ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

En partenariat avec VINCI

Chaire ParisTech

Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures

Smart grids, réseaux intelligents : Opportunités de marché et apports de la Chaire

Conférence de la Chaire du 8 mars 2012



INTRODUCTION

Chaire Éco-conception et Réseaux intelligents

Maxime Trocmé, *responsable environnement et scientifique, Vinci*



Bienvenue à cette 14ème conférence de la chaire Éco-conception. Nous en sommes à la dixième soirée d'échanges. Pour ceux qui ne connaissent pas la chaire, c'est **un partenariat de long terme entre Vinci et ParisTech**, à travers trois de ces écoles représentantes : l'École des Mines, l'École des Ponts et l'École d'Agro ParisTech.



L'objectif de la chaire est de développer à la fois des méthodologies et des outils d'éco-conception de la ville. Chaque école a sa spécialité : les Ponts les transports, l'Agro la biodiversité et les Mines l'optimisation environnementale des bâtiments et des espaces publics.

Cette soirée est le premier événement de 2012. Sortez d'ores et déjà vos agendas. Le 12 juin, nous parlerons d'éco-conception dans la réhabilitation des bâtiments et le 18 septembre, nous parlerons d'infrastructures, de transport et de biodiversité. Ces soirées sont l'occasion d'échanger ensemble autour d'un thème de recherche. La recherche est l'une des missions de la chaire. La chaire a une deuxième vocation qui est l'enseignement. C'est pourquoi cette année, nous allons lancer, probablement les 2 et 3 octobre, les universités de la chaire Éco-conception, sur deux jours. L'objectif de ces universités d'été est de s'adresser aux opérationnels de Vinci et d'ailleurs de leur montrer comment l'éco-conception peut être mise en pratique dans les différents métiers liés à la ville (les métiers de l'énergie, du bâtiment, de la route).



La thématique de ce soir concerne les réseaux intelligents. Nous allons beaucoup parler de l'effacement de la pointe. Cela ne vous dit peut-être pas grand-chose, mais il faut savoir que cela faisait la une des journaux il y a encore un mois. En effet, avec la vague de froid, nous avons pu voir à la une des différents journaux de 20 heures que l'on avait des problèmes de disponibilité de la ressource en électricité, notamment entre 18 et 20 heures, dans les régions Bretagne et PACA. Quelles opportunités techniques et opportunités de marché ouvre cet effacement de la pointe ? Nous allons en parler ce soir.

La soirée va s'articuler en trois temps. Le premier temps sera consacré à l'entreprise. Vinci Énergies va venir nous montrer quelles opportunités s'offrent à Citéos en

termes d'effacement de la pointe dans le développement de son offre. Ensuite, monsieur Commaret d'EDF va nous présenter les différentes possibilités de valorisation de cet effacement de pointe offertes par EDF et les autres énergéticiens. Dans un deuxième temps, Béranger Favre, l'un des nombreux doctorants de la chaire Éco-conception, va nous parler de ses travaux sur l'effacement de la pointe, la régulation des bâtiments pour effacer la consommation d'électricité pendant les périodes de pointe. Le troisième temps sera le cocktail, à 19 heures.

Pour commencer à parler du thème de la soirée, je vais passer la parole à Olivier Monié qui est directeur de Citéos qui s'occupe d'éclairage public au sein de Vinci Énergies.

La place de l'éclairage public dans les réseaux intelligents

Olivier Monié, *directeur de la marque Citéos, Vinci Energies*



Merci, Maxime. Bonsoir à tous. **Citéos est une marque de Vinci Énergies qui rassemble les entreprises du Groupe qui s'adressent aux collectivités pour leur offre lumière**. Il s'agit principalement d'éclairage public, mais aussi tout ce qui concerne la mise en valeur des bâtiments par la lumière, les éclairages festifs au moment des fêtes. La marque s'intéresse aussi aux équipements urbains dynamiques, à savoir ce qui concerne la régulation de trafic, la vidéo-protection de voirie, la vidéo-protection urbaine, l'information de l'usager de la voirie urbaine et enfin à un sujet qui ne manquera pas un jour ou l'autre d'intervenir dans les smart grids, à savoir toutes les infrastructures de recherche pour les véhicules électriques que l'on commence à voir fleurir, à toute petite vitesse, sur les trottoirs des villes.

Quand Maxime m'a demandé de faire cette présentation, je me suis demandé ce que j'allais pouvoir raconter sur le sujet. L'éclairage public a-t-il véritablement quelque chose à voir avec les smart grids ? Les opportunités de business sont pour le moment extrêmement lointaines, mais vous allez voir qu'il y a tout de même quelques petits frémissements à certains endroits qui nous font penser que nous allons pouvoir avancer sur le sujet.

Je vais faire un petit état des lieux sur l'éclairage public, montrer à quel moment il fonctionne. Nous verrons ensuite si nous pouvons répondre aux objectifs des smart grids, c'est-à-dire réguler les appels de puissance. Je prendrai un petit exemple qui s'est passé cette année à Nice. Rapidement, je vous parlerai ensuite d'une expérience qui va se dérouler à Lyon, dans laquelle, pour le moment, nous ne sommes pas partie prenante. Par la suite, si vous le souhaitez, nous pourrons avoir quelques questions/réponses.

Les réseaux d'éclairage public sont pour le moment loin d'être smart. Premièrement, le kilowattheure dédié à l'éclairage public a un tarif spécial qui est parmi les moins chers

d'Europe. Ces tarifs ont été développés par EDF il y a 25 ans. Cette tarification spéciale pour l'éclairage public a incité les communes à allumer toute la nuit.



Cette tarification particulièrement basse perdure. Le tarif a certes augmenté, il a même beaucoup augmenté ces trois dernières années puisqu'il a augmenté de 30 %, mais cette augmentation est plutôt liée à un changement de la structure tarifaire. En effet, la part abonnement qui est fixe a baissé, la part variable liée aux kilowattheures consommés a augmenté et des taxes ont été rajoutées. Je pense que la grande majorité des communes n'en ont absolument pas conscience. Elles ne le savent pas. Pourquoi ? Parce qu'elles reçoivent une facture d'électricité qui couvre l'ensemble de leurs besoins et la plus grande partie d'entre elles sont incapables de savoir d'où provient leur consommation d'énergie électrique.

Pour autant, pour être dans l'air du temps, la priorité des collectivités est de faire des économies d'énergie. Aujourd'hui, quand nous allons voir les collectivités pour leur parler de leurs installations, elles pensent d'abord et avant tout à faire des économies d'énergie et à en parler. C'est important. La rénovation des réseaux d'éclairage public en France concerne environ 3 % du parc chaque année. Si on ne fait pas un effort particulier d'apport de technologies, en remplaçant un matériel ancien par un matériel neuf sans volonté particulière de faire une vraie modernisation, on va obtenir simplement entre 10 et 15 % d'économies d'énergie.

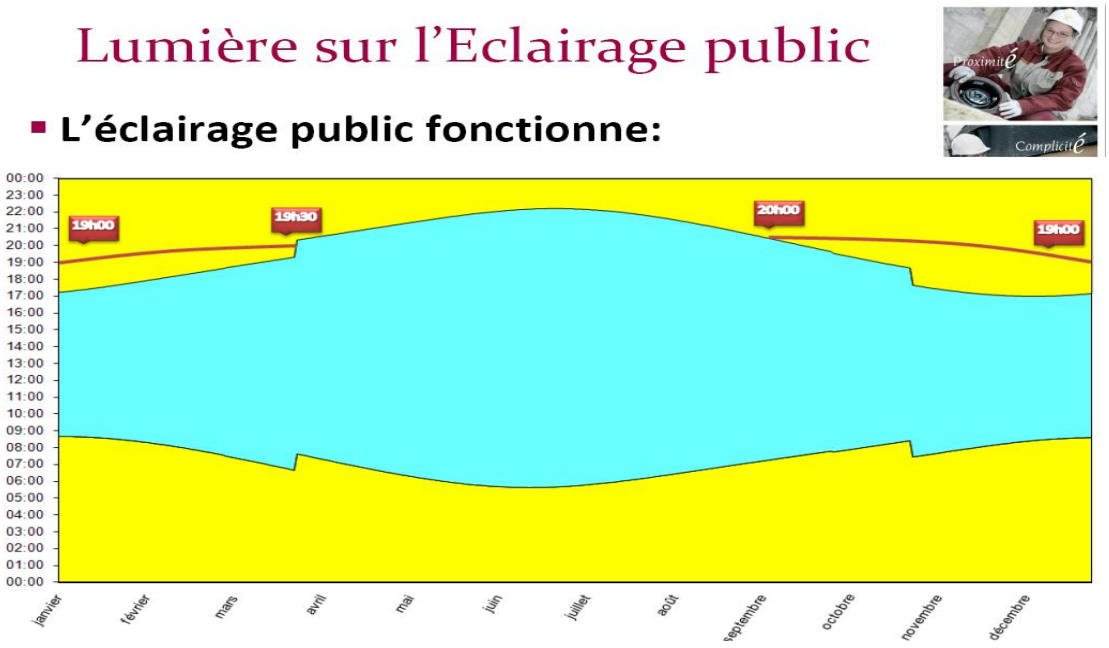
Pour faire des réseaux qui soient un peu intelligents, il faut pouvoir piloter les points lumineux à distance. On peut le faire par grappes, par une armoire d'éclairage public qui commande un certain nombre de points lumineux. Cela a un relativement faible intérêt, sauf à réduire la puissance, ce qui se développe relativement bien. Quant à les piloter individuellement, on sait le faire également. On a des installations qui fonctionnent, mais c'est évidemment très onéreux si on le regarde uniquement en termes d'économies d'énergie. Il faut que tous ces systèmes de pilotage de points lumineux puissent servir à autre chose qu'à simplement gérer l'énergie. Il faut avoir une gestion fine de la distribution spatiale de la lumière qui soit en fonction de l'utilisation de la voirie, de ce qui s'y passe, des horaires, du trafic, de la fréquentation, etc.

Nous avons aussi quelques pistes de travail en la matière. Les leds sont les technologies qui vont permettre de le faire, mais elles restent à fiabiliser. Elles produisent de la lumière, mais aujourd'hui, les leds ne font pas faire d'économies d'énergie, surtout pour faire de l'éclairage général. On l'entend de manière courante, mais c'est faux. L'efficacité énergétique des leds est beaucoup plus faible que les sources classiques que l'on utilise encore couramment.

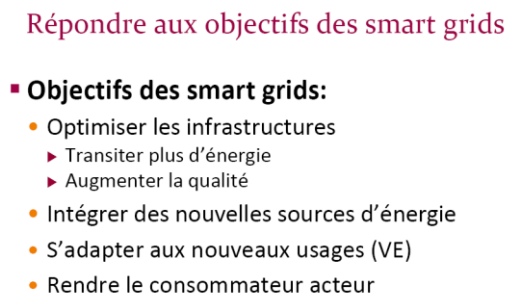
Pour piloter, il faut aussi des réseaux communicants qui sont soit des réseaux de courant porteur en ligne, soit des réseaux radios. Pour piloter des réseaux de courant porteur en ligne, il faut des réseaux de très bonne qualité, ce qui n'est pas le cas. Les réseaux d'éclairage public sont très souvent mélangés avec les réseaux de distribution d'énergie électrique. La radio est plus compliquée parce qu'il y a des obstacles un peu partout. Puis, une partie des élus

trouvent que les ondes radios sont largement suffisantes. On peut peut-être essayer de trouver d'autres solutions que de rajouter encore des systèmes pour piloter des équipements par radio.

L'éclairage public fonctionne la nuit. Sur cette courbe, vous voyez en jaune les moments où l'éclairage public est allumé. Vous voyez une rupture qui est le moment du changement d'heure. Le trait autour de 19 heures symbolise l'appel de pointe d'EDF.



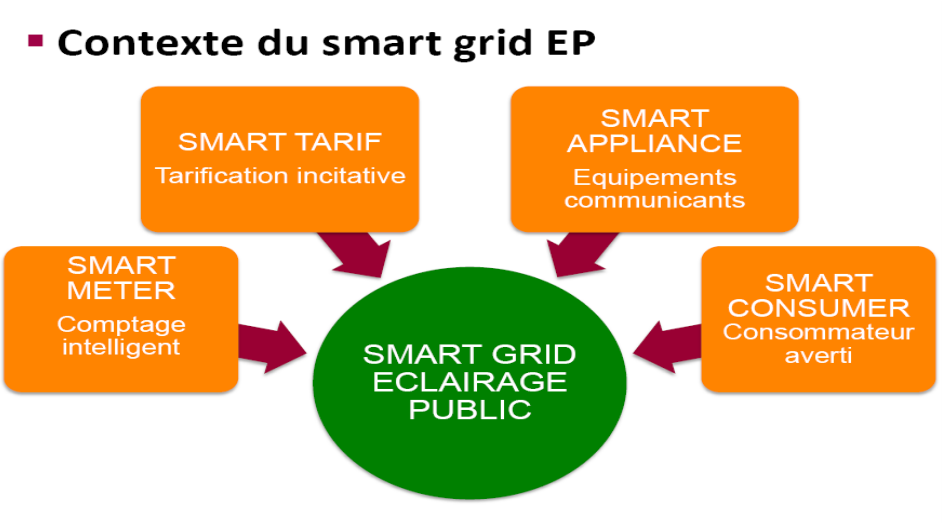
C'est bien dans les mois d'hiver que l'éclairage public fonctionne au moment des heures de pointe. Cette pointe disparaît au printemps et l'été, il n'y a plus aucune difficulté. L'éclairage public fonctionne à 86 % en heures creuses, c'est-à-dire en dehors de la courbe rouge. C'est de l'énergie à faible émission de CO_2. Elle provient essentiellement des centrales nucléaires. L'éclairage public représente 1 % de la production totale française. Il est pourtant extrêmement visible. C'est pourquoi les gens pensent que l'on ferait beaucoup d'économies d'énergie en travaillant sur l'éclairage public, mais il faut remettre les choses à leur place. Ceci dit, pour une commune, l'éclairage public représente 48 % de sa consommation d'électricité. Il est donc visible à l'échelle du budget d'une collectivité. Il participe à la pointe en hiver où il y a des appels de production d'énergie à fortes émissions de carbone.



