

Scénarios pour un Micro Smart Grid Autonominique

Sylvain Frey^{1 2}
Ada Diaconescu¹

François Huguet¹
David Menga²

Isabelle Demeure¹
Cédric Mivielle¹

¹ Télécom ParisTech – CNRS LTCI
46, rue Barrault
75634 Paris Cedex 13 FRANCE

{prénom}.{nom}@telecom-paristech.fr

² EDF R&D

1, Avenue du Général de Gaulle
92140 Clamart FRANCE

{prénom}.{nom}@edf.fr

RÉSUMÉ

L'informatique autonome est une vision inspirée par la biologie, qui tente de répondre aux problématiques croissantes de complexité dans les systèmes informatiques modernes, hétérogènes, dynamiques et à grande échelle. Ce domaine récent recherche aujourd'hui la maturité en se confrontant à des applications concrètes qui mettraient en avant ses avancées dans la gestion de la complexité.

Nous pensons que le cas des *micro smart grids* - réseaux électriques intelligents à l'échelle d'un quartier - constitue un défi à la mesure des ambitions autonomiques, ce que nous nous proposons d'illustrer à travers divers scénarios. Ce travail de mise en scène des capacités autonomiques, inédit dans le cadre *smart grid*, révèle les verrous - mais aussi les perspectives nouvelles - inhérents à la mise en œuvre de ces nouveaux types d'écosystèmes.

Categories and Subject Descriptors

J.7 [Computer Application]: Computers in Other Systems – *command and control, consumer products.*

General Terms

Design, Experimentation, Human Factors.

Keywords

informatique autonome, scénario, vision, systèmes décentralisés, micro smart grids.

1. INTRODUCTION

Avec la démocratisation de l'informatique, l'explosion d'Internet et aujourd'hui la diffusion à grande échelle d'équipements mobiles communicants - *smart phones*, tablettes, etc. - la complexité des systèmes et environnements informatiques ne cesse de s'accroître. Les composantes de cette complexité sont multiples : hétérogénéité, dynamisme, grand nombre des équipements, mais aussi présence d'utilisateurs humains, eux-mêmes complexes et imprévisibles, au centre des systèmes informatiques. Il est donc nécessaire de proposer des solutions d'une part à la complexité

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.
UbiMob'11, June 6–8, 2011, Toulouse, France.

intrinsèque des systèmes informatiques (du point de vue du concepteur, de l'administrateur, en un mot de l'expert) et d'autre part à la complexité apparente, perçue par l'utilisateur humain (non-expert).

L'informatique autonome est une vision [1,2] qui propose des solutions conceptuelles et pratiques à la gestion de la complexité. L'essor de ce domaine a apporté de nombreuses contributions [3] à la compréhension et à la conception de tels systèmes complexes. Cependant, faute de *killer application*, la révolution annoncée par les fondateurs a fait long feu [4]. Le vision autonome peine aujourd'hui à se concrétiser au-delà de preuves de concept, et la diffusion du domaine dans le monde industriel piétine.

Il est donc crucial pour la communauté autonome de progresser dans la direction de l'applicabilité de ses solutions. Notamment, l'ingénierie sera au cœur des apports qui permettront au domaine autonome d'accomplir la destinée esquissée par ses fondateurs [4]. Dans cette optique, nous pensons que l'élaboration de scénarios, réalistes et complexes, représente une étape préliminaire importante dans la compréhension des systèmes en jeu. A partir de ces scénarios, une analyse de la complexité et des enjeux de conception ouvrira la voie à une démarche d'ingénierie, en permettant le prototypage de ces systèmes.

Le *smart grid* [5] est le réseau électrique du futur, issu de l'augmentation des réseaux actuels par des systèmes d'information sophistiqués. Sa conception et sa réalisation posent de nombreux problèmes, entre autres de complexité, aux spécialistes du domaine. De nombreuses évolutions seront nécessaires avant de parvenir à un réseau efficace, robuste, et à grande échelle. Dans le même temps, le domaine manque de visibilité quant aux conséquences techniques, sociales et économiques qui accompagneront l'émergence de ces nouveaux réseaux.

Nous proposons donc le cas des *micro smart grids* – réseaux électriques intelligents à l'échelle d'un quartier – comme cadre global pour une série de scénarios. Chacun de ces scénarios sera accompagné d'une grille de lecture analysant la complexité mise en jeu. Enfin, des solutions à cette complexité, inspirées par l'informatique autonome, seront proposées et discutées. La dimension socioculturelle de ces scénarios, soulevant de nombreuses questions fondamentales pour la réalisation des *smart grids*, ne sera pas traitée ici.

L'organisation de ce papier sera la suivante : après une présentation des domaines de l'informatique autonome et des *smart grids*, chaque scénario sera exposé, accompagné d'une analyse et d'une proposition de solution. En conclusion, les implications futures de ces travaux de scénarisation et d'analyse seront discutées.

2. INFORMATIQUE AUTONOMIQUE

La vision autonome, au carrefour d'influences multiples telles que la biologie, le génie logiciel et l'intelligence artificielle, vise à améliorer la gestion de la complexité dans les systèmes informatiques modernes, hétérogènes, dynamiques et à grande échelle. Après un court résumé des principes fondateurs, certains verrous seront identifiés, qui justifieront l'utilité des scénarios présentés plus loin.

