

— « SMART CITIES » : LA MÉTAMORPHOSE

Gaëtan Cherix, Directeur
Centre de Recherches Energétiques et
Municipales (CREM)

Courriel :
gaetan.cherix@crem.ch

Massimiliano Capezzali, Docteur,
Adjoint du Directeur
Ecole Polytechnique Fédérale de
Lausanne, Energy Center

Courriel :
massimiliano.capezzali@epfl.ch

RÉSUMÉ

Le concept de « villes intelligentes » est aujourd'hui largement répandu et utilisé, de même que celui de « réseaux intelligents ». Or, dans les villes européennes et suisses, nous sommes pour l'instant dans une situation très éloignée par rapport à ces objectifs de « smart cities », non seulement du point de vue technologique mais aussi, peut-être surtout, du point de vue de leur intégration dans les politiques locales et dans les modèles d'affaires des entreprises énergétiques. En effet, s'il existe sur le marché des compteurs énergétiques permettant de communiquer, ils ne sont installés qu'en très petit nombre dans les villes et, dans la grande majorité des cas, sous-utilisés du point de vue des informations détaillées qu'ils pourraient fournir quant à la dynamique de l'approvisionnement et de la demande énergétiques. D'autre part, les implémentations actuelles de réseaux intelligents considèrent les consommateurs finaux comme des éléments « réactifs », pour utiliser une analogie électrique, et non comme des éléments « actifs », qui disposent de véritables outils pour participer à la dynamique des réseaux, tant du point de vue de la demande énergétique (shift de consommations, installation de nouveaux appareils moins énergivores, rénovations de bâtiments, etc.) que de l'approvisionnement décentralisé. De même, les utilisateurs peuvent devenir co-créateurs de nouveaux services énergétiques, dans un marché dynamique et novateur. Couplés à des outils de planification énergétique territoriale toujours plus performants, ces nouveaux développements permettront aux villes européennes d'atteindre leurs ambitieux objectifs en matière d'efficacité énergétique accrue.

MOTS-CLÉS

Energétique urbaine, internet de l'énergie, co-création des acteurs énergétiques, smart cities.

ABSTRACT

The « smart cities » concept is nowadays broadly spread and used, along with the term « smart grids ». However, in European and Swiss cities, we are presently very far from attaining these « smart cities objectives », not only from a technological point of view but also, or even mostly, regarding their integration in the local authorities policies and in the business models of the energy utilities companies. Communication-enabled energy meters indeed exist on the market. However, only a few are installed in the cities and, in the vast majority of cases, they are underused as for the wealth of detailed data that they could provide on the energy demand and supply dynamics. On the other hand, the present implementations of smart energy networks still consider the end-users as « reactive elements » - using an electric analogy – and not as « active elements », who can leverage on real tools to participate in the overall networks dynamics both on the demand (consumption shifts, installation of new less energy-hungry appliances, buildings refurbishment and so on) and on the decentralized supply side. At the same time, the user can become co-creators of new energy services, in a dynamic and innovative market. Coupled with ever more performing territorial energy planning tools, these new developments will allow European cities to reach their ambitious goals towards increased energy efficiency.

KEYWORDS

Urban energy, energy internet, co-creation by energy stakeholders, smart cities.

—

— IL FAUT CHANGER DE CAP

Actuellement, la majorité des villes européennes sont, d'une part, des centres d'activités humaines, productrices de savoir, de services et, d'autre part, de grandes importatrices de flux de matières, d'énergies, de nourriture, etc. Pour la majorité des activités, les personnes présentes (habitants et employés) sur les territoires de ces villes sont des clients passifs. Les gens n'interviennent qu'en "bout de chaîne" et ne sont à aucun moment acteurs quant aux produits qu'ils consomment. Leur unique choix ou implication dans l'utilisation des biens, services et infrastructures consiste à mettre en compétition différents fournisseurs, sur la base de critères personnels qui vont de la compétitivité économique aux goûts et couleurs, en passant par les convictions personnelles.

En particulier, dans le domaine de l'énergie, le passé peut se résumer à une industrie massive qui bénéficiait et usait d'un imposant système de production centralisé, un système de transport très efficient et une attitude de fournisseur-abonné vis-à-vis des clients : le producteur produisait, le transporteur transportait, et le client consommait. Ces clivages entre rôles des clients et des fournisseurs étaient de plus cloisonnés dans une industrie segmentarisée : électricité, gaz naturel, pétrole et ses dérivés.