Les objectifs des smart grids sont bien d'optimiser les infrastructures, de transiter plus d'énergie, d'augmenter la qualité de cette énergie, qu'il n'y ait pas de coupure, que les fréquences et les tensions soient bonnes, tout cela avec des infrastructures existantes. Il ne s'agit pas de rajouter encore des moyens de production ou des moyens de transport d'énergie. Il faut penser que les smart grids doivent aussi intégrer de nouvelles sources d'énergie, les sources d'énergie renouvelables qui viennent s'installer sur le réseau, qui sont réparties sur le territoire et qui viennent donc soutenir le réseau. Ils doivent s'adapter aux nouveaux usages. Je parlais tout à l'heure du véhicule électrique qui typiquement, va impacter les réseaux électriques. Ces nouveaux usages pourront appeler de la consommation, mais des expériences commencent à

être tentées pour fournir de l'énergie quand les batteries sont pleines. Surtout, les smart grids doivent rendre le consommateur d'énergie acteur sur le réseau. Ils ont une capacité à faire évoluer son comportement en fonction de la nécessité des appels de puissance.

Quel est le contexte d'un smart grid ? Il y a plusieurs éléments. D'abord, il faut des smart methods, c'est-à-dire des comptages intelligents qui vont pouvoir envoyer de l'information sur l'état des puissances appelées, mais qui vont aussi pouvoir en recevoir pour donner des ordres localement.



Il faut des smart tarifs. Un smart tarif n'est pas forcément un tarif bas, mais un tarif adapté aux situations d'appels de puissance. Il faut des équipements communicants, les smart appliances. Il faut qu'un réseau d'éclairage public soit doté d'un certain nombre de capteurs et d'équipements pour pouvoir s'adapter aux situations. Puis, il faut des smart consumers qui sont des consommateurs avertis. Quand on a réuni tout cela, on peut espérer arriver à faire du réseau d'éclairage public un smart grid.

J'ai identifié un smart consumer qu'est la ville de Nice. Pendant la période de grand froid que nous avons connue au mois de février, Jacques Pélissard qui est le président de l'Association des Maires de France, a fait un appel au peuple. Il a écrit à tous les maires en leur préconisant de montrer l'exemple en matière d'éclairage public et en leur demandant, s'ils le pouvaient, de réduire leur consommation d'éclairage public. En France, nous avons environ 120 contrats dans lesquels nous gérons l'énergie pour le compte des collectivités. J'ai demandé à mes collaborateurs si des élus leur avaient posé la question ou s'ils avaient eux-mêmes proposé d'être un smart consumer, c'est-à-dire d'adapter la puissance. Sur les 120 contrats, j'ai eu deux réponses : la Ville de Nice et la Ville d'Hérouville-Saint-Clair, à côté de Caen. Les élus ont décidé de faire quelque chose pour participer à l'effort national, pour ne pas se trouver en situation difficile.



Que nous a demandé la Ville de Nice ? Elle nous a d'abord demandé d'éteindre tous les éclairages décoratifs, de mettre tous les bâtiments dans le noir. C'est parfaitement compréhensible. Elle nous a demandé également des réductions ponctuelles d'éclairage dans certaines rues. Nous avons éteint une lampe sur deux, etc. Nous avons réduit la durée

totale de trente minutes : dix minutes le soir qui étaient vraiment utiles et vingt minutes le matin qui n'étaient pas vraiment nécessaires puisqu'elles ne situaient plus dans la pointe.

Il est plus facile de réduire de dix minutes le matin que de vingt minutes le soir. L'effet total, sur la période du 6 au 17 février, est une diminution de 13 % de la consommation, ce qui fait une économie de 1 100 € pour la collectivité. C'est vous dire si le prix du kilowattheure est bas parce que les smart methods et les smart appliances ont été faits à la main par nos collaborateurs et inutile de vous dire que le coût a été beaucoup plus élevé que les 1 000 €. On a payé les heures d'astreinte de l'équipe en place pour aller éteindre, couper et rallumer une fois que la période était passée. En fait, le smart tarif n'existe pas vraiment pour ce sujet.

Par contre, quelles ont été les communications ? Il y a eu deux passages au JT de 20 heures, deux jours successifs sur France 2, sur France 3 et des articles dans *Nice Matin*. L'internet de la Ville a largement communiqué sur le sujet qui a reçu un très bon accueil du public. Les Niçois ont trouvé cette démarche normale et elle ne leur a pas posé de problème.

Quelles sont les suites ? La Ville s'est dit qu'elle était suréclairée. Elle a décidé de diminuer son éclairage de façon permanente. L'objectif est maintenant de réduire de 30 % la consommation d'énergie, idée que les élus n'avaient pas eue auparavant, bien qu'on leur dise. Il fallait un élément fort. Le très bon accueil du public est un élément important qui conduit les élus à se dire qu'ils peuvent le faire. Une fois que la consommation aura baissé de 30 %, je pense que l'objectif d'un smart grid, d'un réseau intelligent qui va adapter la puissance en fonction de l'appel, sera repoussé un peu plus loin.

Dans les autres expériences que nous avons identifiées, il y a actuellement celle d'ERDF, de la Ville de Lyon et du cluster Lumière qui ont lancé un démonstrateur qui s'appelle « IC Lighting ». Le cluster Lumière est une association qui est basée à Lyon et qui regroupe tous les acteurs de la filière lumière. Pourquoi à Lyon ? Parce que c'est à Lyon qu'EDF a lancé le déploiement de son compteur intelligent, le compteur Linky. Il va être installé sur des réseaux d'éclairage public et quelques expériences d'allumage et d'extinction, de maîtrise de consommation vont être faites à Lyon pour essayer de recueillir des informations sur l'état des lumières. Les attentes sont les suivantes : flexibilité sur les ordres d'allumage, maîtrise des consommations, optimisation de la maintenance, avoir des informations sur l'état des points lumineux et pouvoir informer les équipes de maintenance.



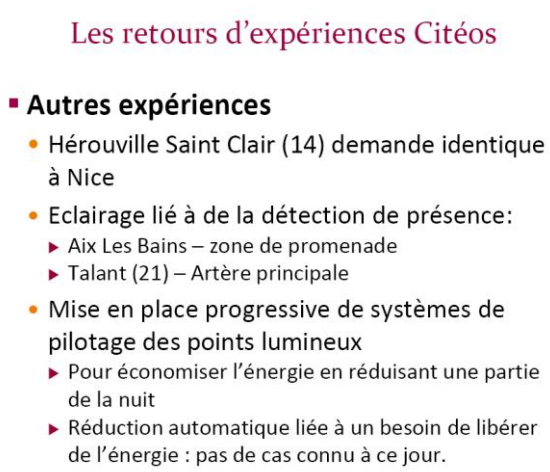
Beaucoup rêvent de systèmes automatiques qui avertissent qu'un point lumineux est en panne. C'est de la gestion technique centralisée que l'on appelle GTC. Il faut savoir que le meilleur système de GTC qui existe est la gestion technique citoyenne. Quand la lampe est en panne au-dessus de sa maison, madame untelle prend son téléphone et elle appelle. Pour le moment, je n'ai rien trouvé qui soit moins cher que ce système. Nous sommes loin du smart consumer.

Quand elle rentre chez elle, madame untelle veut pouvoir mettre la clé dans sa porte ou ne pas avoir peur quand elle sort de chez elle. Il y a donc encore du chemin à faire.

La même expérience a été menée à Hérouville-Saint-Clair. Je ne vous donne pas les chiffres. Il y a 33 000 points lumineux à Nice et 4 500 à Hérouville-Saint-Clair.

Parallèlement, des développements technologiques vont un peu dans le même sens. A Aix-les-Bains, nous sommes en train de faire une expérience de commande de l'éclairage liée à la

détection de présence. L'éclairage va s'allumer avec une intensité plus ou moins forte en fonction de la fréquentation du lieu. Il ne s'agit pas d'éteindre quand il n'y a personne car comme il s'agit d'une zone de promenade, si vous éteignez, les gens ne viendront pas se promener. Il faut qu'il y ait toujours un minimum d'éclairage, mais s'il y a un peu plus de monde, l'intensité de la lumière sera augmentée.



Puis, une petite ville, Talant, en Cote d'Or, a décidé de faire une expérience. A 21 heures, l'artère principale s'éteint et quand une voiture passe, elle s'allume. Ils ont calculé qu'il fallait trente secondes pour traverser la ville. L'éclairage va donc rester allumer 45 secondes. Si vous vous arrêtez en cours de route, je ne sais pas ce qui se passe. Vous avez 45 secondes pour traverser la ville en étant éclairé. C'est possible avec de la technologie led parce qu'il faut pouvoir allumer et éteindre instantanément, ce que ne permettent pas les sources à décharge classique qui équipent la plupart des réseaux d'éclairage public.

Pour autant, très progressivement, cela se développe de plus en plus. Nous avons aujourd'hui treize PPP d'éclairage public et des contrats de gestion. Dans presque tous, nous mettons en place des systèmes de pilotage des points lumineux, beaucoup à l'armoire parce que c'est ce qui coûte le moins cher, pour petit à petit piloter au point lumineux. Ceci dit, nous n'avons pas encore vu de tels systèmes qui ont été installés dans l'objectif de répondre à un besoin de libérer de l'énergie.

Avez-vous des questions sur ce sujet ? Vous voyez que nous sommes encore très loin et qu'il doit y avoir une réelle prise de conscience. Les technologies restent possibles, mais doivent encore être largement fiabilisées pour que les réseaux d'éclairage public deviennent des smart réseaux et soient en relation avec les besoins d'énergie du reste de l'environnement dans lequel ils se trouvent.

Questions et débat

Maxime Trocmé

Merci pour cet éclairage. Je vois qu'il y a une question.

Jean Roger-Estrade, *Chaire éco-conception*

Dans la liste des éclairages publics, il y avait aussi ceux qui concernent les feux tricolores. Ne serait-il pas intéressant d'envisager une programmation de ces feux en fonction de l'heure de la journée ? Dans un carrefour, quand il y a beaucoup de monde qui circule, les feux ont une certaine fréquence du rouge au vert, mais, la nuit, quand il n'y a plus personne, soit ils sont en orange clignotant, soit ils restent verts plus longtemps, soit ils passent rouge quand il y a une autre voiture.

Olivier Monié

Cela existe dans certaines villes. Les programmes sont adaptés en fonction de la journée, mais la consommation d'énergie pour les carrefours à feux est très faible. En outre, maintenant, on les équipe de plus en plus de leds et on divise la puissance consommée par trois ou quatre.

Jean Roger-Estrade

C'est là où intervient la vision un peu plus systémique de la chaire Éco-conception. Si on agit sur la modulation des feux, on va agir sur la fluidité du trafic et donc diminuer la pollution et la consommation de carburant des voitures qui restent deux minutes à l'arrêt à deux heures du matin, alors que personne ne passe dans le carrefour. Telle est l'idée. L'éco-conception est une vision un peu globale du problème.

Olivier Monié

Cela existe. Ce sont des choses que l'on sait faire. Par exemple, dans le PPP d'éclairage public de la ville de Rouen, il y a l'éclairage public, mais aussi les carrefours à feux. Il fallait refaire tout le plan de circulation et dans les objectifs que nous avions à atteindre, il y avait l'objectif de réduction de 25 % des temps de parcours. Il y a eu toute une procédure de mesures. Plusieurs circuits, à plusieurs heures, ont été mesurés et chronométrés avant et après l'installation. Nous avons d'ailleurs largement dépassé l'objectif de 25 % puisque nous sommes arrivés de moins 28 à moins 30 % dans certains cas. Cela dit, parmi les gens qui ont contesté ce PPP, certains ont dit que nous allions diminuer les émissions de carbone, etc. mais que nous allions attirer d'autres voitures. Aujourd'hui, les politiques de ville sont bien de dissuader l'utilisation du véhicule en ville. Nous avons eu un gros intérêt à Rouen que nous n'avions pas vu au départ, à savoir que cela a aussi largement fiabilisé et amélioré les transports en commun. Les temps de parcours étaient ainsi beaucoup plus fiables, beaucoup plus certains, le taux de disponibilité bien plus élevé. Pour le moment, nous n'avons pas encore mesuré d'augmentation du trafic du au fait que l'on ait amélioré le trafic.