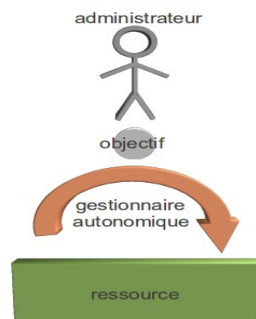
2.1 Principes fondateurs

Le système nerveux autonome, situé dans la colonne vertébrale, est un sous-ensemble du système nerveux central chez les vertébrés. Il régule en permanence, de manière inconsciente, des fonctions vitales de l'organisme telles que le rythme cardiaque, la digestion ou l'équilibre. Ainsi, le cerveau libéré de ces préoccupations de bas niveau peut se focaliser sur des tâches de haut niveau d'abstraction. Par exemple, la marche ne fait pas intervenir la gestion de l'équilibre au niveau conscient : le marcheur est concentré sur son objectif (où aller) et non sur les moyens de l'atteindre (comment y aller).

Inspiré directement par cette capacité à gérer de manière inconsciente et transparente des aspects de bas niveau d'un système complexe – l'organisme – un système informatique autonome est défini par un certain nombre de propriétés qu'il est capable de maintenir seul, sans intervention extérieure d'un administrateur humain. Ces propriétés, parfois appelées *auto-** ou *self-**, sont historiquement les suivantes [2] :

- **auto-configuration** : un système autonome peut intervenir sur lui-même et s'adapter à son contexte de manière proactive, sans intervention extérieure ;
- **auto-protection** : un système autonome se protège contre les menaces extérieures et anticipe les variations de son environnement ;
- **auto-réparation** : un système autonome détecte et répare ses erreurs internes ;
- **auto-optimisation** : un système autonome cherche en permanence à accomplir au mieux les tâches pour lesquelles il a été conçu.

Illustration 1 : Architecture de référence d'un élément autonome



L'architecture de référence d'un élément autonome est celle d'une boucle de rétroaction, appelée gestionnaire autonome. Celui-ci fournit une interface de haut niveau à l'administrateur, qui peut exprimer des objectifs de haut niveau pour la ressource. Étant donné ces objectifs, éventuellement contradictoires et

dynamiques, le gestionnaire supervise et adapte la ressource en conséquence. La gestion autonome se doit d'être transparente : si idéalement l'humain n'a jamais à intervenir pour des aspects de bas niveau, il peut tout de même reprendre la main à tout instant s'il le désire.

2.2 Évolutions, verrous

Un élément autonome, dans sa forme de référence, est donc constitué d'un couple ressource-gestionnaire autonome suivant un objectif de haut niveau. Cependant, les systèmes actuels – hétérogènes, à grande échelle, dynamiques, ouverts – amènent à considérer une complexité grandissante :

- de multiples ressources, avec des modes de fonctionnement et des usages différents, voire incompatibles, avec des nécessités de collaboration pour un résultat global ;
- de multiples boucles autonomiques, adressant des aspects de gestion particuliers (performance, énergie, sécurité, etc.) à de multiples niveaux de granularité (ressource, organisation de ressources, zone géographique, etc.) ;
- de multiples objectifs, potentiellement incompatibles, avec diverses priorités, et concernant divers ensembles d'éléments autonomiques ;
- de multiples humains non-experts, à la fois utilisateurs et administrateurs.

Les interactions parfois ambiguës entre ces entités se multipliant de manière incontrôlable, il devient difficile, voire impossible, d'appréhender le fonctionnement de tels systèmes – a fortiori, de les concevoir de manière traditionnelle. L'architecture de référence ne suffisant pas à guider la conception de multiples éléments autonomiques en interaction, de nouvelles propositions architecturales seront nécessaires dans le domaine.

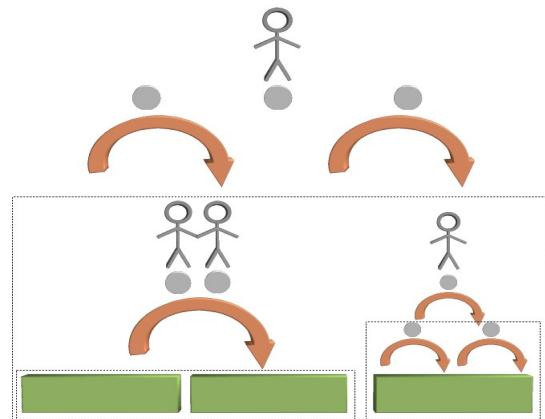


Illustration 2 : Système autonome complexe, composé de multiples éléments autonomiques.

Nous proposons donc d'établir des scénarios accompagnés de grilles de lecture et de propositions architecturales adaptées, avec pour but d'avancer dans la compréhension de la complexité et de sa gestion dans un cadre autonome.

3. MICRO SMART GRIDS

Cette partie présente une vision simplifiée des réseaux électriques et de la problématique de la gestion active de la demande.

3.1 Gestion active de la demande

Le réseau électrique peut s'assimiler à un graphe dont les arêtes (lignes haute tension, câbles domestiques, etc.) transportent l'énergie électrique depuis les nœuds producteurs (centrales, éoliennes, panneaux photovoltaïques, etc.) jusqu'aux nœuds consommateurs : appareils ménagers, éclairages, chaudières, etc. Certains nœuds sont à la fois consommateurs et producteurs, on parle alors de « prosumateur » ou « *prosumer* » ; c'est notamment le cas des stocks (batteries, centrale hydroélectrique, ballons d'eau chaude, etc.) qui peuvent consommer une certaine quantité d'énergie, puis la restituer ultérieurement.

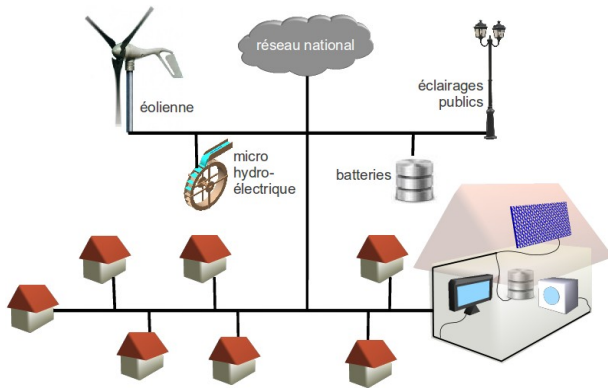


Illustration 3 : Exemple de réseau électrique de quartier, avec le sous-réseau d'un foyer représenté.