Ce système n'est plus viable, du moins pas à long terme. L'utilisation actuelle de nos ressources énergétiques n'est plus soutenable, notamment du fait de la finitude physique des ressources fossiles mais aussi – et surtout – de l'augmentation massive de la consommation énergétique dans les pays dits émergents qui, légitimement, aspirent à atteindre le même niveau de vie des pays dits industrialisés. Les effets sur l'environnement d'une telle dynamique pourraient se révéler dramatiques en l'absence d'une vision différente qui pointe à une utilisation plus rationnelle des ressources énergétiques. Enfin, la catastrophe de Fukushima a rappelé les risques liés à cette technologie, ce qui a poussé plusieurs pays, dont la Suisse, à abandonner cette technologie pour son approvisionnement en électricité.

Sur cette base, de nombreux gouvernements, dont la Commission Européenne et les États qui la composent, ont décidé de changer de cap. Les objectifs de croissance économique sont confrontés pour la première fois à des objectifs d'efficacité énergétique : diminuer les consommations d'énergie primaire de 20%, diminuer les émissions de CO₂ de 20% aussi. Une dynamique de croissance reste souhaitée pour un domaine spécifique de l'énergie : accroître à au moins 20% du bouquet énergétique global la part des énergies renouvelables. Cette transition se fera notamment au travers du développement et de la mise en œuvre de nouvelles technologies. La stratégie de la Commission dans ce domaine a été concrétisée par le Strategic Energy Technology (SET) Plan Européen.

Ce virage technologique laisse présager d'importants développements économiques industriels et de services, liés à ces nouvelles technologies.

Toutefois, le progrès seul ne suffira pas à relever les défis énergie-climat qui attendent notre société. Changer de paradigme énergétique, pour aller vers plus "d'efficacité décentralisée", vers plus de micro-productions renouvelables locales, vers plus d'intégration des différentes formes d'énergies entre elles, passe par un changement dans notre manière de consommer, un changement de comportement des personnes physiques et morales vis-à-vis de leur relation à l'énergie.

Pour atteindre ces objectifs, à l'échelle des collectivités locales, il faut une rupture dans notre manière de penser, de concevoir, d'utiliser le système énergétique. Cette rupture passe par une intégration dans la conception même de ce futur système énergétique de tous les acteurs concernés par l'énergie : les utilisateurs, l'industrie énergétique (producteurs, fournisseurs et distributeurs), les planificateurs, les communicateurs, les décideurs. Intégrer tous les acteurs signifie prendre en compte leurs besoins, mais cela veut surtout dire les rendre acteurs à part entière du système. Cela veut aussi dire les faire participer à la conception de nouveaux services qui leur sont destinés, de manière à en augmenter l'attrait et l'efficacité.

L'objectif de cet article est de présenter les principaux enjeux qui attendent les collectivités locales se dirigeant vers ce changement de paradigme, du point de vue technologique (énergie et technologies de l'information et de la communication – TIC), de l'aménagement du territoire, mais aussi en termes institutionnels et d'implication des différents acteurs.

—L'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE URBAIN

Sachant que les collectivités locales (villes et agglomérations) concentrent plus du 75% des émissions de CO₂ liées à l'activité humaine, elles auront un rôle prépondérant à jouer dans l'atteinte des objectifs énergie-climat que se sont fixés les Etats européens. De ce fait, de nombreuses collectivités locales développent des stratégies innovantes visant à réduire leur impact sur l'environnement et leurs émissions de gaz à effet de serre, à diminuer leur dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, ainsi qu'à assurer leur sécurité d'approvisionnement. Les mesures techniques élaborées dans le cadre de ces stratégies consistent principalement à :

- Promouvoir et développer l'efficacité énergétique afin de diminuer les consommations (enveloppe des bâtiments, systèmes de conversion d'énergie, transports, etc.) ;

- Promouvoir et développer l'utilisation des énergies indigènes et/ou renouvelables, partout là où elles sont disponibles ;

- Investir dans des réseaux urbains de transport et de distribution multi énergies, ainsi que dans des unités de stockage, à l'échelle des zones urbaines ou quartiers.

Chacun de ces secteurs d'action est nécessaire à la métamorphose du système énergétique urbain, de même que leur combinaison.