Yves Ménier, *Vinci Energies*

Olivier, j'ai une question. Pour l'instant, nous sommes dans un monde où la production s'adapte aux consommateurs et le smart grid sera un réseau qui fera que les consommateurs s'adapteront à la production. Cette vision est peut-être un peu simpliste, mais je crois qu'in fine, telle est la vision, pour éviter les pics, les émissions de CO_2, etc. A un moment, avec du pilotage et de la programmation, le consommateur ne décidera plus quand il aura besoin de son appel de consommation, mais la production lui dira qu'il peut avoir telle consommation d'électricité. Sur le plan citoyen et du besoin d'un éclairage dans une ville, pouvons-nous imaginer un jour que l'éclairage soit régulé d'une manière un peu aléatoire, dépendante de décisions venant de la production et que ceci soit accepté par les citoyens ?

Olivier Monié

Je ne sais pas si je suis bien placé pour répondre, je pense qu'il faudrait poser la question à des élus. Pour le moment, je constate que les élus sont très frileux sur cette question. C'est un sujet qui leur fait très peur. L'éclairage public est extrêmement visible. Pour faire des économies d'énergie, les gens vont dire qu'il faut commencer par éteindre l'éclairage public. On a vu l'impact en termes d'économie, il est extrêmement faible, mais l'éclairage public est tellement visible que cela a une valeur de symbole et d'exemple. Cela peut donc participer à

l'évolution des comportements des populations et en tout cas à l'acceptabilité de vivre avec moins de lumière. Je pense qu'il y a toute une éducation à faire sur l'ensemble de la chaîne. Concernant les smart grids, il y a la production, le transport, la distribution et au bout de la chaîne, il y a des utilisateurs. Aujourd'hui, malgré tout, sur la production et le transport, le grid est à peu près smart. Il faut que cela puisse descendre au niveau de la distribution et au niveau du consommateur.

Maxime Trocmé

Y a-t-il d'autres questions ? Non. Nous avons vu ces problématiques des réseaux d'énergie sur les derniers maillons de la chaîne. Maintenant, nous allons parler du premier maillon de la chaîne, à savoir le producteur d'énergie. Qu'est-ce qu'implique cette problématique chez EDF ?

Equilibre de la demande en électricité : les opportunités de l'effacement en période de pointe

Philippe Commaret, *directeur marketing, EDF*

Je vais tenter d'apporter une réponse à votre question. En tout état de cause, l'exposé de monsieur Monié nous a montré clairement que l'innovation est devant nous avec les smart grids. Cette innovation porte sur tous les maillons de la chaîne, en termes de production d'énergie, avec une production plus intelligente, en termes de distribution d'énergie en investissant dans les réseaux de façon intelligente de sorte à piloter les investissements qui sont considérables dans les réseaux et enfin en termes de consommation, en rendant le consommateur intelligent pour optimiser sa consommation en fonction du prix auquel l'énergie est commercialisée.



Pour tout cela, nous réalisons de nombreuses expérimentations. On construit et on étend notre gamme de services. Parmi les services que l'on développe pour les industriels, pour les entreprises, nous leur proposons de valoriser leur capacité d'effacement. C'est également vrai pour les collectivités territoriales. Cela fait partie des services que nous développons, à côté de solutions de monitoring, de solutions d'efficacité énergétique, de solutions de production d'énergie décentralisée. Cela fait partie de notre gamme de solutions que nous proposons à nos différents clients.

Avant de commencer cet exposé, je vous propose de revenir sur ce que l'on appelle l'effacement. Un certain nombre d'entre vous sont certainement familiers avec cette notion, mais peut-être pas tous.

L'effacement consiste tout simplement à solliciter le client, la veille pour le lendemain – en tout cas, nous le concevons de cette manière, mais les délais de préavis peuvent être beaucoup plus courts – pour qu'il réduise son appel de puissance par rapport à ce qu'il avait prévu de consommer, en contrepartie de quoi nous le rémunérons. On inverse finalement la logique. Plutôt que de se voir rémunéré parce qu'on a fourni de l'électricité, nous rémunérons le client parce qu'il ne consomme pas l'électricité. Quelle est la magie derrière cette équation ? On rémunère le client qui ne consomme pas d'électricité tout simplement parce que le fait de vendre de l'électricité à ce moment-là nous coûterait plus cher. Il faudrait en effet la produire avec des moyens de production très onéreux. Il nous coûterait donc plus cher de la produire.

En fonction du coût de production de nos moyens de production, on estime qu'il est intéressant de solliciter nos clients pour réduire leur appel de puissance. Tel est le mécanisme de l'effacement.



Qu'est-ce qui a changé dans l'environnement énergétique actuel et qu'est-ce qui est en train de changer et qui rend l'effacement plus intéressant, voire nécessaire ?

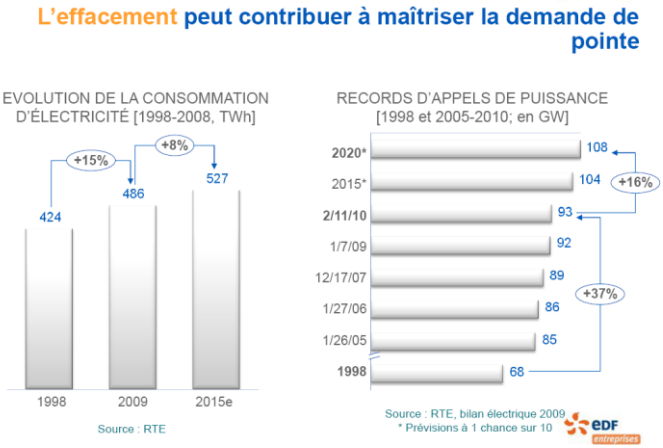
Comme l'a dit monsieur Trocmé dans son introduction, nous connaissons actuellement une très forte augmentation de la puissance qui est appelée aux périodes de pointe. Les périodes de pointe sont les périodes d'hiver, le moment où l'appel de puissance est le plus élevé. Elles sont en général entre 8 heures et 9 heures le matin et le soir entre 18 heures et 20 heures. Cet appel de puissance nécessite de lancer des moyens de production de pointe dont le coût de production est élevé et dont le coût environnemental est également important. Ce sont des moyens de production qui en règle générale fonctionnent au fuel ou au gaz et qui sont donc fortement émetteurs de CO_2. La croissance de ces appels de puissance est trois fois supérieure à la croissance de demande d'électricité.

Deuxièmement, l'environnement change parce que les usages liés à l'énergie, ainsi que les modalités selon lesquelles on produit l'énergie sont en train d'évoluer. On vit une pleine révolution en matière de production d'énergie. Nous avons basculé de systèmes de production d'électricité qui étaient centralisés avec des centrales et dont nous maîtrisions la production vers des systèmes de production d'électricité décentralisés (la production photovoltaïque, la production éolienne et demain, l'utilisation des énergies marines également). Cette production décentralisée est moins prédictible. Même si elle est prédictible en fonction des conditions météorologiques, elle reste malgré tout moins prédictible que les moyens de production centralisés. Par conséquent, elle induit une fluctuation, une certaine volatilité sur nos prévisions en matière de production, qui est importante et qu'il faut savoir gérer. Naturellement, il faut délivrer aux clients qui souhaitent consommer, en temps réel, la production qu'ils consomment. Il n'est aujourd'hui pas économiquement viable de stocker de l'énergie, il faut donc produire exactement l'énergie qui est consommée à chaque instant.

Par ailleurs, se développent de nouveaux usages de l'électricité. On pense en particulier aux véhicules électriques dont les perspectives sont de l'ordre d'un à deux millions de véhicules électriques à horizon 2020. Il faut multiplier par deux le nombre de prises sur la voirie pour recharger ces véhicules électriques. On estime donc à environ quatre millions de points de

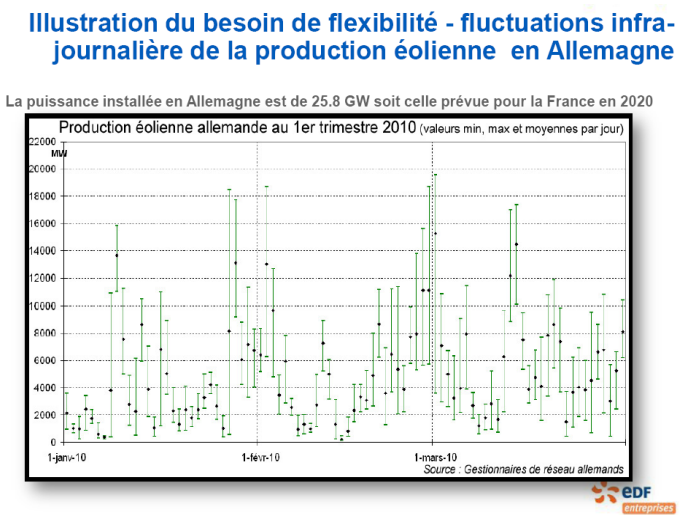
livraison utiles pour recharger les véhicules électriques. Aujourd'hui, on ne sait pas encore à quel moment ces véhicules seront rechargés. C'est la raison pour laquelle nous menons un certain nombre d'initiatives et d'expérimentations pour voir à quel moment se positionne l'appel de puissance. Est-ce à 19 heures, quand les clients rentrent chez eux, au moment de la pointe qu'ils vont rechercher leur véhicule ? Ne devons-nous pas développer des moyens intelligents pour pouvoir reporter l'appel de puissance vers des heures creuses ?

Le troisième élément qui change la donne en matière d'effacement tient en la mise en place du marché de capacité. La nouvelle organisation du marché de l'électricité est le nom d'une loi qui a été promulguée en décembre 2010. Cette loi a en particulier préparé la mise en place d'un nouveau marché qui viendrait valoriser les capacités d'effacement, qui viendrait valoriser en réalité toutes les capacités de pointe, toutes les capacités disponibles. Le principe de cette loi est d'inciter les acteurs énergétiques, l'ensemble des fournisseurs d'énergie à investir dans des moyens de production de pointe, de façon à contribuer à la sécurité électrique en France. Aujourd'hui, en France, EDF est le seul acteur qui garantit la sécurité électrique. EDF est pratiquement le seul à investir dans des moyens de pointe pour garantir la sécurité électrique aux heures de pointe. *Je vais revenir sur ces trois points très rapidement*.



La consommation d'énergie a augmenté de 15 % sur les dix dernières années. Elle va augmenter environ de la moitié sur les dix prochaines années, en particulier de part les efforts en matière d'efficacité énergétique. On peut imaginer aussi que le contexte actuel de crise économique fera que ces chiffres seront encore rabotés. Dans le même temps, la pointe, c'est-à-dire l'appel de puissance la plus importante chaque année, a quant à elle augmenté de 35 % sur les dix dernières années et on estime qu'elle va augmenter de l'ordre de 16 % d'ici à 2020. Vous voyez que l'appel de puissance de pointe va augmenter deux fois plus vite que la consommation d'électricité. Cela nécessite naturellement d'adapter le parc de production ou d'adapter les systèmes et les solutions qui permettent de flexibiliser la demande pour éviter d'avoir ce type d'appel de pointe. L'effacement y contribue.

La deuxième raison que j'évoquais concerne le développement des énergies renouvelables. Comme je le disais tout à l'heure, les énergies renouvelables sont éminemment volatiles. Je vous présente un graphe qui est tout à fait réel, qui est la source du gestionnaire du réseau allemand. Vous voyez la production éolienne en Allemagne, sur le premier trimestre 2010. Vous voyez, sur chacune des verticales, la



puissance mini produite qui est aux alentours de 6 gigawatts et l'appel de puissance maxi appelé qui est de 19 gigawatts. Vous voyez la volatilité. 13 gigawatts correspondent à une dizaine de tranches nucléaires, ce qui n'est pas négligeable. Arriver à maîtriser en une journée ce différentiel de puissance produit par l'énergie éolienne est tout à fait considérable et nécessite de flexibiliser à la fois la production et la consommation. Aujourd'hui, la puissance installée est celle que nous aurons en France en 2020. C'est donc bien ce à quoi il faut nous préparer aujourd'hui. D'où la nécessité de travailler sur la flexibilité de l'appel de puissance par les consommateurs.

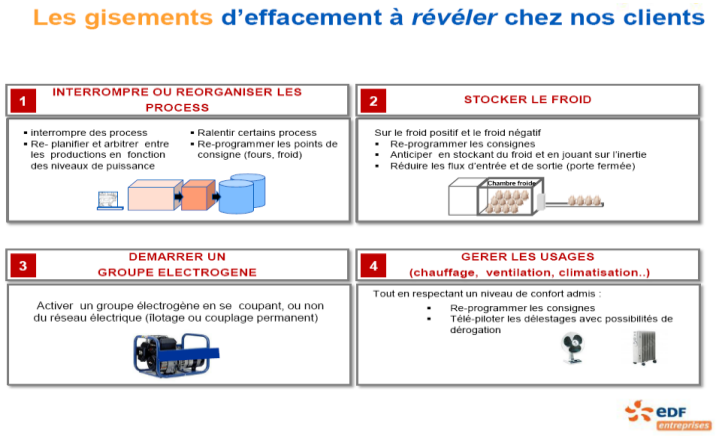
Quant au marché de capacité, son mécanisme reste encore à décrire. Il est prévu par la loi de se mettre en place en 2016 ; cependant, les règles selon lesquelles ce marché de capacité va se mettre en place sont encore à écrire. RTE, le réseau de transport d'électricité, a été missionné pour définir et construire ce marché de capacité. Une consultation avec les différentes parties prenantes a été initiée entre RTE et les différents acteurs du système électrique français. Cette consultation donne lieu à différents débats pour caler les règles selon lesquelles on va traduire un portefeuille client en un besoin de capacité de puissance installée et disponible pour passer la pointe. Ces règles selon lesquelles on doit transférer un portefeuille de clients en la capacité qu'il faut maîtriser dans son portefeuille restent à définir. Restent aussi à définir les modalités selon lesquelles les capacités vont s'échanger. Restent à définir les modalités selon lesquelles il faut prévoir aussi les capacités disponibles. Il est envisagé en particulier qu'il faille déterminer sa disponibilité en matière de capacité et son besoin de capacité, trois ans avant de disposer de la capacité en question. Ce marché doit donc donner une visibilité à trois ans, de façon à pouvoir engager le développement d'unités de production de pointe, mais avec un marché secondaire, avec des échanges de capacités qui vont permettre ainsi aux commercialisateurs d'électricité d'acheter la capacité en fonction de la structure de leur portefeuille client.