Ici, la taille du réseau considéré sera limitée à l'étendue d'un quartier, éventuellement d'une résidence ou d'un campus. Ainsi, on peut considérer différentes granularités :

- les réseaux particuliers, à l'intérieur d'une habitation ou d'un bâtiment ; ces réseaux sont délimités par un compteur, qui identifie et mesure les échanges électriques avec l'extérieur ;
- le réseau du quartier, qui comprend et relie entre eux les réseaux particuliers ;
- le réseau national, englobant le réseau de quartier.

Outre l'aménagement et l'entretien, il est nécessaire de contrôler à tout instant la *charge* des réseaux, en particulier, que production et consommation s'équilibrent. Un écart trop important entre ces deux valeurs peut entraîner la détérioration des équipements, voire des arrêts en cascade (*black-out*). Concrètement :

- quand la charge est haute (consommation supérieure à la production), la puissance fournie par les producteurs est augmentée, de nouveaux moyens de production sont démarrés, les consommations en cours sont réduites, arrêtées ou reportées.
- quand la charge est basse (production supérieure à la consommation), la puissance fournie par les producteurs

est réduite, certains moyens de production sont éteints, les consommateurs qui le peuvent se déclenchent prématurément.

Les moyens de stockage jouent ici un rôle de tampon, se comportant comme consommateur ou producteur en fonction de la situation, dans la limite de leur capacité de charge maximale. La gestion d'un réseau électrique ne consiste donc pas uniquement à limiter les consommations et maximiser les productions, mais bien à gérer leur répartition dans le temps.

3.2 Micro smart grid

L'augmentation incessante des volumes consommés rend la gestion globale du réseau électrique de plus en plus coûteuse et complexe. L'écart entre les creux et les pics de consommation (e.g. lors des soirées d'hiver) oblige les fournisseurs à surdimensionner leurs moyens de production, pour pouvoir faire face à une demande maximale rare mais toujours plus élevée.

Dans le même temps, des équipements de production et de stockage (panneaux solaires, éoliennes, batteries, etc.) vont faire leur apparition sur le marché. Les sous-réseaux particuliers, jusqu'alors exclusivement consommateurs, commencent à acquérir la capacité de participer à la gestion active de la charge. Se pose alors le problème de la gestion de millions de moyens de production et de stockage additionnels, détenus par des particuliers donc moins contrôlables que les moyens traditionnels. En effet, pour des raisons, entre autres, de respect de la propriété et de la vie privée, il ne sera pas toujours possible d'intervenir directement sur les équipements en jeu.

Pour faire face aux défis de gestion que représentent les réseaux électriques dans un futur proche, la vision *smart grid* propose le doublage du réseau électrique traditionnel par un réseau informatique via lequel s'effectue une gestion intelligente de la charge électrique. L'appellation *micro smart grid* s'applique aux réseaux de la granularité considérée ici (quartier, résidence) [5].

Dans un *micro smart grid*, chaque foyer est acteur du réseau en revendant sa production ou en adaptant sa consommation en fonction de la charge. Le système qui gère le réseau du quartier rend compte en direct de la charge qui détermine les tarifs de vente et d'achat en cours, en fonction des abonnements des usagers. Les productions et consommations des foyers sont mises en relation, permettant ainsi une gestion fine de l'offre et de la demande, pratiquement usage par usage.

La nature de la gestion du quartier et les règles qui y régissent les échanges énergétiques restent encore à déterminer. Ces questions sont d'ordre économique, politique, sociétal et commercial, nous ne les aborderons pas ici. Les scénarios présentés plus loin seront donc agnostiques à ce sujet, et ouverts à des analyses futures de ces aspects.

Au final, une gestion efficace de la charge est bénéficiaire pour tous les acteurs du *micro smart grid* :

- les particuliers, par une meilleure gestion de leurs productions et consommations, réduisent leur facture énergétique tout en prenant part activement à l'établissement d'un réseau électrique plus efficace pour tous ;

- le réseau de quartier permet l'inter-médiation entre les participants au *micro smart grid*, valorise les équipements publics locaux et réduit l'empreinte énergétique du quartier vis à vis du réseau national ;
- le réseau national est soulagé de la gestion électrique du quartier, qui est capable de s'adapter au mieux à la charge nationale : le *micro smart grid* contribue donc aussi directement au *smart grid* global.

3.3 Autonomique pour le micro smart grid

Les scénarios présentés ici visent à mettre en scène la vision *micro smart grid* en tant qu'exemple canonique de système complexe, tout en proposant des solutions autonomiques à la gestion de cette complexité. Notamment, les idées autonomiques et *micro smart grid* se rejoindront sur les points suivants :

- les équipements doivent prendre des décisions, en fonction d'objectifs de haut niveau (consommation, production, qualité de service, sécurité, etc.) et d'un contexte local imprévisible ; ils doivent être capable de collaborer pour réaliser une gestion efficace de la charge ; le caractère intrinsèquement ouvert du réseau électrique doit être prise en compte ;
- il est nécessaire de mettre en jeu des gestionnaires de haut niveau, à portée étendue (pièce, domicile, quartier, etc.) dans divers domaines (gestion de la température, de la sécurité, etc.) ;
- la gestion doit prendre en compte la présence d'humains : administrateurs et utilisateurs, éventuellement non-experts des domaines en jeu.