EXPLOITER TOUS LES POTENTIELS D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIES PAR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'efficacité énergétique au sens large consiste à mettre en œuvre sur le terrain des nouvelles technologies énergétiquement performantes, qui se substitueront aux anciennes technologies dites « énergivores ». Cette efficacité concerne de nombreux domaines, dont les plus connus sont :

- L'enveloppe thermique des bâtiments (habitation, économie tertiaire, administrations, etc.) ;

- Les systèmes de conversion d'énergie (production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude, productions locales d'électricité, etc.) ;

- L'énergie grise utilisée pour la fabrication des biens et services (construction d'un bâtiment par exemple) ;

- L'efficacité des processus industriels ;

- L'efficacité des systèmes de transport.

Une analyse fouillée des potentiels d'économie d'énergie n'étant pas le but de cet article, il convient néanmoins d'énoncer ici quelques concepts qui doivent être pris en compte lors des projets de planification ou de rénovation.

Pour commencer, des avancées technologiques majeures ont été réalisées ces dernières années dans le domaine du bâtiment. Il est en effet devenu possible même dans des régions froides de construire des bâtiments qui n'ont quasi plus besoin d'énergie de chauffage (Wang & al., 2009). De nombreux labels d'efficacité énergétique pour les bâtiments ont vu le jour en Suisse, dont les plus connus sont le label *Minergie* et ses dérivés. Du fait de ces nouvelles performances, toute une série de paramètres ont pris une importance primordiale quant aux performances globales des bâtiments sur leur cycle de vie.

À l'échelle du quartier ou d'un bloc de bâtiments, l'espacement entre bâtiments ainsi que la hauteur de ces derniers influencent largement l'ombrage reporté d'un bâtiment sur un autre, soit aussi les gains solaires de chacun des bâtiments et ainsi leur performance énergétique (Kämpf et al., 2009).

Tel que montré dans le concept énergétique du quartier des Plaines du loup de la Ville de Lausanne (Lausanne, 2010, p.88), dans le cas de bâtiment à très hautes performances énergétiques, la quantité d'énergie utilisée pour construire le bâtiment peut-être supérieure à celle consommée pour exploi-

ter ce même bâtiment pendant sa durée de vie. Le choix des matériaux pour la construction devient ainsi un critère-clé quant à la performance. Au-delà de la construction de bâtiments neufs, le type de matériaux choisis pour une rénovation énergétique prend aussi de plus en plus d'importance.

Enfin, environ 65% des bâtiments suisses ont été construits avant 1980 (OFS, 2011), soit avant l'introduction de normes énergétiques concernant le bâtiment. Ainsi, le défi concernant l'efficacité énergétique en Suisse réside dans la rénovation du parc de bâtiments existants.

VALORISER LES RICHESSES ÉNERGÉTIQUES LOCALES PARTOUT LÀ OÙ ELLES SONT DISPONIBLES

De nombreuses évolutions technologiques ont aussi eu lieu récemment dans le domaine de l'approvisionnement énergétique, tant actif que passif. Des technologies de conversion d'énergie renouvelable ont été ou sont en phase d'industrialisation (éoliennes, mini-hydraulique, collecteurs solaires thermiques, solaire photovoltaïque, gazéification / méthanisation de la biomasse, etc.). Les rendements énergétiques des systèmes de conversion traditionnels ont été améliorés (chaudières modulantes à condensation alimentées par du gaz naturel ou du mazout, etc.), ainsi que ceux des systèmes de distribution (avec des progrès notables, par exemple, sur les réseaux de chauffage à distance). De nouveaux systèmes de conversion d'énergie ont été développés puis industrialisés. Ces derniers permettent de transformer localement des ressources énergétiques en énergie utilisable, avec une haute efficacité énergétique et exergetique (Haldi & Favrat, 2006) (pompes à chaleur électriques ou à gaz, moteur à quatre temps de cogénération, moteur Stirling, chaudière et cycle de Rankine organiques, cycles de Kalina, etc.). Ainsi, notamment du fait de ces innovations, l'objectif quant à l'évolution du système d'approvisionnement en énergie peut se résumer à valoriser partout là où elles sont disponibles les ressources en énergie renouvelable. Ces ressources peuvent être séparées en deux types distincts : les ressources énergétiques liées au territoire, nommées ici « territorialisées » et celles qui bénéficient d'une infrastructure de réseau leur offrant une caractéristique de quasi « ubiquité ».