Ce marché de capacité a vocation à valoriser les effacements, au même titre que les capacités de production, ce qui est important en termes d'effacements. Ce marché de capacité va donc donner un prix à l'effacement. Cependant, il ne faut pas rêver, il va donner un prix à certaines capacités d'effacement. Selon la structure, les formats et la profondeur des effacements, il leur donnera un prix.

Quand on parle d'effacement, de quoi parle-t-on ? En ce qui nous concerne, nous travaillons sur quatre modalités d'effacement dont une n'est pas exactement de l'effacement puisqu'elle consiste à produire localement de l'énergie.

La première modalité sur laquelle nous travaillons consiste à interrompre ou à réorganiser le process industriel de nos clients. Par exemple, il s'agit, lorsque vous exploitez une carrière, de stocker certains matériaux, de façon à arrêter, en amont, la chaîne de production de ces matériaux. Le stock permet de faire fonctionner la production à l'aval et permet d'arrêter une partie du cycle de production de nos clients.

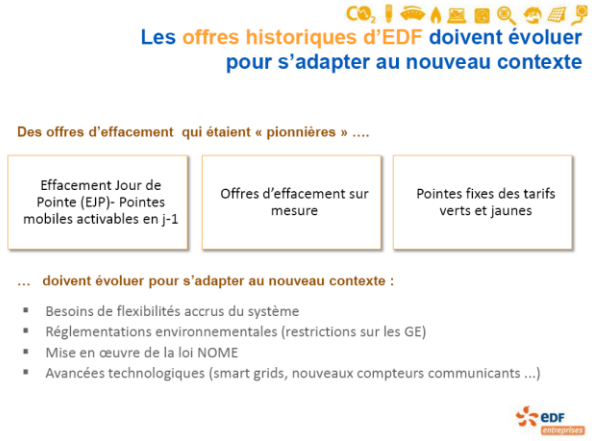


Le stockage de froid est quelque chose qui est assez séduisant, mais qui techniquement, est relativement complexe. Il consiste en réalité à jouer avec les températures de consigne, tout en respectant naturellement les contraintes réglementaires et sanitaires, pour faire en sorte de jouer sur l'inertie thermique des entrepôts frigorifiques et ainsi diminuer l'appel de puissance du client lorsqu'on a besoin d'avoir de la flexibilité. Cela est cependant très difficile à réaliser. Nous menons un certain nombre de travaux de recherche et de développement en la matière, ainsi que des expérimentations.

Toujours en matière d'inertie thermique, il y a la gestion du chauffage, de la ventilation, de la climatisation. Je pense que ce sera l'objet de l'exposé suivant, je ne vais pas m'attarder sur ce sujet. Il y a la possibilité aussi *d'exploiter des groupes électrogènes* qui sont installés chez nos clients comme des unités de production de secours en règle générale. Ces unités de production de secours sont imposées par la loi, notamment dans les grands commerces qui accueillent du public ou dans les entreprises qui ont des unités de production qui nécessitent de garantir la continuité de fonctionnement de l'installation. Par exemple, l'aération des tunnels autoroutiers nécessite de fonctionner en continu et donc de disposer de groupes électrogènes. Si on veut que ces groupes électrogènes soient efficaces, il faut les utiliser régulièrement. D'où le fait de les actionner au moment où il y a des appels de puissance de pointe, pour pouvoir produire localement de l'énergie, plutôt que de la produire de façon centralisée.

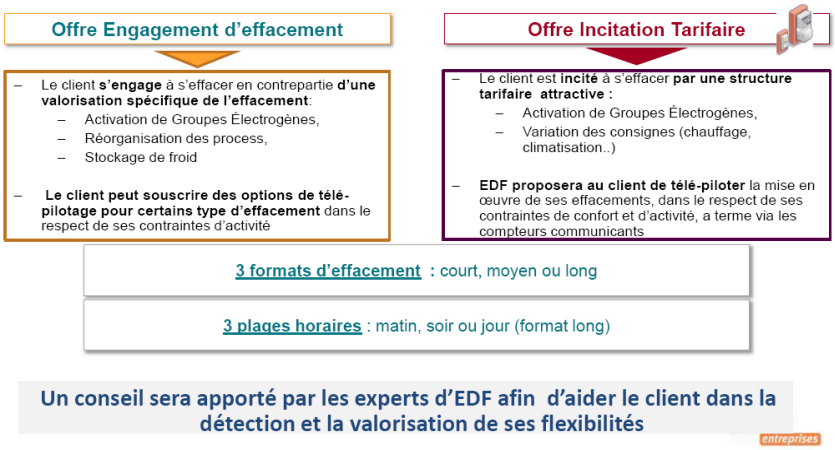
Aujourd'hui, en réalité, des offres d'effacement existent déjà. Au travers des tarifs réglementés de vente, nous avons aujourd'hui des solutions qui valorisent l'effacement, c'est-à-dire la flexibilité dans l'appel de puissance de nos clients. Nous avons en particulier les offres de type EJP qui consistent à inciter le client à réduire sa consommation le jour J, le jour où on estime que la puissance appelée va être importante et ce par un signal tarifaire qui est un prix du kilowattheure plus élevé ce jour-là. C'est le même fonctionnement que les différentes pointes mobiles que nous avons dans nos tarifs verts en particulier. Le client est prévenu à J-1. La durée de l'effacement est de 13 heures pour ce qui est de l'EJP et elle peut être variable pour ce qui concerne les pointes mobiles.

Nous avons aussi, à l'égard de nos plus grands clients industriels, des offres d'effacement sur mesure où nous allons valoriser en particulier l'interruption de process. On pense notamment à des entreprises de la sidérurgie, à des grands acteurs qui sont capables d'arrêter leur process, des fours par exemple, de l'électrolyse, de sorte à réduire l'appel de puissance à ce moment-là. Dans ce cas, nous pouvons valoriser sur mesure les capacités d'effacement de nos clients. Nous avons également des pointes fixes, c'est-à-dire un prix du kilowattheure plus cher aux heures de pointe du matin et du soir, qui donnent droit à un prix du kilowattheure moins cher en dehors de ces pointes fixes.



Clairement, ces offres tarifaires historiques, qui ont été inventées il y a une trentaine d'années pour les plus anciennes, doivent évoluer, tout simplement parce que les besoins de flexibilité ne sont plus ceux qui existaient auparavant. Comme nous l'avons vu, les usages évoluent, la nature de la production évolue également. Il faut tenir compte aussi de la réglementation environnementale. Sur la Région parisienne par exemple, l'utilisation de groupes électrogènes est extrêmement réglementée. Par ailleurs, la mise en place de la loi NOM va redonner des marges de manœuvre au travers du marché de capacité. Puis, les avancées technologiques vont nous permettre également de télé-piloter certains usages de nos clients et donc de leur faciliter l'activation ou la désactivation de certains usages.

C'est ce que nous visons à expérimenter et à mettre sur le marché, à travers une gamme qui va s'articuler autour d'offres où nous allons rémunérer l'engagement du client à baisser sa puissance. Par rapport à une puissance contractuelle de référence, le client va s'engager à baisser sa puissance d'un certain niveau. Dans ces offres d'engagement d'effacement, il pourra souscrire des options de télé-pilotage, comme je l'évoquais précédemment. Nous visons également à rénover tout le système tarifaire qui compose aujourd'hui les offres que vous avez souscrites, en utilisant notamment les comptages communicants, les comptages de type Linky ou PME/PMI pour les sites jaunes et verts. Cela permettra d'avoir des plages horaires et des plages de prix différenciées et beaucoup plus flexibles que celles qui existent actuellement.



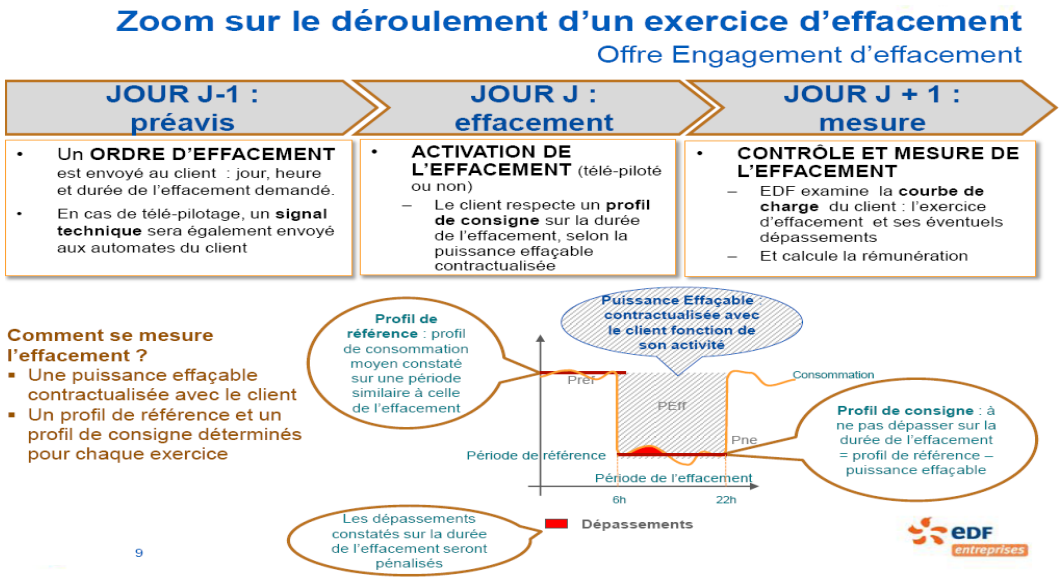
Les EJP avaient des formats longs. En l'occurrence, nous développons aujourd'hui des formats courts, moyens et longs. Le format court correspond à deux heures, ce qui peut être long pour certains usages. Je le dis en particulier pour l'inertie thermique.

D'un point de vue économique, aujourd'hui, nous ne percevons pas de valeur en-deçà de ces plages. Le format moyen correspond à quatre heures. Dans les plages horaires, on retrouve les pointes du matin et du soir sur lesquelles nous pouvons naturellement valoriser ces effacements.

L'essentiel est l'accompagnement de nos clients pour identifier les gisements d'effacement, pour évaluer la profondeur du gisement d'effacement et pour évaluer la nature des technologies qu'il faut mettre en place pour pouvoir activer ces effacements. La dimension conseil est tout à fait essentielle pour mettre cet effacement en œuvre.

Dans la pratique, comment se passe un effacement ? Il y a un préavis à J-1, avant 17 heures. On envoie aux différentes personnes qui ont été désignées chez le client l'information relative au fait que le lendemain, on souhaite activer un effacement, ainsi que l'information relative à la durée de l'effacement demandé. En cas de télé-pilotage, on informe tout de même les utilisateurs du fait qu'un signal va être envoyé pour télé-activer l'usage que l'on souhaite soit arrêter soit démarrer, dans le cas notamment d'un groupe électrogène. Le jour J, l'effacement est activé. Le jour J+1, il nous faut contrôler la réalité de l'effacement pour ensuite rémunérer le client en fonction du respect ou non des conditions contractuelles de l'offre d'effacement. Pour ce faire, il nous faut examiner la courbe de charge du client et calculer le niveau de rémunération.

Comment est faite la mesure ? Nous avons une puissance de référence, le profil de référence qui est le profil de consommation moyen que l'on constate sur une période similaire à celle de l'effacement. Il peut s'agir par exemple de la consommation moyenne ou de la puissance moyenne de la semaine précédente. La puissance effaçable qui est contractualisée par le client correspond au différentiel entre la puissance de référence du profil de référence et la puissance que le client ne doit pas dépasser durant la période d'effacement. Ensuite, nous regardons le profil de consommation du client qui nous permet éventuellement d'identifier des dépassements par rapport à la consigne de puissance à ne pas dépasser et dans ce cas, de constater les pénalités qui sont à déduire de la rémunération du client. Dans la pratique, c'est un peu plus souple puisqu'en réalité, il y a un tunnel autour de la courbe de charge et il y a beaucoup plus de flexibilité qui permet au client, le cas échéant, en fonction d'évènements fortuits, de bénéficier malgré tout de la rémunération.