4. SCENARIOS & ANALYSES

Plusieurs scénarios sont présentés ici suivant une logique de complexité croissante, en considérant successivement un équipement unique, un foyer, puis le quartier tout entier. Certains des éléments utilisés, notamment les équipements intelligents ou la tarification dynamique, n'existent encore qu'à l'état de projet. Cependant, ils font partie de la vision *smart grid* et feront leur apparition au cours des années à venir [5,7].

Les scénarios sont accompagnés d'analyses des difficultés clefs, en termes de fonctionnalités nécessaires à la réalisation des systèmes mis en scène. Ces analyses sont suivies de propositions de solutions architecturales : nous ne traiterons pas de la réalisation des fonctionnalités requises, mais d'une approche générale quant à leur agencement dans un ou plusieurs systèmes autonomiques.

4.1 Scénario « chauffage »

A l'occasion de travaux de rénovation, Mark a investi dans un chauffage au sol dit « intelligent ». Grâce à un ensemble de capteurs, le système peut recevoir une consigne de température qu'il maintient au plus près. Un ballon d'eau chaude peut

accumuler de la chaleur qui est ensuite restituée, en fonction du coût de l'électricité, des consignes de Mark, de la présence des occupants dans l'appartement, de la température effective, de la météo. Mark a également activé une fonctionnalité de géolocalisation ; connaissant sa position, le système peut réduire la température pendant ses absences, et s'assure d'un retour à la normale pour son arrivée.

Mark peut suivre en direct l'évolution de son système : consommation électrique, température souhaitée et température réelle, économies réalisées grâce au stockage. L'investissement de départ a été conséquent, mais Mark perçoit vite la différence sur sa facture. Des prévisions sur plusieurs mois lui permettent d'anticiper l'amortissement de son chauffage. Outre l'aspect écologique des réductions de consommation, le régulateur s'adapte aux besoins des occupants à partir d'instructions simples. En consultant l'historique, Mark s'est rendu compte que certains réglages ponctuels qu'il effectuait manuellement – par exemple, dans sa salle de bains – ont été intégrés par le système, qui anticipe désormais sa douche matinale.

Curieux, Mark s'est aventuré à jouer avec les fonctionnalités les plus avancées du régulateur. Celui-ci lui a proposé divers profils de gestion, privilégiant le confort, les économies d'énergie ou les réductions de facture. Après plusieurs expérimentations, Mark s'est décidé pour un mode très économe qui a encore plus réduit ses dépenses énergétiques. Et lorsqu'il reçoit de la visite, le système restaure automatiquement des conditions de confort plus convenables.

Analyse : Ce scénario soulève les difficultés suivantes :

- la gestion des **conflits** entre les **objectifs** et le **contexte** dynamique et imprévisible de l'équipement considéré ;
- la nécessité d'**anticiper** ce contexte, et notamment de développer des capacités d'**apprentissage**.

L'équipement mis en scène est soumis à deux objectifs variables et contradictoires, « maintien de la température » contre « limitation de la consommation électrique », dans un contexte dynamique et imprévisible. Ce contexte doit être mesurable par le système : capteurs de température, mesure de la consommation électrique, de la charge, du stock courant, éventuellement capteurs de présence et géolocalisation. La mesure de ce contexte est par nature imprécise et doit prendre en compte de possibles erreurs (mouvements non identifiés dans une pièce, panne de GPS, etc.).

Le système doit non seulement s'adapter au contexte (température, charge du foyer) mais il doit être aussi capable de le prévoir pour parvenir à une gestion efficace de son stock. Dans le scénario, le système doit anticiper le retour de Mark du travail ; il recharge son stock pendant la journée en fonction d'une prévision de la consommation pour la soirée. Cette prédiction peut nécessiter certaines capacités d'apprentissage à plus ou moins long terme, pour évaluer les besoins d'une soirée standard, les variations possibles de la demande, etc.

Des événements imprévus (pic de charge inattendu, consigne impromptue de l'utilisateur, vague de froid ou de chaleur, etc.) peuvent venir remettre en cause les prévisions et le fonctionnement normal du système. Cependant, il doit être capable d'anticiper de tels écarts, de prévoir une marge de manœuvre pour faire face aux imprévus et de réagir de manière adéquate aux perturbations extérieures. Des objectifs sophistiqués peuvent aider le système à trancher le dilemme « marge de manœuvre contre optimisation ».

Solution proposée : La gestion du système de chauffage fait intervenir deux fonctionnalités principales : le maintien de la température et la gestion du stock énergétique. Chacune fait intervenir des logiques spécifiques à son domaine : sensibilité au contexte, prévision, décision, apprentissage. Suivant le principe de la séparation des préoccupations, nous proposons donc de les isoler chacune dans une boucle autonome dépendant d'un objectif : maintien de la température ou limitation de la consommation en énergie (cf. Illustration 4).

Le découplage entre les deux boucles apporte une bonne modularité et une flexibilité qui permet le passage à l'échelle, comme nous le verrons dans les scénarios suivants. Une telle architecture décentralisée a déjà été testée dans un scénario de ce type [8]. Dans des situations plus critiques ou moins ouvertes, un gestionnaire unique – offrant un meilleur contrôle dans une logique de décision centralisée – pourrait être préférable.

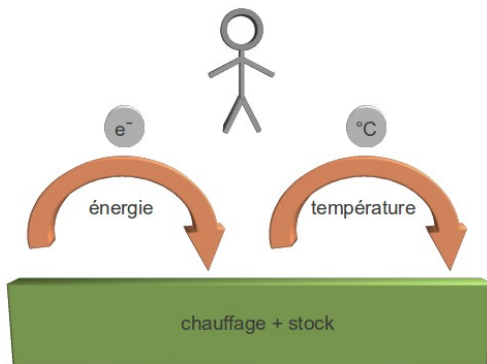


Illustration 4 : Proposition d'architecture pour la gestion autonome d'un chauffage avec stock.