En effet, toute une série d'énergies renouvelables exige une première phase de conversion à proximité de la source. Les termes de « première phase de conversion » sont utilisés car cette énergie une fois transformée peut être transportée, par exemple via les réseaux d'électricité, de chaleur ou de froid. Les ressources énergétiques territorialisées sont ainsi :

- L'énergie solaire : pour la production d'électricité, des panneaux photovoltaïques (PV) sont utilisés. Pour la production de chaleur, des collecteurs solaires sont utilisés. Il existe aussi maintenant plusieurs technologies qui permettent de coproduire de l'électricité et de la chaleur (combinaison PV et collecteurs thermiques, solaire à concentration, etc.).

- L'énergie géothermique : pour la géothermie basse enthalpie, des pompes à chaleur (PAC) sont utilisées pour produire de l'énergie chaleur à basse ou moyenne température (de 35°C à environ 80°C pour les machines utilisant du CO₂ haute pression comme réfrigérant). Des sondes géothermiques verticales servent à capter l'énergie du sol et à la transporter comme source froide dans la PAC située à proximité. Pour la géothermie haute enthalpie, des cycles de Rankine organiques ou des cycles à vapeur sont utilisés pour coproduire de l'électricité et de la chaleur à moyenne température.

- L'énergie de l'eau : pour de la production d'électricité, différents modèles de turbines sont utilisés en fonction des hauteurs de chute et débits. À noter que des travaux de recherche sont actuellement menés pour développer l'utilisation de la mini-hydraulique, notamment dans le cadre d'infrastructures existantes (réseaux d'eau potable, d'irrigation, etc.) (Crettenand (2012)). Pour la production de chaleur ou aussi de « rafraîchissement », ce sont des PAC qui sont utilisées pour valoriser la chaleur/fraîcheur contenue dans les ressources en eau (nappe phréatique, eaux de surface).

- L'énergie éolienne : différentes technologies sont utilisables en fonction des régimes de vent. Il est notamment devenu possible d'intégrer architecturalement dans des bâtiments des petites ou mini- éoliennes. Dans un pays densément peuplé comme la Suisse, l'intégration des installations éoliennes dans le paysage représente un sujet crucial.

- Les rejets thermiques : dans le cas des rejets thermiques (industries, rejets des stations d'épuration, collecteurs d'eaux usées, usines d'incinération, etc.), le type de valorisation est largement influencé par la température des rejets. Dans le cas des eaux usées par exemple, les températures des eaux (14°-16°C), impliquent l'utilisation de PAC dans le voisinage des canalisations pour produire de la chaleur en assurant une rentabilité au projet. D'intenses activités de recherche et développement étudient la possibilité de valoriser – sous forme d'électricité, de chaleur ou, encore, de refroidissement – les rejets thermiques colossaux émanant de toute une série de processus industriels particulièrement énergivores, tels que la production du ciment ou de composés chimiques¹.

À l'inverse, d'autres sources d'énergies renouvelables sont transportées à plus ou moins longue distance avant même leur première conversion :

- Le bois : les différents types de bois issus d'exploitation forestière ne sont quasi jamais utilisés au lieu d'émission. En effet, ils sont parfois prétraités sur place puis transportés via le réseau routier vers leurs lieux d'utilisation.

- La biomasse : de même que pour le bois, la biomasse est collectée en différents points (déchetterie, ramassage séparatifs des déchets organiques,

1 Voir par exemple : <http://love.epfl.ch>.

etc.), puis transportée vers un système de conversion centralisé tel qu'une usine de méthanisation.

Les énergies fossiles et fissiles quant à elles peuvent systématiquement être considérées comme des ressources bénéficiant de l'ubiquité grâce aux infrastructures de réseau : gaz naturel (gazoducs, transport maritime), dérivés du pétrole (oléoducs et transport), charbon (réseau de transport), combustibles nucléaires (réseau de transport), etc.

Au regard de ces nouvelles possibilités technologiques, différents auteurs ont émis l'hypothèse que les technologies énergétiques décentralisées allaient égaler puis surpasser la puissance fournie par les grosses centrales de production d'électricité (hydrauliques, nucléaire, thermiques) (Rifkin (2002). Cette théorie est notamment basée sur l'évolution des technologies de l'information, où la mise en réseau de multiples ordinateurs décentralisés a permis d'obtenir des puissances de calcul comparable à celles de data center.