Ceci est une expérimentation. Nous l'avons fait en Bretagne, ce qui ne nous vous étonnera pas. Nous l'avons fait en Bretagne parce que la Bretagne est une zone énergétique fragile. 5 % de la consommation bretonne est produite localement. 95 % de la consommation est importée de l'extérieur, ce qui rend d'autant plus fragile la Bretagne. C'est la raison pour laquelle nous avons testé, avec un certain nombre d'industriels, sur une trentaine de mégawatts, ce type d'offres durant cet hiver. Nous visons à industrialiser cette solution avec tout le système de télégestion, sur les quatre natures d'usage de l'effacement que j'évoquais tout à l'heure, dans le cadre d'un pilote qui sera sur trois régions, la Bretagne, Rhône-Alpes et PACA, durant l'hiver 2012-2013, pour aller vers une mise sur le marché généralisée. Le niveau de puissance que l'on cherche à activer correspond à des puissances effaçables supérieures à 250 kilowatts, ce qui est relativement significatif. C'est plus adapté au tertiaire, aux process industriels et à des groupes électrogènes. Nous valorisons également l'effacement lorsque le client est en nouvelle offre, alors qu'avec les clients qui sont au tarif réglementé de vente, nous fonctionnons sous forme de convention d'expérimentation, aussi bien durant l'expérimentation que durant le pilote.

Pour ce qui est des offres d'incitation tarifaire, le fait d'avoir des signaux de prix différenciés dans le temps, un peu plus souples et plus flexibles que ceux que l'on connaît dans nos offres tarifaires actuelles, nécessite de savoir à quel moment les comptages communicants seraient déployés. Vous voyez une date que l'on va qualifier de fantaisiste. Ne croyez pas que je m'engage à ce que les comptages communicants soient déployés, actifs et que le système d'information fonctionne en 2014. Loin s'en faut. C'est aujourd'hui l'échéance la plus courte que l'on puisse imaginer, compte tenu du fait que la décision de la généralisation des comptages communicants a commencé par Linky et s'est poursuivie par le comptage PME/PMI. La mise en place des infrastructures associées nécessitera plus de deux ans et la décision n'est pas prise aujourd'hui. Merci de votre attention. Je suis naturellement prêt à répondre aux questions que vous auriez sur cet exposé.

Questions et débat

David Ernest, *Vinci Facilities*

Qui est le pilote du délestage ? Prenez-vous la main sur le délestage ? Allez-vous faire confiance à l'exploitant d'un site industriel par exemple pour que lui-même mette en place le système ? Ensuite, combien rapporte votre système ?

Philippe Commaret

Lorsqu'il y a un exploitant sur site, nous travaillons systématiquement avec lui. Nous cherchons à faire un contrat tripartite entre le client, l'exploitant et EDF. Naturellement, c'est lui qui connaît le mieux les usages, les process, qui est présent sur le site et qui est le mieux à même d'agir ou de réagir le cas échéant. Un exploitant de groupes électrogènes ou un exploitant d'utilité industrielle par exemple est le mieux à même d'agir et de réagir. Nous cherchons systématiquement à fonctionner avec l'exploitant, en lien avec le client.

Concernant la rémunération, je vais vous donner quelques chiffres. Le premier concerne ce que coûte un moyen de production centralisé de pointe : 60 € le kilowatt. Naturellement, les effacements sont beaucoup moins fiables que les moyens de production de pointe et ils ne peuvent pas être sollicités aussi souvent que les moyens de production de pointe de type cycle combiné gaz. Par conséquent, la valeur de l'effacement est significativement moindre que ces

60 €. Tel est le cap. Ensuite, les référentiels dont nous disposons sur le marché sont des appels d'offres que le RTE a lancés au titre non plus de la valorisation par un producteur, mais au titre d'achat de l'effacement. En ce qui concerne le RTE, il doit quant à lui assurer l'équilibre en France à tout moment. Il achète donc des capacités d'effacement qu'il active en quasi-temps réel, avec des délais qui sont de 30 ou de 13 minutes, de sorte à pourvoir garantir l'équilibre entre la production qu'il a prévu d'injecter et la consommation qu'il observe à un instant donné. Pour garantir cet équilibre, il a lancé des appels d'offres et ces appels d'offres ont valorisé entre autres certaines capacités d'effacement. Le niveau de rémunération dont nous disposons au titre de ces appels d'offres est de l'ordre de 20 € le kilowatt.

Maxime Trocmé

A partir de quelle quantité d'énergie peut-on venir vous voir en souhaitant faire de l'effacement ?

Philippe Commaret

Il faut bien voir que l'effacement est d'abord une contrainte pour nos clients. Soyons clairs. L'effacement signifie pour le client une modification de son process industriel, alors que son objectif est naturellement de produire. Il signifie l'utilisation de groupes électrogènes, avec les risques associés. L'effacement induit également pour le client de jouer avec l'inertie thermique, donc potentiellement de risquer de toucher à son confort ou à la qualité des aliments qu'il stocke dans son entrepôt frigorifique. L'effacement est une contrainte pour nos clients. Cette contrainte a un coût et nos clients exigent naturellement un certain niveau de rémunération avant de s'engager dans une offre d'effacement. Il faut que la rémunération associée à l'effacement vaille le coup potentiel qu'il y a derrière ces effacements. C'est la raison pour laquelle nous ne valorisons que des effacements dont la puissance est suffisamment importante. Le niveau de puissance minimum que nous valorisons est au-delà de 250 kilowatts.

Il y a une autre contrainte dont je n'ai pas parlé, mais qui est connue par les experts. Comme vous l'avez vu, nous avons besoin d'avoir la courbe de charge pour contrôler la réalité de l'effacement. Le système de comptage actuel fait que nous sommes limités aux compteurs qui nous permettent de relever la courbe de charge. Ce sont les compteurs télé-relevés, les compteurs verts pour faire court qui sont télé-relevés par l'opérateur de réseau et qui nous permettent de vérifier la réalité de l'effacement sur la courbe de charge du client.

Un participant

Il y a 25 ans, j'ai mis en œuvre un certain nombre d'effacements jour de pointe dans des établissements qui ont besoin d'un groupe électrogène de secours pour faire fonctionner leurs installations, l'idée étant de le faire produire au moment des heures de pointe. Cela existe depuis très longtemps. Si ma mémoire est bonne, la pénalisation, si on fait appel au réseau, est extrêmement forte et dissuasive. Il faut donc des installations très fiables pour que le système fonctionne. A un moment donné, EDF faisait la promotion de ses tarifs EJP. Cette promotion a totalement disparu aujourd'hui, même si on la voit réapparaître un peu dans le discours.

Par ailleurs, en termes de développement durable, on fait appel spontanément à de l'énergie fossile, avec des moyens de production locaux dont le rendement n'est pas forcément aussi bon que celui de productions centralisées.

Philippe Commaret

Concernant les EJP, le besoin de flexibilité et de souplesse est relativement récent. L'actualité nous l'a montré. Durant un certain nombre d'années, EDF n'a pas fait la promotion des tarifs EJP. Malgré tout, ils étaient bien connus, ils sont bien connus de nos clients et ils peuvent toujours y souscrire. Ces offres sont toujours actives. Cependant, ces offres ont un certain nombre de contraintes, comme je l'évoquais tout à l'heure (la durée et les pénalités associées). Par conséquent, ce sont plutôt les clients qui se sont désintéressés de ce type d'offres. Pourquoi ? Parce que le coût du fuel a augmenté et le niveau de rémunération associé pour les offres EJP est resté constant depuis les années 90. Ainsi, à un moment donné, pour un certain nombre de clients, l'intérêt a baissé. Les clients nous ont dit que nos offres EJP n'étaient plus adaptées à leurs contraintes ni aux types de contraintes que nous mettions, qu'elles n'étaient plus adaptées à ce qu'ils vivaient. Il y a eu un désintérêt qui s'est traduit par le fait que nous ne poussions plus ce type de solution.

Un participant

Autrement dit, le prix du kilowattheure est trop bas.

Philippe Commaret

Le prix du kilowattheure est trop bas, j'en conviens. Que voulez-vous dire par rapport à cela ?

Un participant

C'est un rapport de coût entre le prix du gasoil et le prix du kilowattheure.

Philippe Commaret

Je ne me prononcerai pas sur ce point, mais nous pourrons en reparler, si vous le voulez.

Concernant la deuxième partie de votre question, vous avez parfaitement raison, lorsqu'on fait appel à des groupes électrogènes, on substitue un moyen de production de pointe centralisé qui fonctionne avec des énergies fossiles également par un autre moyen de production qui est décentralisé et qui potentiellement, peut avoir un rendement moindre. Nous avons fait des analyses en la matière pour savoir si l'écart de rendement était significatif ou pas. Nous n'avons pas trouvé d'écart significatif. Aujourd'hui, dans les offres que l'on expérimente, nous sommes extrêmement exigeants sur le rendement et le niveau de qualité de l'énergie produite par le groupe électrogène. ERDF est particulièrement exigeant en la matière et a toute une grille d'audit et de qualification de ces groupes électrogènes pour qu'ils réinjectent dans le réseau. Nous sommes sur des groupes électrogènes dont le rendement est similaire à celui de moyens de production centralisés, qui ont été construits, pour certains, il y a dix, vingt ou trente ans et dont on peut imaginer que le rendement est moindre par rapport à des groupes électrogènes installés aujourd'hui.

Par ailleurs, derrière ces offres, nous n'incitons pas seulement les clients qui ont des groupes électrogènes. Nous visons aussi à valoriser les flexibilités de ceux qui peuvent arrêter leur process ou jouer sur l'inertie thermique. Nous jouons sur différents panels. Le bénéfice environnemental n'est pas vrai pour tous types d'effacements, vous avez raison. Il est vrai pour certains types d'effacements. En revanche, l'intérêt pour ceux qui ont des groupes électrogènes est la possibilité de les entretenir, de s'assurer qu'ils fonctionnent et d'investir

sur ces groupes électrogènes pour les télé-piloter, ce qui leur apporte d'autres bénéfices.

Un participant

J'ai une question un peu prospective. Je crois que cet hiver, nous avons atteint environ 100 gigawatts. Supposons que l'on ait le même hiver et qu'il n'y ait pas de croissance de la demande dans cinq, dix ou quinze ans. Avec ce genre de politiques incitatives que vous appliquez dans un premier temps aux clients industriels qui appellent plus de 250 kilowatts, que vous appliquerez ensuite à tous les industriels et finalement aux ménages, quelle fraction de ces 100 mégawatts espérez-vous déplacer de la pointe vers d'autres heures ?

Philippe Commaret

C'est une question prospective, mais pour y répondre, je vais commencer par regarder dans le rétroviseur et voir quel gisement d'effacement nous avions réussi à activer par le passé, aux meilleures heures des EJP. Nous arrivions alors à déplacer 6 gigawatts de puissance. Aujourd'hui, les meilleures estimations que l'on fait nous amènent à penser que nous pouvons arriver à déplacer entre 3 et 5 gigawatts de puissance. C'est ce que l'on vise dans le futur. La différence vient du coût des groupes électrogènes qui a largement augmenté.

Un participant

Je suis stupéfait par la faiblesse du chiffre. Dans quinze ans, je suppose que dans les domiciles, tous les compteurs seront intelligents, que nous pourrons stocker du froid dans le congélateur ou le réfrigérateur, que nous aurons des radiateurs à accumulation. Mon sentiment était que le ratio était beaucoup plus élevé que 3 %. En gros, on faisait mieux il y a quelques années avec les EJP.

Philippe Commaret

Le coût du fuel, il y a quelques années, était totalement différent de celui que l'on connaît aujourd'hui. Sur les 6 gigawatts que j'évoque, il y avait 5 gigawatts de groupe électrogène.

Un participant

Il y avait un gigawatt par déplacement effectif de consommation d'énergie et cinq par substitution avec une autre énergie qu'est le groupe électrogène.

Philippe Commaret

Oui. Je me positionnais plutôt à un horizon 2015-2020, je n'étais donc pas à un horizon où tous les équipements pourraient être télé-pilotables. Dans ce cas, ma réponse est certainement totalement fausse. A cet horizon 2015-2020, le type d'usages qui seront télé-pilotables reste somme toute relativement marginal. Nos estimations nous amènent donc à ce chiffre.

Un participant

Vous n'incluez pas les ménages.

Philippe Commaret

Il y a une faible part de ménages. Dans toutes les maisons qui sont construites avec le chauffage électrique, aujourd'hui, un gestionnaire d'énergie est posé systématiquement. Ce gestionnaire d'énergie va effacer la puissance appelée à certaines heures ou il va chercher à optimiser la consommation énergétique à certaines heures, en fonction des signaux tarifaires qui sont adressés. Au travers du chauffage électrique, au travers du stockage par le ballon d'eau chaude, il y a des systèmes qui préexistent et qui permettent déjà de lisser l'appel de puissance. C'est tout l'effort qui a été accompli sur le système tarifaire ces trente dernières années.

Christian Caye, *Délégation au développement durable, VINCI*

J'ai deux questions très modestes. J'ai vu que le décret devrait peut-être pouvoir sortir courant 2012. J'ai cru comprendre qu'il se passerait des choses en 2012 en France, dans peu de temps. Quelle est la probabilité que le décret sorte ? Il n'est pas inutile de le vérifier.

Ma deuxième question est encore plus simple. Dans votre document, il était écrit à un moment donné « document confidentiel ». Nous avons l'habitude, au sein de la chaire, de mettre les présentations à disposition des participants. Pouvons-nous diffuser l'information ou pas ?

Philippe Commaret

Vous m'obligez à dévoiler un secret de fabrique. J'ai fait mes slides en me reposant sur un format confidentiel que j'ai oublié de modifier. Vous pouvez donc diffuser cette présentation.