Par rapport à une solution avec une boucle de gestion unique, il est nécessaire de mettre en place une logique de coordination entre les deux gestionnaires (partage des prévisions, adaptation de la gestion du stock en fonction des objectifs de confort ou vice-versa). Cette logique, résolvant le conflit intrinsèque entre les deux objectifs, peut être intégrée à chaque gestionnaire (exemple : [9]) ou être assemblée en un troisième gestionnaire contrôlant les deux premiers (exemple : [10]). Les modalités de la décision, privilégiant l'un ou l'autre des objectifs, dépendent des objectifs de haut niveau exprimés par l'utilisateur. Les avantages d'une architecture à gestionnaires multiples se révéleront plus en détails dans la suite des scénarios, où nous supposerons que la logique de résolution de conflit est distribuée entre les gestionnaires impliqués.

4.2 Scénario « chambre »

Poursuivant ses expérimentations de nouveaux équipements pour son appartement, Mark a installé dans sa chambre une fenêtre de toit (de type VELUX) sophistiquée. Pourvue d'un actionneur électrique pilotable, la fenêtre possède un contrôleur « intelligent », qui récupère les données des capteurs de température et de présence existant dans la pièce, les consignes du système de chauffage, mais aussi la météo de la région. Outre

des options de contrôle à distance, le contrôleur propose divers programmes, destinés à renouveler l'air de la pièce tout en entretenant sa température.

Le fonctionnement de la fenêtre ne posant pas de problème de sécurité, Mark lui donne l'objectif de s'ouvrir 10 minutes par jour, à condition que personne ne se trouve dans la pièce et que les conditions extérieures (température, pluie, vent) le permettent, notamment vis à vis de l'objectif de température existant. En cas de conditions continuellement défavorables, la fenêtre ne s'ouvre pas et rapporte l'événement.

En consultant l'historique de ses systèmes, Mark a pu constater que loin de mettre en péril ses objectifs d'économie d'énergie, sa nouvelle fenêtre participe au contraire à la régulation thermique ; en s'ouvrant aux moments les plus opportuns, elle soulage parfois la tâche du système de chauffage.

Analyse : Ce scénario pose les problématiques suivantes :

- l'**intégration** d'équipements divers, à petite échelle.
- la **collaboration** entre équipements pour la gestion d'un objectif commun (ici, la température).

Pour simplifier le scénario, nous considérerons que la consommation électrique de la fenêtre est négligeable et qu'elle ne participe donc pas à l'objectif de limitation des dépenses énergétiques.

Dans sa forme la plus simple, le degré d'intégration entre le chauffage et la fenêtre peut être minimal : ils n'ont aucune relation directe et interagissent au travers de leur environnement physique par leur participations respectives au maintien de la température dans la chambre. Ce type d'intégration, bien que limité, est tout à fait viable [8].

Dans une forme plus avancée, les équipements doivent partager des prédictions de leur comportement propre et se prendre en compte l'un l'autre dans leur logique de gestion. Par exemple, en période de grand froid, la fenêtre prévient le radiateur de la nécessité d'une baisse de température au cours de la journée. Le radiateur indique en retour le moment où il estime qu'il sera au mieux capable de faire face à cette baisse (car son stock est plein, la charge est basse, le retour des utilisateurs n'est pas imminent, etc.). L'accord entre les deux permet d'effectuer l'ouverture de la fenêtre au moment le plus opportun, avec une perturbation minimale, et à moindre coût, de la température de la pièce.

Cette « sociabilité » des équipements influence leur conception à la source, par la prise en compte d'interactions avec d'autres systèmes potentiellement imprévisibles et facteurs d'erreurs. Ainsi, l'intégration d'un équipement convenablement conçu dans un système plus vaste ou différent ne change pas son implémentation de manière fondamentale. Le caractère « situé » des systèmes doit donc être au centre des préoccupations des concepteurs.

Solution proposée : En reprenant la proposition du scénario précédent, la situation est la suivante : l'utilisateur spécifie trois objectifs (consommation, température, ventilation) qui sont traités par quatre gestionnaires : deux pour le chauffage et deux pour la fenêtre. Dans le cas où les deux équipements communiquent, une fonctionnalité de collaboration doit être ajoutée entre les boucles responsables de la gestion de la température (voir Illustration 5).

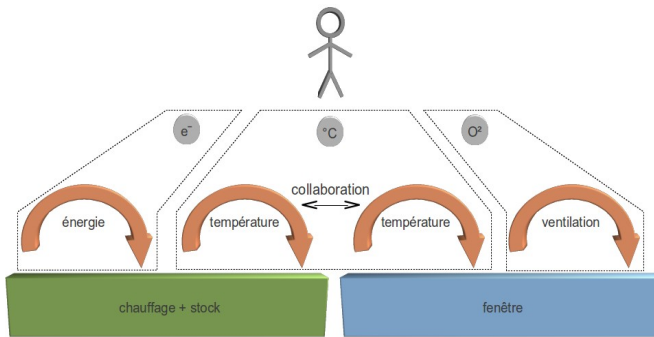


Illustration 5 : Proposition d'architecture pour la chambre autonome.

Si la fonctionnalité de collaboration demande une extension des deux gestionnaires de température, elle n'affecte en rien les deux autres boucles. Ainsi, les gestionnaires « énergie » et « ventilation » peuvent être conçus indépendamment et réutilisés, que l'équipement en question soit solitaire ou intégré avec d'autres. Les gestionnaires de température peuvent également réutiliser des fonctionnalités communes (gestion des erreurs de mesures, profils thermiques, prévisions météorologiques, etc.) voire les mutualiser.