Cette hypothèse s'est largement vérifiée ces dernières années. En effet, pour exemple, la puissance électrique du parc nucléaire Suisse (cinq réacteurs nucléaires) était de 3278 MW en 2011 (OFEN (2011), alors que la puissance totale d'énergie solaire photovoltaïque installée en Allemagne était de 25 000 MW crête la même année (BMU (2011). En terme d'énergie, cela signifie que les panneaux solaires allemands ont produit uniquement 20% de moins (~20 TWh) que les centrales nucléaires suisses (~25 TWh). De nombreuses autres réalisations peuvent être citées avec, par exemple, la décentralisation du système de production d'électricité du Danemark. Il convient de remarquer que cette pénétration massive des nouvelles énergies renouvelables n'aurait pas pu se réaliser en l'absence, d'une part, d'un réseau électrique européen massivement interconnecté et, d'autre part, de capacités de production backup qui, pour l'instant, sont souvent basées sur des énergies fossiles.

Au regard des nombreuses stratégies nationales et locales actuellement développées et, notamment, la « Stratégie énergétique 2050 » mise en consultation par l'Administration fédérale Suisse, cette tendance à la décentralisation va largement augmenter ces prochaines années. En effet, la Confédération Suisse prévoit de passer d'une production d'environ 0.5 TWh de nouvelles énergies renouvelables en 2012 à plus de 20 TWh de ces mêmes énergies, d'ici à 2050 (OFEN, 2012). Cette décentralisation, du fait de la répartition des compétences en Suisse, passera par les collectivités locales (Cherix et al., 2009) !

GARANTIR LE FONCTIONNEMENT EFFICACE ET FIABLE DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE PAR LE DÉVELOPPEMENT DES RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES ET DES CAPACITÉS DE STOCKAGE

Selon les deux premières stratégies présentées ci-dessus, soit l'efficacité énergétique et la production d'énergies renouvelables, les bâtiments, puis certains

quartiers, voire un jour les villes, seront en mesure de produire chaque année autant d'énergie qu'ils en consomment, voire même d'exporter une partie de l'énergie produite. Néanmoins, cette équivalence entre le bilan de consommation et de production d'énergie ne signifie aucunement l'autonomie énergétique au sens physique du terme. En effet, dans les systèmes énergétiques, la non-simultanéité entre la production et la demande doit être prise en compte. Les panneaux solaires PV par exemple produisent la majorité de leur production en été, alors que les consommations d'électricité en Suisse sont à leur maximum durant l'hiver (OFEN, 2011). De même, certaines technologies de « grosses centrales », telles que les installations nucléaires, fonctionnent en ruban, soit à puissance constante tout au long de l'année et 24 heures sur 24, alors que nos consommations sont nettement amoindries durant la nuit. Néanmoins, les lois de la physique font que les gestionnaires de réseaux d'énergie doivent garantir en tout temps que la puissance injectée dans le réseau corresponde à la puissance consommée à la même échelle, à la différence de l'énergie stockée/stockable dans le réseau. Cette contrainte est en particulier vraie pour le réseau d'électricité, qui ne bénéficie pas de capacité propre de stockage. Pour représentation, la figure 1 montre le profil de production des centrales suisses jour par jour et heure par heure pour l'année 2011, programme de production déterminé pour correspondre aux consommations. La production, et donc la consommation d'électricité, en Suisse est fortement variable tant sur une base journalière et hebdomadaire que saisonnière. Aujourd'hui, en plus de la difficulté de prévoir la variabilité de ces consommations d'énergie électrique et thermique les jours prochains, les productions

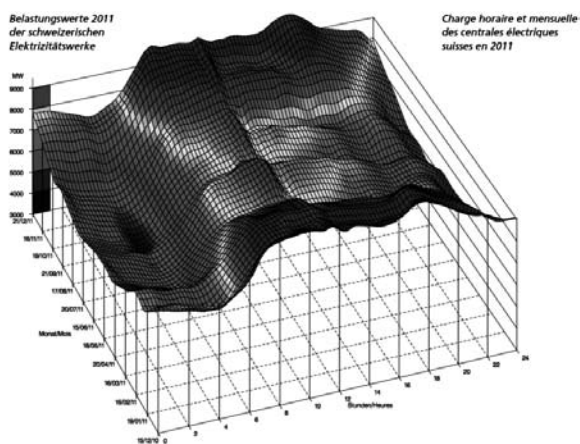


Figure 1 : Charges horaire et mensuelle des centrales électriques suisses en 2011 (source : OFEN, 2011.)