Quant à la première question, elle est simple, mais elle est complexe en réalité dans sa réponse. La loi NOM a été impulsée au travers de toute une réglementation qui part de l'Europe. Il est aujourd'hui difficile d'imaginer un rétropédalage par rapport à cette loi NOM. S'il y a du rétropédalage, il sera partiel sur certains aspects de la loi NOM. Personnellement, en particulier sur la dimension de capacité où l'enjeu est la sécurité électrique en France, enjeu qui est partagé par l'ensemble des pouvoirs publics, j'ai du mal à imaginer que l'on puisse revenir sur un tel mécanisme, tout en sachant que j'ai mis des « peut » et des « pourra » parce que le mécanisme n'a pas encore été défini. Il faut le construire. C'est donc plutôt l'occasion que les techniciens, les experts et les politiques utilisent ce système à construire pour le développer en 2012. L'enjeu n'est pas tellement politique en la matière. Les enjeux politiques portent plutôt sur l'évolution du prix de l'énergie et sur l'évolution du mix énergétique.

Christian Caye

Ma voisine qui travaille à La Fabrique de la Cité me faisait remarquer qu'ils avaient fait des travaux sur la nouvelle donne énergétique qui allaient sortir courant juin. Il y aura certainement un évènement dont on ne connaît pas encore la forme, mais qui donnera de l'information sur la nouvelle donne énergétique.

Un participant

J'ai une question pour mieux comprendre la flexibilité. Je vois que vous déclenchez l'offre d'effacement à J-1. Dans un processus de fabrication ou de production, cela laisse très peu de temps pour se retourner, à moins d'avoir une énergie de remplacement disponible qui peut être polluante. Je voulais savoir si quelque chose pouvait éventuellement améliorer ce délai ou si vous le faisiez pour l'exemple.

Philippe Commaret

Non, ce n'est absolument pas fait pour l'exemple. En réalité, ce délai correspond véritablement à la façon dont nous planifions notre parc de production. Comme nous l'avons vu tout à l'heure, l'effacement est l'équivalent d'un moyen de production. Dans ce que l'on appelle le merit order, c'est-à-dire le coût des moyens de production, si on voit que les besoins de production dépassent le prix auquel nous rémunérons le client de l'effacement, on active l'effacement à J-1 avant 17 heures. Je suis d'accord avec vous, ce délai à J-1 peut paraître relativement court par rapport à un certain nombre d'usages énergétiques. C'est la raison pour laquelle nous développons les systèmes de télégestion, afin de faciliter la reprogrammation, avec le client, de ses usages énergétiques.

Un participant

Il y a certes des usages énergétiques, mais derrière, il peut y avoir des problèmes sociaux, des problèmes d'équipes. Dans une chaîne de production, on a à gérer autre chose que des interrupteurs.

Philippe Commaret

Je suis absolument d'accord et vous touchez du doigt le fait que le gisement d'effacement est somme toute relativement limité. Lorsque les moyens de production ne sont pas décentralisés, lorsqu'on est sur des process, de l'inertie thermique où on va être à un dixième de la puissance que l'on peut appeler ou sur de la production de chaleur, les gisements d'effacement sont relativement limités. C'est pour cette raison que nous pouvons effacer 3 à 5 % de la puissance appelée.

Un participant

Dans votre secteur de production, y a-t-il des gisements de progrès pour améliorer ce délai ?

Philippe Commaret

Non.

Un participant

Est-ce que vous travaillez sur de l'effacement diffus, à base de microcoupures pour les consommations qui pourraient s'y prêter ?

Philippe Commaret

J'avais prévu ne vous parler que de ce que nous faisons dans l'industrie, à savoir des effacements de très forte puissance. Nous avons également tout un programme d'expérimentation sur l'effacement diffus, également en Bretagne, sur un millier de logements environ. Nous avons un problème en la matière, à savoir que l'équation économique est extrêmement onéreuse. Nous sommes très largement au-delà des fameux 60 € par kilowatt que j'évoquais tout à l'heure. Aujourd'hui, l'écosystème technologique ne permet pas de produire de façon économique de l'effacement sur les logements individuels. C'est la raison pour laquelle nous privilégions plutôt des signaux prix, c'est-à-dire des offres de fourniture d'électricité avec des prix différenciés qui vont inciter le client à reporter leur consommation d'une heure sur une autre. Cependant, nous pouvons imaginer que demain, des ruptures technologiques nous permettent de trouver un équilibre économique pour faire en sorte que l'agrégation de ces effacements diffus permette d'atteindre un certain niveau d'économies. Il faut avoir en tête que dès que l'on joue sur l'inertie thermique, on incite le client à chauffer un peu plus. Ce n'est donc pas très performant en matière d'efficacité énergétique. Nous sommes extrêmement méfiants sur ces effacements diffus et le travail sur l'inertie thermique dans les bâtiments.

Maxime Trocmé

La transition est toute faite. Nous allons justement parler du gisement d'effacement dans les bâtiments. Béranger Favre qui est l'un des nombreux doctorants de la chaire Éco-conception et qui fait sa thèse à l'École des Mines de Paris, va nous présenter cette problématique.

Intégration des bâtiments dans les réseaux intelligents : cas de la régulation du chauffage électrique

Béranger Favre, *doctorant de la chaire Éco-conception, Mines-ParisTech*

Je vais vous présenter ce que l'on peut faire dans les bâtiments pour effacer une partie de la pointe de consommation électrique. Je vais m'intéresser uniquement au cas du chauffage électrique et donc voir ce que l'on peut faire pour réduire l'appel des bâtiments, en France, sur le réseau électrique en période de pointe.

Je vais d'abord présenter l'enjeu et les problématiques du sujet, même si cela a déjà été finement fait auparavant. Ensuite, je vais vous présenter la méthode que j'utilise pour effacer la pointe de consommation du chauffage. Je vous présenterai ensuite deux cas d'études, avec une maison très bien isolé et une maison peu isolée, pour voir les différences et voir si cela est possible dans certains cas ou pas. Enfin, je terminerai par les conclusions et perspectives.

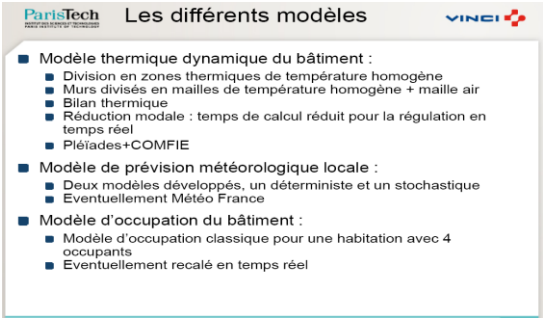


Nous savons que les bâtiments basse consommation sont très fortement isolés et qu'ils sont très sensibles aux variations climatiques, surtout aux apports solaires. Tous les apports solaires qui vont rentrer par les fenêtres vont rester un peu coincés dans le bâtiment. Ces bâtiments basse consommation sont également très sensibles aux comportements des occupants. En France, 70 % des logements neufs sont équipés d'appareils de chauffage électrique, ce qui entraîne des problèmes sur la pointe de consommation électrique, comme nous avons pu le voir courant février. Pour ces deux raisons, nous devons améliorer la gestion des bâtiments basse consommation, afin d'améliorer le confort dans ces bâtiments, de faire des économies d'énergie, mais aussi de voir s'il est possible de faire une gestion de la pointe électrique dans ces bâtiments.

En fait, on va gérer des équipements, en l'occurrence le chauffage électrique, en fonction des variations climatiques futures et du comportement des occupants, donc des apports internes. On prend vraiment en compte une période future et on va donc avoir quelque chose qui sera prédictif et anticipatif. Ensuite, on met en place une stratégie de gestion énergétique. Ce sont en fait des actions qui vont être décidées, par exemple sur la commande de chauffage, sur la

ventilation, sur les stores. Ces actions vont être faites à chaque pas de temps. Dans mon cas, un pas de temps correspond à une heure. On va commander le chauffage électrique et on va essayer de réduire le pic de consommation électrique. On peut aussi penser à commander les stores, la ventilation, qu'elle soit naturelle ou forcée, pour maintenir le confort thermique dans le bâtiment. C'est davantage en été, dans le cas de fortes canicules. Comment faire pour maintenir le confort quand il fait très chaud ? On va ensuite comparer toutes ces régulations à des régulations plus classiques pour voir si elles sont pertinentes.

Je vous présente maintenant la méthode. **Pour mettre en place ceci, il faut forcément un modèle thermique dynamique du bâtiment. Qu'est-ce que ce modèle ?**

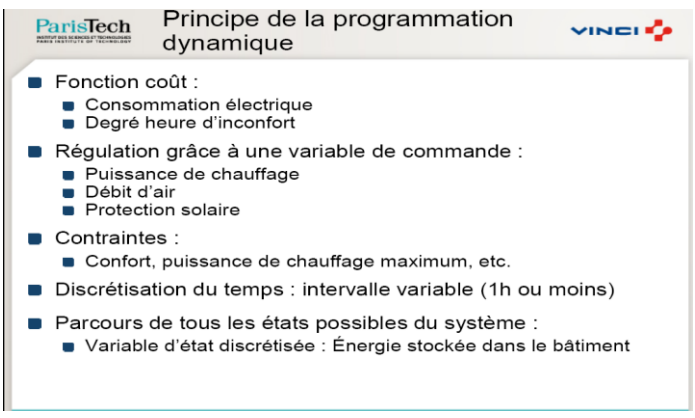


On divise le bâtiment en plusieurs zones thermiques où la température de l'air est homogène. Ensuite, dans chacune de ces zones, on divise les murs en mailles ayant également une température homogène. Il y a en plus une maille qui correspond à l'air de la zone. Sur chacune de ces mailles, on fait ensuite un bilan thermique.

Pour améliorer les temps de calcul et permettre de faire des régulations en temps réel, on va faire ce que l'on appelle une réduction modale qui permet d'être beaucoup plus rapide. Ce modèle dynamique thermique du bâtiment a été fait sur Pleiades+COMFI qui est un logiciel d'estimation thermique dynamique.

Pour alimenter ce modèle thermique de données, il faut avoir des prévisions météorologiques. On va faire de l'anticipatif. J'ai développé deux modèles : un modèle déterministe et un modèle stochastique. On peut aussi penser faire appel à Météo France qui fait forcément de meilleures prévisions que moi, mais elles ne sont pas locales. Il faut aussi alimenter le modèle thermique avec des données d'occupation. Pour l'instant, j'ai simplement un modèle d'occupation classique d'un logement pour quatre personnes. Eventuellement, nous pourrons recaler ceci en temps réel, en fonction de l'occupation du bâtiment.

La méthode d'optimisation que j'utilise s'appelle la programmation dynamique. Cette méthode va permettre de mettre en place les régulations énergétiques du bâtiment. C'est une méthode d'optimisation que l'on appelle exacte parce qu'elle explore tout le spectre des solutions possibles. La solution obtenue sera forcément optimale ; je n'aurais pas un maximum ou un minimum local. La programmation dynamique permet également de faire une commande prédictive, d'anticiper une période future. Notre objectif est de mettre en place des régulations thermiques du bâtiment. Pour ce faire, nous allons travailler sur l'inertie thermique du bâtiment. On va essayer de stocker de l'énergie dans la masse thermique du bâtiment pour l'utiliser à une période où on en a plus besoin.

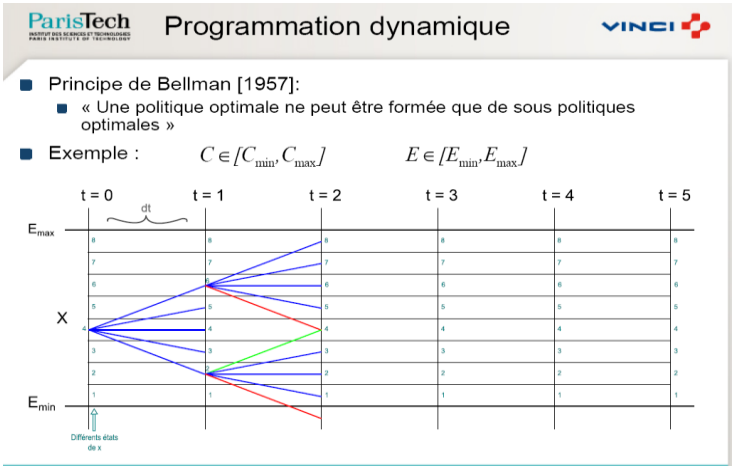


Quel est le fonctionnement ?

Nous avons besoin de définir d'abord une fonction coût qui peut être le coût de la consommation d'électricité à chaque heure, qui peut être un coût en degré-heure d'un confort. En période estivale par exemple, le fait de dépasser

les 26 degrés enclenche un coût. On va réguler une variable de commande. Dans notre cas, ce sera le chauffage électrique, mais cela peut être aussi le débit d'air ou les protections solaires. Il y a certaines contraintes relatives au confort. Il faut tout de même garantir des conditions de confort à l'occupant. Il y a également des contraintes sur la commande, avec une puissance de chauffage maximum installée dans le bâtiment. Ensuite, on va utiliser une discrétisation horaire du pas de temps, c'est-à-dire qu'on va avoir une puissance de chauffage dans le bâtiment qui va durer une heure. Au bout d'une heure, on recalculera une nouvelle commande. Le pas de temps est donc horaire.