L'architecture proposée vise à rendre le système aussi ouvert et extensible que possible. L'introduction d'un gestionnaire supplémentaire (par exemple, gestion de la sécurité pour la fenêtre) ne vient pas remettre en cause le cœur des fonctionnalités des autres gestionnaires, mais simplement la logique d'intégration entre les boucles directement en contact. L'ajout d'autres équipements concernés par un objectif donné (par exemple, pour la température : un chauffage d'appoint, une climatisation) n'affecte pas non plus les objectifs ou les gestionnaires dépendant des autres aspects (énergie, ventilation, sécurité, etc.).

4.3 Scénario « réseau de quartier »

Sal, la voisine de Mark, vient de lancer son lave-linge. Son appartement n'étant pourvu ni de moyens de production, ni de moyens de stockage, il rejoint la liste des foyers consommateurs du quartier.

Le foyer de Mark, à présent pourvu d'une batterie en complément des équipements existants, a acquis la capacité de stocker et revendre de l'électricité. Détectant une hausse de la charge du réseau du quartier, le système effectue une analyse interne pour décider des suites à donner. Il parvient aux conclusions suivantes : la batterie est chargée, la ventilation des pièces de la maison a déjà été effectuée, aucune consommation notable n'est envisagée dans l'immédiat et le stock du ballon d'eau chaude est a priori suffisant pour faire face seul à d'éventuels aléas thermiques.

Le système de Mark décide donc de consacrer une partie de la charge de la batterie à la demande extérieure. Le tarif de rachat est avantageux pour Mark ; de son côté, le foyer de Sal bénéficie d'une électricité locale, donc moins onéreuse.

Un peu plus tard, l'arrivée imprévue de Mark vient augmenter la consommation de son domicile. Entreprenant une séance de

travaux ménagers d'ordinaire réservée aux week-ends, Mark a ouvert ses fenêtres en grand. Les radiateurs, pris de court, se voient contraints de puiser dans leur stock et font même appel à la batterie pour rétablir une température confortable.

Le système de Mark n'étant plus en mesure d'honorer la demande sans risquer de préjudice à ses propres intérêts (thermiques et économiques) il cesse donc d'alimenter le quartier, qui perd un fournisseur pour les consommations de Sal.

Analyse : L'exemple du réseau de quartier est typique des organisations rassemblant des entités concurrentes, avec des objectifs propres. Chaque foyer tente de minimiser sa facture et maximiser ses profits, même si certains critères moins égoïstes peuvent entrer en ligne de compte. Dans l'absolu, le réseau de quartier n'a pas de contrôle direct sur les différents foyers ; il peut simplement inciter à la collaboration par des offres tarifaires avantageuses. Les décisions d'achat et de vente ne sont prises qu'au niveau des foyers, soumis à des contraintes internes impondérables, comme montré ici.

Le scénario introduit plusieurs difficultés importantes :

- le **passage à l'échelle** ;
- la nécessité d'une **gestion globale** ;
- l'**hétérogénéité** des domaines en interaction.

La première de ces difficultés exclut toute solution entièrement centralisée, qui ne supporterait pas, ou difficilement, la gestion de centaines de foyers prenant leurs propres décisions. De plus, sur le plan du respect de la vie privée, il n'est pas envisageable que des utilisateurs confient la gestion des équipements de leur vie quotidienne à une entité extérieure. Cette nature « bottom-up » de la gestion de la charge est un changement de paradigme profond, qui fait écho à la décentralisation des premiers scénarios.

La gestion globale est liée à l'équilibre des intérêts des différents partis (foyers, quartier, réseau national). Étant données les variations inéluctables sur le long terme (moyens de production, offre moyenne, demande moyenne, coûts de l'énergie) il est indispensable pour le réseau du quartier de se doter de moyens de mesure et de régulation globaux – offres tarifaires, moyens de production et de stockage. Les politiques de cette régulation dépendront des règles qui régissent le réseau de quartier, lesquelles sont ici volontairement laissées dans le flou.

Enfin, l'hétérogénéité des domaines en interaction apparaît au travers de la succession de perturbations en fin de scénario : le retour imprévisible de Mark, entraînant une perturbation de la température, d'où une hausse de la consommation, d'où une baisse de la production au niveau du quartier, d'où éventuellement une hausse du tarif pour le système de Sal. Cet enchaînement de conséquences illustre l'émergence de comportements imprévisibles dans les systèmes hétérogènes répartis, et plaide à nouveau pour une décentralisation des prises de décision, assortie d'une séparation des préoccupations (localisation de l'utilisateur, gestion de la température, gestion de la consommation énergétique du foyer, gestion du réseau de quartier).

Solution proposée : La solution proposée doit être compatible avec les précédentes. En effet, l'existence d'une gestion de la charge au niveau du quartier et la présence d'équipements « intelligents » dans un foyer sont des faits indépendants. Ainsi, les premiers scénarios décrivaient l'intérieur d'un foyer sans dépendre de la nature du réseau du quartier. De la même manière,

un réseau de quartier « intelligent » peut être installé sans que pour autant tous les foyers concernés ne possèdent d'équipements intelligents. Ce problème de la gestion de l'existant est une contrainte forte pour l'établissement des *smart grids*.

Nous proposons d'équiper chaque foyer d'une passerelle vers le réseau de quartier. Cette passerelle identifie le foyer et sert d'intermédiaire entre l'intérieur (privé, relevant de la gestion de l'utilisateur) et l'extérieur (relevant de la gestion du réseau du quartier). Elle pourrait se situer d'un point de vue logique au niveau du compteur électrique, qui sépare déjà réseaux publics et privés (respectivement en « amont » et en « aval » du compteur), et que certains travaux visent déjà à rendre « intelligent » [6].