journalières deviennent de moins en moins « contrôlables ». En effet, une quantité croissante de ressources énergétiques renouvelables et dépendantes de la météo sont intégrées aux réseaux énergétiques, telle que détaillée au chapitre précédent. Ainsi, un des grands défis concernant le changement de paradigme du système énergétique consistera à largement développer les capacités de stockage d'énergie, ainsi que les infrastructures de réseau permettant de mettre en relations les producteurs et consommateurs d'énergies.

De nombreux travaux ont traité de l'impact potentiel de l'utilisation des réseaux de distribution multi-énergie (électricité, gaz, chaleur, froid, eau, etc.) afin d'exploiter au maximum les synergies entre consommateurs (habitat, commerce, industrie, etc.), producteurs et ressources locales (Cherix & al., 2007 ; Weber, 2008). En effet, l'intégration de plusieurs acteurs énergétiques tant au niveau de la consommation que de la production permet d'atteindre une masse critique suffisante pour utiliser des technologies efficaces, de considérer plusieurs options technologiques d'approvisionnement et de diminuer les problèmes de puissance et de stockage liés à la non-simultanéité entre la production et la consommation.

En plus de la construction d'infrastructures de réseau et de la mise en œuvre de technologies énergétiques de stockage, telles que le pompage-turbinage ou les batteries pour l'électricité, la recherche se concentre aujourd'hui sur le domaine des *smart-grids*. Le principe du *smart-grid* consiste à ajouter aux réseaux énergétiques une couche de réseau d'information, permettant de faire communiquer en direct fournisseurs, distributeurs et consommateurs d'énergie. Cette communication a pour but d'offrir de nouveaux services aux différents consommateurs, de manière à les rendre acteurs du système énergétique : sur la base de nouveaux business modèles entre fournisseurs/transporteurs d'énergie et clients, les consommateurs pourront modifier leur manière de consommer, en offrant à contrepartie financière une flexibilité de leur profil de consommation (puissance consommée heure par heure). Pour illustration, un client pourrait accepter de décaler dans le temps sa consommation d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire, pour autant qu'il dispose d'une capacité de stockage suffisante.

Ainsi, et pour résumer cette partie technologique, le système énergétique urbain, voire le système énergétique dans sa totalité, va évoluer vers un système beaucoup plus diffus, distribué, et flexible. Les collectivités locales, notamment suisses, du fait tant de leurs compétences que des équipements et infrastructures énergétiques dont elles assurent la gestion, feront partie des acteurs principaux de cette évolution. Parmi les premières tâches que les villes et communes devront réaliser, il s'agira de collecter une importante quantité d'informations de manière à se réapproprier leur territoire du point de vue

énergétique. Ces données, une fois structurées, devront permettre de fixer des objectifs énergie-climat cohérents, ainsi que des stratégies et des plans d’actions y relatifs permettant d’atteindre ces objectifs.

— RÉCOLTER ET UTILISER DES DONNÉES POUR PLANIFIER LES INFRASTRUCTURES ET TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES SUR UN TERRITOIRE.

La problématique énergétique urbaine doit faire partie d’une approche intégrée et durable au sens large, garantissant aux décideurs que leurs choix ont été faits sur la base d’une connaissance fine des systèmes énergétiques en place, des options technologiques et réglementaires et en concordance avec la politique urbaine générale (économie locale, attractivité, urbanisme, politique sociale, etc.). Cette approche intégrée doit être fondée sur une base aussi large que possible de données structurées et présentées de manière compréhensible.

La planification énergétique territoriale est une approche systémique de l’approvisionnement et de la consommation d’énergies au niveau territorial qui permet justement de structurer l’élaboration de stratégies énergie-climat localement. Elle peut être considérée comme un moyen de traduire en mesures concrètes les objectifs fixés par les collectivités locales, dans le cadre de leur politique énergie-climat, en intégrant au moins partiellement les éléments suivants (Cherix, 2010 ; Capezzali, 2012) :

- la collecte et la mise à jour de données de terrain permettant d’évaluer et de suivre les performances énergétiques, économiques et environnementales des systèmes énergétiques globaux ;
- les systèmes énergétiques en place ou projetés, tant pour la demande que pour l’approvisionnement ;
- les cadres réglementaires nationaux, cantonaux et communaux.