Pour faire fonctionner la programmation dynamique, il faut utiliser ce que l'on appelle une variable d'état. Nous avons choisi comme variable d'état l'énergie totale stockée dans le bâtiment. Cette énergie va être discrétisée dans ses valeurs et aussi temporellement puisqu'on fait des commandes toutes les heures. Dans la programmation dynamique, on va parcourir l'ensemble des états possibles à chaque pas de temps. Cela nécessiterait beaucoup de calculs, on met donc en place un principe qu'on appelle le principe de Bellman.



Pour expliquer tout cela un peu plus clairement, je vous présente un petit schéma. Le C représente la commande, en l'occurrence le chauffage qui va être compris entre une valeur minimum, C Min et une valeur maximale C Max. E correspond à la variable d'état qui est en l'occurrence l'énergie qui est elle aussi limitée entre l'énergie minimum et l'énergie maximum. Il y a cinq pas de temps de T=0 à T=5. Nous avons discrétisé notre variable énergétique en huit intervalles, de 1 à 8. On suppose que notre bâtiment démarre dans l'intervalle énergétique n°4.

Qu'allons-nous faire pour le premier pas de temps ? Nous allons calculer quelle puissance de chauffage est nécessaire pour passer de l'état 4 à l'état 6, pour passer de l'état 4 à l'état 5 et ainsi de suite. On voit bien que nous ne pouvons pas atteindre tous les états. Par exemple, les états 1, 7 et 8 ne sont pas atteints parce que le chauffage est limité dans ses valeurs.

Qu'allons-nous faire pour le second pas de temps ? Nous avons maintenant cinq points de départ et nous allons faire exactement pareil. Nous allons calculer le chauffage pour passer de l'état énergétique 6 à l'état énergétique 8. Nous obtenons plusieurs cas possibles. Nous faisons la même chose pour les cinq cas. Je n'ai illustré les cas qu'à partir de 6 et de 2. A un moment, on voit que nous pouvons aller en-dessous de cette valeur minimum d'énergie, mais on ne le fait pas puisqu'on a déterminé que l'on n'irait pas en-dessous de cette valeur énergétique.

Au bout d'un moment, nous arrivons à une politique. Une politique, c'est un ensemble de commandes, ici par exemple 4, 6, 4, qui va rencontrer une autre politique, ici par exemple 4, 2, 4. Nous allons les comparer au sens de la fonction coût. On va regarder par exemple celle qui a coûté le plus cher en chauffage. On suppose par exemple que la politique qui fait 4, 6, 4 a coûté plus cher et on l'élimine. On ne s'y intéressera plus. Au final, à chaque pas de temps, nous n'aurons que huit politiques possibles. Nous aurons fait beaucoup moins de calculs que si nous avions fait tous les cas possibles. Cela permet donc de limiter le nombre de calculs à

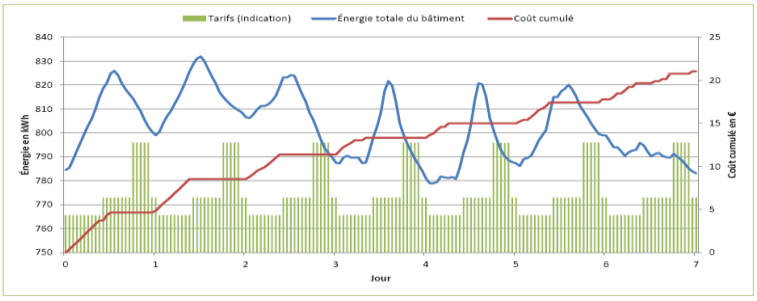
effectuer. Nous allons parcourir l'ensemble des solutions possibles parce que nous allons parcourir l'ensemble des états possibles énergétiques du bâtiment.



J'en viens maintenant aux cas d'études, premièrement sur la maison qui est très bien isolée. C'est une maison BBC de 90 m^2 qui est sur deux niveaux. Nous avons fait une modélisation thermique mono-zone. Il va y avoir une seule zone thermique, une seule température de l'air et donc une seule commande de chauffage. Le chauffage est un convecteur électrique avec une puissance de 5 000 watts. Nous allons donc essayer d'effacer la consommation du chauffage de 5 000 watts, ce qui est loin des 250 kilowatts que demande EDF. Le besoin de chauffage annuel de la maison est de 22 kilowattheures par mètre carré. Nous avons une occupation classique, c'est-à-dire quatre personnes qui sont présentes de 19 heures à 8 heures et continuellement le week-end. Pour être dans un cas intéressant d'effacement de la pointe, nous avons choisi une météo froide. Vous voyez en bleu l'évolution de la température extérieure qui ne dépasse pas souvent zéro degré. De plus, peu de rayonnements solaires arrivent sur la maison. Nous sommes donc vraiment d'un l'un des cas les pires possibles.

J'ai essayé de faire un smart tarif. J'ai pris les heures creuses et les heures pleines habituelles d'EDF, avec leur prix du kilowattheure et j'ai rajouté des heures de pointe de 17 heures à 21 heures dont j'ai doublé le prix par rapport aux heures pleines. Les heures creuses sont, me semble-t-il, égales à 50 % des heures pleines et les heures de pointe vont être égales à deux fois le prix des heures pleines. C'est le signal tarif qui va nous permettre de dire qu'on ne veut plus consommer de chauffage pendant les heures de pointe puisque le coût sera beaucoup plus élevé.

	Heures creuses	Heures pleines	Heures de pointe
Horaire	1H – 8H	9H – 16H 22H – 24H	17H – 21H
Prix du KWh en €	0.0864	0.1275	0.255

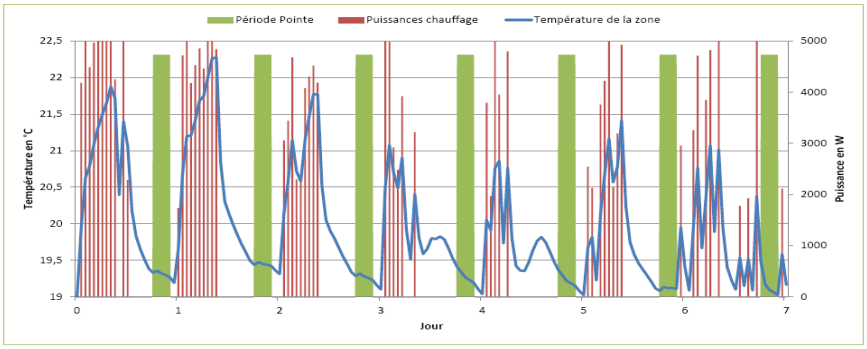


Quels sont les résultats ? En vert, c'est le tarif en heures creuses, heures pleines et heures de pointe, sur sept jours. En bleu, c'est l'énergie totale qui est stockée dans le bâtiment. Elle évolue de façon à peu près cyclique chaque jour. Il faut savoir qu'elle est toujours influencée par la météo extérieure. En rouge, c'est le coût cumulé et c'est ce qui nous intéresse. On voit très bien que pendant toutes les périodes de pointe, le coût cumulé stagne. Cela veut dire que pendant toute la période de pointe, on a réussi à ne pas utiliser le chauffage et donc à effacer la pointe électrique pendant cinq heures, ce qui est assez important. En fait, on a même réussi à aller au-delà parce qu'on se rend compte que le coût cumulé stagne aussi parfois pendant toutes les heures pleines. Pendant le cumul des heures pleines et des heures de pointe, on arrive à ne pas chauffer le bâtiment si on surchauffe bien le bâtiment pendant les heures creuses, de 1 à 8 heures du matin. Dans un bâtiment très bien isolé, nous pouvons donc faire de l'effacement de consommation de chauffage en période de pointe, mais nous pouvons également prendre en compte les heures pleines.

Maintenant, on va tout de même se poser la question du confort. Deux questions se posent sur le confort. Est-ce que la température intérieure du bâtiment va rester au-dessus de 19 degrés ? C'est une contrainte que j'avais mis dans mon degré d'optimisation.

Période	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h
Variation maximale de la température opérative	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3

ASHRAE 2003



En bleu, apparaît donc la température intérieure. On voit qu'elle ne descend jamais en-dessous de 19 degrés. Elle évolue entre 19 et 22,5 degrés environ. Comme on fait de l'effacement de la consommation de pointe, on ne va pas chauffer pendant les périodes de pointe. Dès lors, on va surchauffer avant. C'est ce que l'on voit en rouge, à savoir la puissance de chauffage instantanée. La température intérieure va augmenter assez rapidement et va redescendre assez rapidement dès que l'on arrête de chauffer. Peuvent donc se poser des problèmes d'inconfort. Si la température augmente ou diminue trop vite, il y a de trop gros changements de température, ce qui peut entraîner des problèmes de confort pour l'habitant. Dans ce cas d'étude, la température varie au maximum de 1,5 degré par heure. Nous avons donc pu répondre aux deux critères de confort que sont une température minimum de 19 degrés et une variation qui n'est pas trop importante dans le bâtiment.

- Comparaison tarifaire :
  - Régulation classique : 24.9 €
  - Programmation dynamique : 21€
  - 16% d'économie
  - Rémunération de l'effacement de la pointe possible
- Comparaison énergétique :
  - Régulation classique : E = 197 kWh
  - Programmation dynamique : E =233 kWh
  - Augmente de 18 % la consommation énergétique
  - Dépend de la météorologie

Nous allons maintenant comparer ces résultats à une régulation classique. Qu'est-ce qu'une régulation classique ? C'est une régulation qui va calculer quel chauffage il faut mettre dans la maison pour maintenir 19 degrés continuellement. C'est beaucoup plus simple. En vert, vous voyez toujours les périodes de pointe, en bleu l'énergie totale du bâtiment et en rouge la puissance de chauffage.

On voit que la puissance de chauffage est en moyenne beaucoup moins élevée puisqu'elle oscille autour de 1 000 watts. Par contre, elle est beaucoup plus continue. Elle est toujours autour de cette valeur, alors qu'en cas d'effacement de pointe, la puissance était de temps en temps au maximum de 5 000 watts. Sur ce graphique, on voit que la consommation n'a pas été effacée pendant la période de pointe.

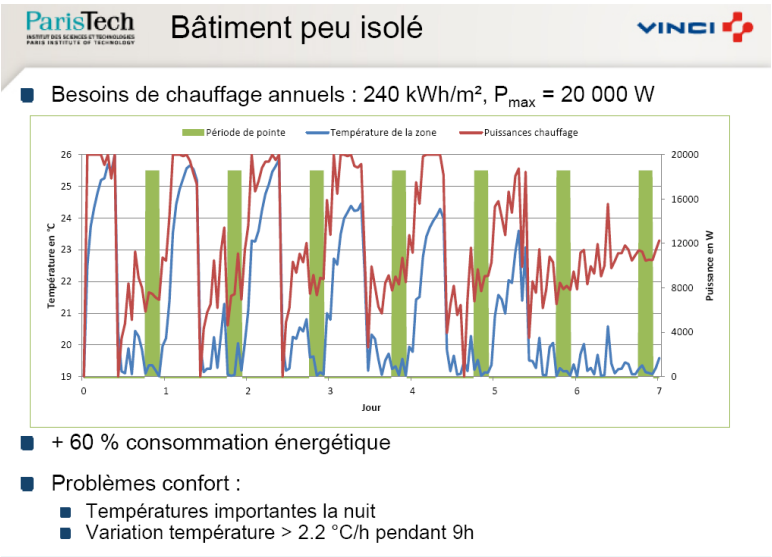
Nous pouvons ensuite faire une comparaison de ces deux régulations au niveau du tarif. La régulation classique coûte un total de 25 € pour chauffer la maison pendant une semaine. La régulation issue de la programmation dynamique s'élève à un total de 21 €. 16 % d'économies ont donc été réalisées en permettant d'effacer la pointe et en pilotant intelligemment le

chauffage. On sait qu'EDF a parfois intérêt à rémunérer l'effacement de la pointe. Nous pouvons donc imaginer encore d'autres sources bénéfiques pour l'habitant.

Par contre, en matière énergétique, comme le bâtiment a été surchauffé auparavant pour stocker de l'énergie dans la masse du bâtiment et pour la relâcher plus tard afin de rester à 19 degrés, il y a forcément quelques pertes dans le processus. On se rend compte qu'en utilisant la programmation dynamique, on a augmenté la consommation énergétique de 18 % environ. Ces valeurs dépendent aussi de la météorologie. S'il y avait beaucoup plus de soleil, cette valeur d'augmentation de la consommation énergétique serait certainement plus faible. A priori, on arrive à faire 16 % d'économies sur le coût, mais on augmente la consommation énergétique de 18 %.

Dans une maison très bien isolée, nous avons vu que nous pouvions faire de l'effacement de la pointe. Nous pouvons même faire de l'effacement sur de plus grandes périodes, par exemple sur les heures pleines.

Maintenant que se passe-t-il dans une maison actuelle un peu plus classique ? La maison est la même, mais sans isolation et avec du simple vitrage. Les besoins annuels de chauffage sont de 240 kilowattheures par mètre carré, soit environ 10 fois plus. Forcément, la puissance de chauffage pour chauffer la maison va être beaucoup plus importante. Nous l'avons portée à 20 000 watts, à la place de 5 000 watts. En vert, vous voyez toujours les périodes de pointe, en bleu l'évolution de la température intérieure et en rouge la puissance de chauffage. On constate qu'il n'est plus possible d'effacer complètement le chauffage pendant les périodes de pointe. Certes, le chauffage est moins utilisé que dans les autres périodes, mais il n'est pas possible d'effacer complètement le chauffage si la maison est mal isolée.