Le rôle de la passerelle s'apparente à celui d'une boucle autonome : obéissant aux objectifs de l'utilisateur en termes de consommation d'énergie, elle supervise en permanence l'état du réseau du quartier, du réseau du foyer, et coordonne les productions et consommations locales avec l'état du « marché énergétique » du quartier au travers de communications de haut niveau (négociations, prévisions, transactions, etc.).

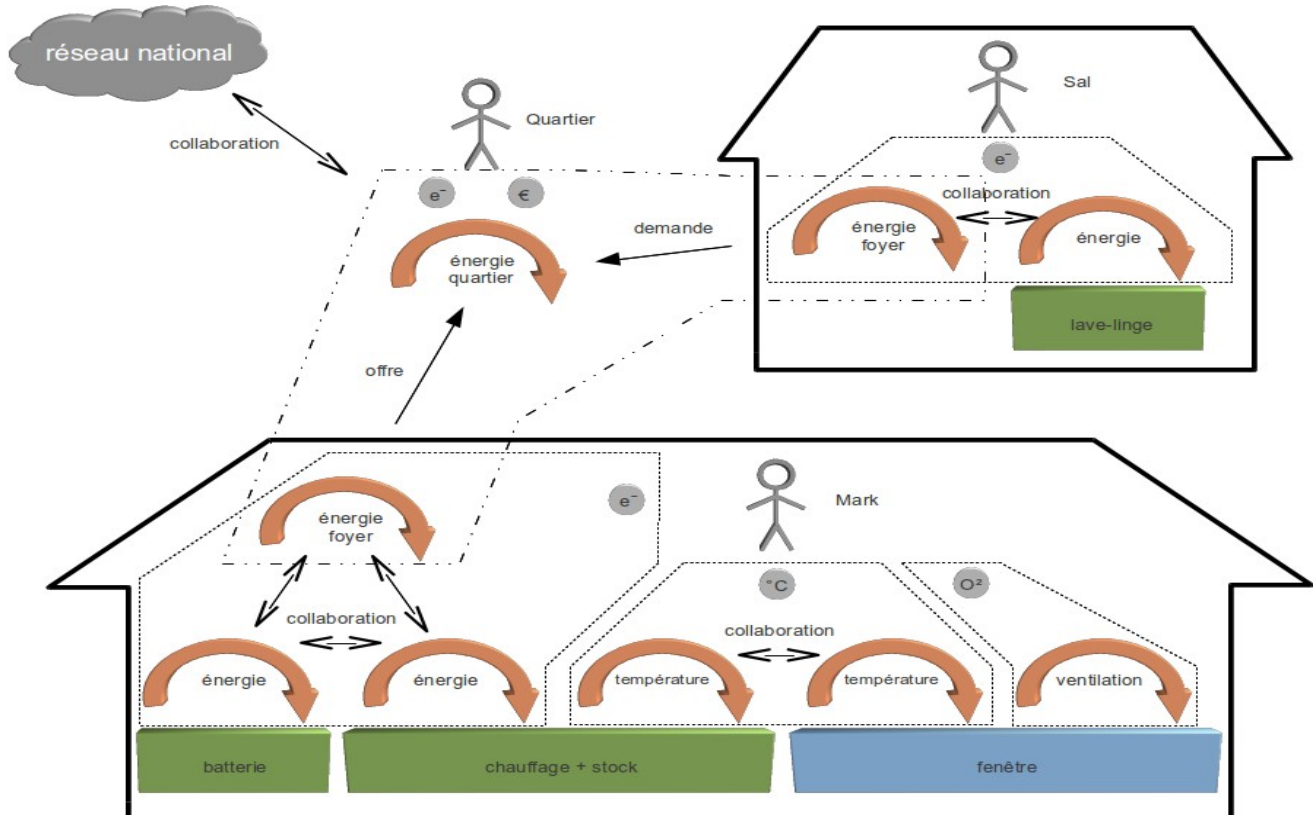
Au niveau du quartier, un gestionnaire autonome tient le rôle d'intermédiaire entre les différents foyers, en fonction de ses objectifs propres en matière de gestion énergétique, de rentabilité. Ce gestionnaire pourrait logiquement se situer au niveau du poste électrique, qui définit déjà les réseaux de taille « quartier ». C'est aussi à ce niveau que s'effectue le lien avec le réseau national pour ce qui est de la gestion de la charge à grande échelle. Cette gestion spécifique, posant notamment des problèmes de très grandes échelles, est au-delà du cadre des scénarios présentés ici, elle ne sera pas traitée.

Les relations entre les systèmes présentés dans le scénario sont complexes. À l'intérieur du foyer, la passerelle ne peut forcer directement les équipements à produire ou consommer. Son rôle se cantonne à informer les équipements de la charge du réseau du foyer, lesquels équipements prennent la décision, en fonction de cette charge et leurs propres contexte et objectifs, de produire, de consommer, etc. De même, le gestionnaire du quartier remplit un rôle similaire, en incitant les foyers à alléger ou alourdir leur charge, en fonction de la charge du quartier et de la charge nationale.

La solution proposée est structurée par les objectifs de gestion qui définissent des « domaines » (zones pointillées sur l'illustration 6). Ces domaines rassemblent tous les gestionnaires ayant une influence sur l'objectif en question, permettant ainsi l'identification des ensembles d'éléments autonomiques pertinents vis à vis d'une préoccupation donnée. Chaque domaine, avec ses règles d'administration et ses gestionnaires, peut ainsi se concevoir en séparation des autres. Les domaines interagissent entre eux au travers d'éléments autonomiques pourvus de plusieurs boucles autonomiques et appartenant donc à plusieurs domaines. Par exemple, le chauffage appartient aux domaines « température » et « électricité », avec une boucle autonome dans chacun d'eux. Les interactions entre domaines dépendent alors de la logique d'intégration entre les différentes boucles, propre aux éléments autonomiques considérés (cf. scénario « chauffage »).