La gestion et la planification de systèmes énergétiques en zones urbaines reposent largement sur la connaissance de données de terrain (Keirstead & Shulz, 2009). Ces dernières sont utilisées pour caractériser, en phase de projet, les services énergétiques (confort thermique, eau chaude sanitaire, lumière, multimédia, hygiène, etc.) à fournir aux utilisateurs, les ressources à disposition dans le voisinage du périmètre considéré et les performances du système en fonction des choix technologiques et urbanistiques. Ces trois points reprennent précisément les aspects technologiques cités plus haut, soit l’identification des potentiels d’efficacité énergétique, des gisements d’énergies renouvelables, ainsi que des infrastructures et équipements à mettre en œuvre

pour garantir un fonctionnement efficace et fiable du système énergétique. Les récoltes de données de mesure doivent ensuite permettre de suivre les consommations d'énergie primaire, et émissions de gaz à effet de serre qui résultent des « activités » de la zone urbaine concernée. Ce suivi et contrôle des performances énergétiques des systèmes mis en place doit permettre aux décideurs, d'une part, de vérifier l'atteinte des objectifs fixés, et, d'autre part, d'améliorer les prochaines itérations tant pour les projets urbains que pour l'élaboration du cadre réglementaire local.

Dans cette optique, une approche cartographique et systémique est utilisée, afin de caractériser sur le territoire :

- les densités de besoins de chaleur actuels et futurs, ainsi que les agents énergétiques utilisés (mazout, gaz, électricité, biomasse, etc.). Ces deux éléments permettent de calculer ensuite les consommations d'énergies et émissions de CO₂ actuelles et futures ;

- les ressources du territoire (gisement solaire, potentiel éolien, géothermie, etc.) suivant les données disponibles.

Suite à la structuration de toutes les informations collectées, concernant tant les consommateurs d'énergie que les ressources à disposition sur le territoire, des recommandations peuvent être réalisées pour l'exploitation de chaque ressource qui présente un potentiel intéressant. Ainsi, des grands projets territoriaux ou lignes directrices peuvent être identifiés. Ces derniers devront par la suite être précisés par des analyses de faisabilité lorsque cela est nécessaire.



Figure 2 : Illustration de l'évolution de la consommation d'énergie d'une commune, tenant compte de la rénovation du parc bâti et de l'utilisation de ressources renouvelables. (source : CREM).

Ainsi sur la base de l'état des lieux et des recommandations faites, un concept de zones énergétiques peut être réalisé par la collectivité.

Sur la base des données récoltées et des recommandations établies, la collectivité pourra ainsi définir ses objectifs et priorités en matière d'efficacité énergétique, d'approvisionnement énergétique et de développement des énergies de réseau. Cela passera, par exemple, par un Plan Directeur des Energies dans lequel la collectivité pourra inscrire et ancrer ses objectifs et stratégies à court, moyen et long terme (Darmayan et al., 2012).

— POUR CHANGER DE SYSTÈME, IL FAUT CONVAINCRE TOUT LE MONDE, IL FAUT INCLURE UN MAXIMUM D'ACTEURS DANS LA DÉMARCHE.

Suite à la réalisation de cette étape de planification énergétique territoriale, il peut être admis que les collectivités locales ont élaboré une stratégie visant à atteindre des objectifs énergie-climat, à l'image du 3x20 européen. Néanmoins, la mise en œuvre d'une stratégie à l'échelle d'un territoire exige que les différents acteurs qui jouent un rôle dans l'implémentation de cette stratégie soient intégrés et « jouent le jeu ».

Il convient alors de déterminer quels sont les différents leviers d'action permettant d'inclure tous les acteurs énergétiques présents sur le territoire, puis de planifier des mesures concrètes dans ce sens.

CADRE RÉGLEMENTAIRE ET POLITIQUES ÉNERGÉTIQUES LOCALES

Premièrement, les collectivités locales peuvent élaborer dans le cadre de leur politique énergétique et notamment de leur réglementation, des mesures volontaires ou contraignantes pour faciliter ou imposer la mise en œuvre de leur stratégie.