Dès lors, il faut faire une augmentation de la température bien plus importante. Elle passe de 19 à 26 degrés, alors qu'elle passait, dans la maison précédente, de 19 à 22,5 degrés. Je précise que la température augmente de 7 degrés entre 1 heure et 8 heures du matin. Les habitants ne peuvent pas s'adapter à ce changement vu qu'ils dorment. Cela va poser de gros problèmes de confort.

En outre, pendant toute la période où le chauffage va s'arrêter, la température va chuter au-delà des 2,2 degrés par heure. Or, on sait que c'est une source d'inconfort. Sur toute la semaine, il y a neuf heures au cours desquelles la variation de la température intérieure de la maison est supérieure à 2,2 degrés par heure. Se posent alors de vrais problèmes de confort. On n'arrive pas à effacer complètement la pointe. En plus, la consommation énergétique augmente de 60 % et non plus de 18 %. Il est donc possible d'effacer la consommation énergétique dans un bâtiment bien isolé. S'il n'est pas bien isolé, on va surchauffer le bâtiment pour ensuite réchauffer les oiseaux à l'extérieur.

Nous avons mis en place une régulation énergétique des bâtiments, principalement des bâtiments basse consommation. Pour ce faire, nous avons utilisé la programmation dynamique qui prend comme variable d'état l'énergie totale du bâtiment. Nous avons appliqué cela à l'effacement de la consommation électrique aux heures de pointe.

Cela a été possible pour les bâtiments basse consommation, mais non pas pour un bâtiment beaucoup moins bien isolé.

Nous avons donc des perspectives. Comme je vous l'ai dit, j'ai fait des prévisions météorologiques locales que je n'ai pas utilisées pour l'instant. Les cas que je vous ai présentés ont été faits sous une météo froide, connue à l'avance. Maintenant, nous pouvons essayer de voir ce qui se passe en prévoyant la météo. Nous pouvons forcément étendre cela à des modèles multizones. Pour l'instant, nous n'avons qu'une seule zone thermique dans le bâtiment. Avec deux zones, nous obtiendrions des résultats plus proches de la réalité. J'ai déjà travaillé sur la commande de la ventilation naturelle, forcée ou sur les stores pour améliorer le confort thermique en été. On anticipe une canicule, on fait de la surventilation ou on coupe les apports solaires par les stores. La programmation dynamique n'a pas qu'une seule utilité, elle peut permettre de travailler aussi sur le confort en été. Il serait aussi intéressant de travailler sur plusieurs types de bâtiments basse consommation qui ont des inerties thermiques différentes, de faire les mêmes régulations sur des bâtiments qui ont des inerties thermiques plus faibles pour voir s'il est possible ou pas d'effacer autant la pointe électrique. Merci de votre attention et si vous avez des questions, je serai ravi d'y répondre.

Questions et débat

Frédéric Adam, *Vinci Construction France*

J'ai deux questions. D'abord, faut-il avoir un super PC et Pleiades-COMFIE pour pouvoir faire de la régulation dynamique ? Est-il possible de le faire avec un petit boîtier installé près du radiateur ?

Béranger Favre

La programmation dynamique n'est pas extrêmement compliquée. Il faut réussir simplement à la mettre en place. Les temps de calculs sont importants. Pour ma part, je travaille avec un ordinateur classique. Pour faire une telle régulation, le temps varie entre trois et quinze minutes. Pour réguler la ventilation, il me faut plus de temps d'optimisation pour obtenir ces résultats. A terme, l'une des idées serait d'observer comment fonctionnent les régulations qui sont obtenues par la programmation dynamique et voir si certaines ont une logique. Si l'on arrive à comprendre la logique, on peut faire une régulation plus classique, à la main, permettant d'exploiter les résultats de la programmation dynamique. Dans ce cas, il serait possible d'avoir un boîtier et il ne faudrait même pas quinze secondes pour faire les calculs.

Frédéric Adam

Ma deuxième question concerne l'empreinte environnementale du bâtiment. On essaie d'optimiser les coûts énergétiques du bâtiment. Je ne parle pas de la maison non isolée puisqu'on voit bien que ce n'est pas le cas. Dans un bâtiment bien isolé qui a une bonne inertie thermique, arrive-t-on à vraiment réduire l'empreinte environnementale du bâtiment ?

Béranger Favre

Dans ma fonction coût, j'ai porté le coût d'utilisation de l'électricité suivant l'heure. Pour l'instant, je me suis concentré sur ce coût. Si nous voulons par exemple nous concentrer sur les émissions de CO_2, nous pouvons essayer de regarder quelles sont les émissions de CO_2 de

l'électricité utilisée suivant l'heure. Je changerais ma fonction coût et cela fonctionnerait exactement de la même façon. Dans ce cas, on essaierait de minimiser la consommation d'électricité aux périodes où il y a de fortes émissions de CO_2. Il est aussi possible de faire des mélanges. On peut essayer de minimiser les consommations d'énergie tout en minimisant les émissions de CO_2. Une fois que la méthode est en place, il est possible de faire à peu près tout.

Un participant

Bonjour. Quelle est la sensibilité à l'inertie thermique si on met trois ou quatre tonnes de matériaux qui stockent de l'énergie dans le bâtiment ? Dans les pays nordiques, ils ont des poêles de masse et il semblerait qu'en leur sein, il y ait plusieurs centaines de kilos de matériaux que l'on monte à 700 ou 800 degrés, ainsi qu'une couche d'air, ce qui restitue de la chaleur pendant 24 à 48 heures. Vous ne l'avez probablement pas simulé, mais quelqu'un sait peut-être comment cela fonctionne.

Béranger Favre

Nous nous intéressons surtout aux bâtiments basse consommation parce que c'est là où nous allons pouvoir faire le plus de pilotage. Ces gros poêles posent un problème, à savoir que lorsqu'ils sont en marche, on ne peut plus les piloter. Ils vont émettre de la chaleur pendant 24 heures, mais on ne va pas pouvoir contrôler l'énergie fournie. Ce genre de cas ne serait donc pas intéressant pour nous.

Pour répondre à votre deuxième question, je ne connais pas encore la sensibilité à l'inertie thermique. C'est pour cela que j'en ai parlé dans les perspectives. Finalement, il faut étudier plusieurs cas, avec différents bâtiments qui ont des inerties différentes. On peut prendre le même bâtiment avec une isolation intérieure. L'inertie thermique ne sera plus du tout la même et nous pourrons regarder comment réagira le bâtiment.

Un participant

J'ai des vagues souvenirs d'étudiant que la température mesurée mesure la température de confort qui est non pas la température de l'air, mais la température mesurée à l'intérieur d'une sphère noire qui capte les rayonnements. La température de confort mesurée comme telle varie-t-elle de la même façon que la température de l'air ?

Béranger Favre

La température dont vous parlez est la température opérative qui prend en compte la température de l'air, mais aussi les émissions de rayonnement des parois. C'est la température que j'utilise. Quand je parle de la température intérieure, je parle de la température opérative. C'est donc déjà pris en compte.

Une participante

Avez-vous pris en compte l'utilisation du bâtiment, c'est-à-dire les activités des quatre personnes à l'intérieur, avec télévision et autres appareils énergétiques ?

Béranger Favre

Oui, elles sont prises en compte. J'ai pris en compte le planning de présence des occupants sur une semaine, mais aussi le coût des émissions dues aux appareils. C'est tout ce que j'ai appelé les apports internes. Ils sont connus à l'avance. C'est l'une des données d'optimisation. Par exemple, si je sais que dans une heure, je vais avoir 1 000 watts d'apports internes, je vais pouvoir anticiper ces 1 000 watts et couper le chauffage, pour permettre de ne pas chauffer, alors qu'il va y avoir des apports internes supplémentaires. C'est du prédictif. En ayant des prévisions de la météo et des apports internes, nous pouvons jouer sur ces prévisions pour diminuer la consommation énergétique du bâtiment.

Un participant

Je m'adresse autant au doctorant qu'au professeur. Où en sommes-nous dans cette thèse ? Que reste-il à faire pour que ce garçon passe de doctorant à docteur ? Quelle est la suite de ses travaux ? Quand je vois cette présentation, je me dis qu'il est mûr ou pas. Que reste-il à faire ? Quelles sont les perspectives de développement, soit vers d'autres travaux de thèse, soit vers des choses dont le monde opérationnel pourrait tirer profit rapidement ?

Béranger Favre

Je suis au milieu de ma deuxième année. Il me reste donc encore un certain nombre de choses à faire. Pour l'instant, j'ai fait uniquement des optimisations sur des bâtiments mono-zone, avec une seule zone thermique, avec un seul chauffage. Il serait donc intéressant d'améliorer ces optimisations, de prendre deux zones thermiques et deux chauffages, de rendre nos régulations plus précises. J'ai aussi fait, comme je le disais, des régulations du confort en été. Je l'ai fait avec de la ventilation forcée, avec les stores. Je vais aussi travailler sur la régulation du confort en été à partir de la ventilation naturelle, vu qu'elle ne coûte rien. Voilà les deux perspectives qu'il me reste.

Bruno Peuportier, *Mines ParisTech Centre Energétiques et Procédés*

Je crois que Frédéric Adam a très bien posé la problématique de la thèse d'après. Nous allons avoir une optimisation qui va nous donner la régulation idéale, celle qui fournit la fonction de coût la moins élevée, quel que soit le coût que l'on a choisi (des euros, du CO_2, etc.), mais cela ne va pas donner le petit boîtier que l'on peut brancher facilement sur le radiateur. Je ne sais s'il faut travailler avec Vinci pour faire le petit boîtier. Je ne connais peut-être pas assez l'entreprise, nous pouvons avoir un échange en la matière. Est-ce avec Schneider ou Delta Dore, etc. ? A partir de cette régulation idéale qui a été calculée en théorie, il va falloir déduire des lois plus simples qui se rapprochent le plus de la régulation idéale et qui permettent d'être vraiment opérationnels dans des petits boîtiers. C'est un prolongement que nous pouvons imaginer ensuite.

Béranger Favre

Pour déterminer le CO_2, il faut également avoir un modèle. Quels sont les différents moyens de production mobilisés au cours du temps, en fonction de la température, des prévisions météorologiques et de tout un tas d'autres choses ? Nous développons ce modèle qu'il faudra améliorer. Nous avons un premier modèle très grossier. Je pense que des échanges avec EDF par exemple seraient très intéressants pour améliorer ce type de modèles.

Philippe Commaret

J'ai une question par rapport à vos travaux. Avez-vous imaginé, dans les prochaines étapes, de regarder, non pas à l'échelle d'un logement, mais à l'échelle de plusieurs logements ? C'est ce vers quoi nous allons pour ce qui nous concerne et c'est ce que l'on appelle le cascado-cyclique, dans notre jargon, qui consiste à jouer sur des plages d'effacement relativement brèves pour ne toucher absolument pas au confort du client. Il faut aller vers des logements très bien isolés, mais aussi jouer sur l'inertie thermique qui existe malgré tout dans des logements faiblement isolés.

Béranger Favre

Pour l'instant, non, je me suis concentré uniquement sur un logement, mais nous pouvons peut-être essayer de faire ce que je fais sur un logement sur plusieurs logements, de façon isolée, avec des commandes séparées de tous les logements. Je ne pense pas que je puisse avoir un seul système énergétique sur l'ensemble de tous les logements et avoir quelques commandes pour tous les logements. Je pense qu'il faut le faire de façon séparée. Si tous les logements ont le même signal coût et qu'on leur dit qu'il ne faut pas consommer entre 17 et 21 heures, on atteindra peut-être les 250 kilowattheures.

Philippe Commaret

En réalité, vu d'un énergéticien, ce qui a de la valeur n'est pas de ne pas consommer sur une plage horaire brève, mais de ne pas consommer sur toute une journée.

Béranger Favre

Il faut donc arrêter de chauffer.

Philippe Commaret

C'est pour cela que nous sommes sur du cascado-cyclique, pour pouvoir utiliser l'inertie thermique de plusieurs logements. On joue en série.

Béranger Favre

D'accord. On va effacer la consommation électrique d'un bâtiment entre 17 et 21 heures, celle d'un autre bâtiment entre 21 heures et 24 heures.

Philippe Commaret

Par périodes de demi-heures en réalité.

Béranger Favre

Dans ce cas, il suffit simplement de changer le signal de la fonction coût de la programmation dynamique pour dire que pendant une demi-heure, on ne veut plus que tel bâtiment consomme, que tel autre ne consomme plus la demi-heure suivante, etc. C'est possible à

mettre en place. C'est même très simple, il suffit simplement de changer la valeur de la fonction coût.

Philippe Commaret

En tout cas, je pense que nous serons très intéressés pour travailler avec vous pour mettre en face l'équation économique d'un producteur d'énergie.

Maxime Trocmé

Avez-vous encore des questions ? Je pense que vous savez tout sur l'effacement énergétique, de l'éclairage jusqu'aux bâtiments, en passant par la production. Je vous invite à continuer ces échanges autour d'un cocktail qui vous attend à la sortie.

Transcription : Résumémo, Nantes – 02 40 47 12 70