A noter également que certains éléments peuvent influencer les autres sans appartenir à un domaine : par exemple, une climatisation sans gestionnaire autonome peut affecter la température d'une pièce. Un tel équipement ne faisant pas partie du système formé par l'ensemble des gestionnaires autonomiques (la partie *smart* du *smart grid*) il doit donc être considéré comme un élément de l'environnement, donc extérieur à ce système, puisque aucune gestion « intelligente » ne peut lui être appliquée.

Illustration 6 : Proposition de solution pour le scénario « réseau de quartier ».



5. CONCLUSION

Nous venons de présenter trois scénarios successifs, décrivant ce que pourrait être la gestion active de la demande énergétique dans un futur proche, à l'échelle d'un équipement, d'un foyer, d'un quartier. Ces scénarios, entre autres aspects, ont révélé la complexité intrinsèque de ce genre de système ouvert, dynamique, à grande échelle ; notamment :

- le dynamisme des équipements et des contextes dans lesquels ils évoluent ;
- les problèmes de passage à l'échelle, de la multiplication arbitraire du nombre d'équipements en jeu ;
- les problèmes posés par l'hétérogénéité des équipements, l'ouverture des systèmes, la prise en compte de l'existant ;
- la place des êtres humains, imprévisibles et exigeants, au centre des systèmes ;
- les conflits inévitables entre objectifs et contexte, entre objectifs eux-mêmes, entre autorités administratives, entre décisions prises par des entités différentes.

Pour faire face à cette complexité, nous avons effectué diverses propositions architecturales, destinées à guider l'organisation des fonctionnalités suivantes :

- la mesure, la prévision et l'adaptation au contexte local ; l'évaluation et l'adaptation à long terme des systèmes et de leurs gestionnaires ;
- la prise de décision décentralisée, en fonction du contexte local et par rapport à des objectifs, locaux et globaux ;
- la collaboration entre systèmes, prenant en compte intrinsèquement le caractère distribué et imprévisible des décisions ;

Les solutions proposées étendent l'architecture canonique des systèmes autonomiques, en multipliant objectifs et boucles de contrôle, lesquelles doivent présenter des fonctionnalités essentielles d'intégration, voire de collaboration. Les objectifs, en rassemblant les boucles autonomiques spécifiques concernées, dessinent alors les sous-structures locales appelées ici « domaines » dont la combinaison forme le système global. Cette séparation des préoccupations ouvre la voie à des supervisions et des analyses ciblées du système global et de sa complexité.

Les scénarios présentés sont destinés à être étendus et enrichis ; des prototypages successifs permettront d'en vérifier la validité et la profondeur. Nous espérons toutefois que dès à présent, leur élaboration et leur exposé auront contribué à la compréhension des *micro smart grids*, des systèmes autonomiques, et des défis conceptuels et techniques que la complexité posera aux ingénieurs et aux chercheurs de demain.

6. RÉFÉRENCES

- [1] IBM, "Autonomic Computing: IBM's perspective on the State of Information Technology", available at: <http://www.research.ibm.com/autonomic/manifesto/>
- [2] Jeffrey O. Kephart and David M. Chess. 2003. The Vision of Autonomic Computing. *Computer* 36, 1 (January 2003), 41-50. DOI=10.1109/MC.2003.1160055
- [3] Markus C. Huebscher and Julie A. McCann. 2008. A survey of autonomic computing – degrees, models, and applications. *ACM Comput. Surv.* 40, 3, Article 7 (August 2008), 28 pages. DOI=10.1145/1380584.1380585
- [4] Simon Dobson, Roy Sterritt, Paddy Nixon, and Mike Hinchey. 2010. Fulfilling the Vision of Autonomic Computing. *Computer* 43, 1 (January 2010), 35-41. DOI=10.1109/MC.2010.14
- [5] European Commission. 2006. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>.
- [6] <http://linky.erdfdistribution.fr/>
- [7] Birger Becker, Florian Allarding, Ulrich Reiner, Mattias Kahl, Urban Richter, Daniel Pathmaperuma, Hartmut Schmeck and Thomas Leibfried. 2010. Decentralized Energy-Management to Control Smart-Home Architectures. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, Volume 5974/2010, 150-161, DOI: 10.1007/978-3-642-11950-7_14
- [8] Sylvain Frey, Philippe Lalanda, and Ada Diaconescu. 2010. A Decentralised Architecture for Multi-objective Autonomic Management. In *Proceedings of the 2010 Fourth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '10)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 267-268. DOI=10.1109/SASO.2010.34
- [9] Kephart, J.O.; Hoi Chan; Das, R.; Levine, D.W.; Tesauro, G.; Rawson, F.; Lefurgy, C.; , "Coordinating Multiple Autonomic Managers to Achieve Specified Power-Performance Tradeoffs," *Autonomic Computing, 2007. ICAC '07. Fourth International Conference on*, vol., no., pp.24, 11-15 June 2007 DOI: 10.1109/ICAC.2007.12
- [10] Rajarshi Das, Jeffrey O. Kephart, Charles Lefurgy, Gerald Tesauro, David W. Levine, and Hoi Chan. 2008. Autonomic multi-agent management of power and performance in data centers. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: industrial track (AAMAS '08)*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, 107-114.
- [11] Mark Weiser. 1999. The computer for the 21st century. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 3, 3 (July 1999), 3-11. DOI=10.1145/329124.329126