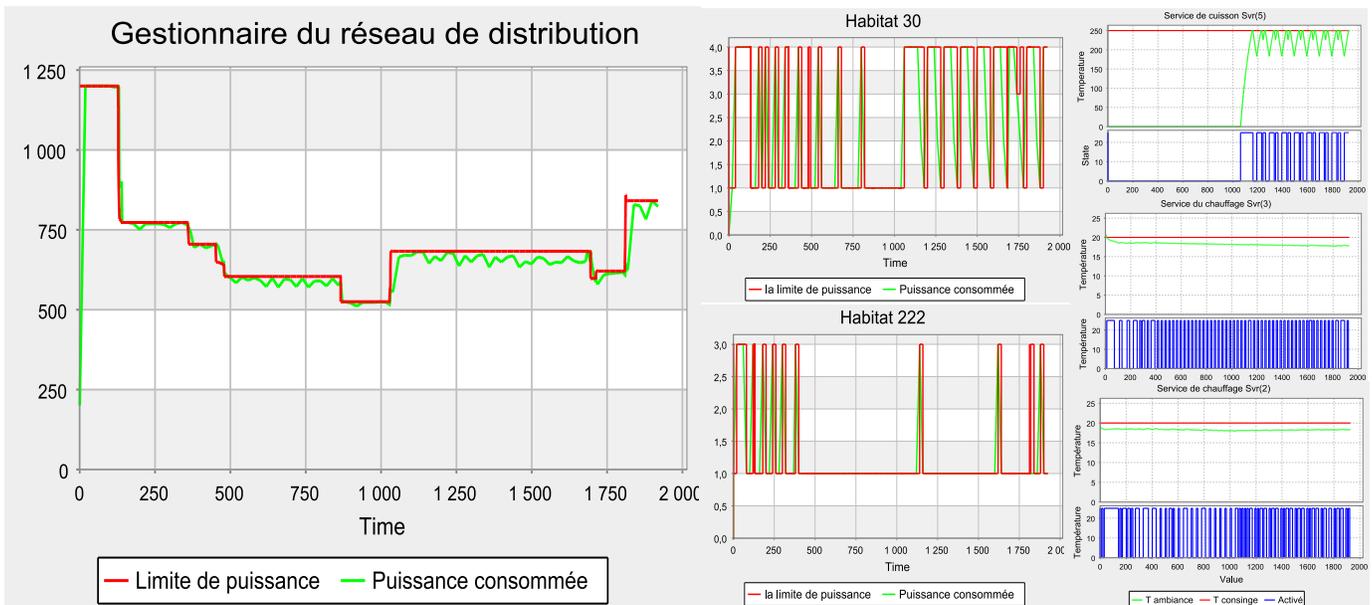


Fig. 4. Résultat de simulation sur l'exemple 2

descend à 0,525 GW (30% de la puissance maximale consommée), durant cette période, la puissance maximale consommée de chaque habitat est presque au niveau le plus bas : 1kW. Pourtant, la température dans les pièces reste au niveau acceptable de 18,5 °C. La température de la plaque chauffant reste entre 200°C et 250°C. Pour constater la réactivité du mécanisme de gestion d'énergie, on observe que même si le calculateur doit traiter une grande quantité de calculs en parallèle, la contrainte du temps de réponse est toujours respectée. La puissance consommée reste très proche de la puissance limite, ce qui signifie que la ressource affectée est distribuée efficacement.

IV. CONCLUSION

Même si, au premier abord, l'impact de la gestion de l'énergie dans une habitation peut paraître limité, nous avons montré à travers la gestion des blackouts qu'un parc de logements équipés de systèmes de gestion de l'énergie pouvait permettre aux gestionnaires de réseaux de mieux réagir face aux situations de blackout. En effet, ces systèmes de gestion ouvrent de nouvelles perspectives aux fournisseurs d'énergie qui ont désormais un moyen de limiter la consommation de leurs clients. Cette souplesse inattendue pour un fournisseur d'énergie peut lui permettre d'optimiser sa production, en réduisant ses coûts ou en réduisant les émissions de gaz à effet de serre en évitant le plus possible d'avoir recours à des énergies polluantes et coûteuses.

REFERENCES

- [1] U.-C. PSOTF, "Final report on the august 14, 2003 blackout in the united states and canada : Causes and recommendations," U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Tech. Rep., 2004.
- [2] W. Lu, Y. Bésanger, E. Zamai, and D. Radu, "Analysis of large scale blackouts and recommendations for prevention," *WSEAS Transactions on power systems*, vol. 1, 2006.
- [3] —, "Blackout : Description, analysis and classification," in *6th WSEAS Int. Conference on POWER SYSTEMS, PE'06 September 22-24 2006, Lisbon, Portugal.*, 2006.
- [4] D. L. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino, "A home automation system to improve the household energy control," in *INCOM2006 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2006.
- [5] S. Abras, S. Ploix, S. Pesty, and M. Jacomino, "A multi-agent home automation system for power management," in *The 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Setubal, Portugal, 2006.
- [6] D. L. Ha, "Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation," Ph.D. dissertation, Ecole Doctorale EEATS Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal, INPGrenoble, September 2007.