L'élaboration et la mise en vigueur de réglementations aux différents niveaux de gouvernance peuvent avoir une influence déterminante sur les choix des acteurs énergétiques. Dans un Etat fédéral, tel que la Suisse, le rôle des villes pour la mise en pratique du développement durable est devenu une évidence. Les éléments centraux pour la mise en œuvre d'un développement urbain durable sont l'élaboration et l'implémentation de politiques énergétiques locales, du fait que la majorité des externalités des villes sont directement ou indirectement liées à l'utilisation d'énergie.

La politique énergétique urbaine peut être définie comme les actions menées par les autorités publiques locales pour influencer l'approvisionnement et la demande d'énergie sur leurs territoires, et pour en gérer les impacts sur les systèmes énergétiques dans et hors des frontières des villes (Keirstead &

Shulz, (2009). Plusieurs mécanismes de politiques énergétiques ou outils réglementaires peuvent être cités pour caractériser les instruments à disposition des décideurs urbains : aménagement du territoire et règlements de construction, programmes d'encouragement (subventionnement, incitation, etc.), mesures économiques (taxes, etc.), soutien à l'innovation technologique (projets pilote et démonstration) et campagnes d'incitation ou d'information. Enfin, les politiques énergétiques locales doivent être réalisées en complément des cadres structurels nationaux et cantonaux (Cherix & al., 2009),.

UTILISER LES NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR TRANSFORMER LES CONSOMMATEURS EN CONSOM'ACTEURS.

Deuxièmement, les autorités locales doivent profiter des nouvelles technologies pour mobiliser les consommateurs à agir. Ce deuxième levier d'action se caractérise par la création d'un système d'information, basé sur des données de consommation d'énergie et de comportement en temps réel, capable de mettre en réseau dynamique et de faire interagir tous les acteurs qui joueront un rôle dans les consommations et productions d'énergie. Ce système d'information, complété par des outils spécifiques aux différents usages, permettra aux systèmes énergétiques locaux d'être rendus beaucoup plus actifs et dynamiques. L'utilisation de ce système énergie-information permettra à terme de diminuer les consommations énergétiques et les émissions de CO₂, ainsi que de gérer activement une partie des charges ou puissance des différents réseaux énergétiques.

Ces actions vont se baser sur le développement des *smart meters* (compteurs qui donnent accès à des données de consommations numérisées) et du Web 2.0 (réseaux sociaux, blogs etc.). Le rôle des autorités sera de proposer des outils (plateformes Web) et de mettre en place sur le terrain un dispositif de mobilisation des acteurs à s'informer, agir, puis communiquer ses succès par le biais de telles plateformes. Les premières démarches de terrain ont été entreprises en Europe avec pour exemple le projet de « familles à énergie positive »².

Pour aller plus loin, des travaux en sciences du comportement sont réalisés pour concevoir des plateformes interactives et participatives. Ces dernières ont pour but d'impliquer les consommateurs, telle que www.wattact.org par exemple. Les outils développés donneront accès à des consommations en temps réel, informations nécessaires à la compréhension par l'utilisateur de son impact sur ses consommations d'énergie, soit aussi de son influence potentielle. Ces outils incluront des modules de réseaux sociaux dans le but de créer des dynamiques de groupe, au travers d'initiatives partagées entre

2 www.familles-a-energie-psotoive.fr

utilisateurs, de concours entre groupes de participants, de benchmark de résultats et d'échanges d'expériences. De même des modules d'open innovation seront inclus, afin d'impliquer les acteurs énergétiques directement dans la co-création des futurs services et fonctionnalités qui leur seront destinés (Pallot et al., 2010).

De même, des travaux économétriques, avec la conception de nouvelles règles du jeu, permettront de rentabiliser les infrastructures et technologies nécessaires au déploiement de ces équipements et infrastructures. Ces travaux économétriques analyseront quels sont les nouveaux business modèles qui permettent d'augmenter la valeur ajoutée de l'efficacité énergétique, avec par exemple la promotion de services énergétiques en place de la vente de plus grandes quantités d'énergie (Nguene et al., 2006).

— CONCLUSION

En résumé, le paradigme énergétique va changer. Ce changement sera probablement une rupture jusque dans notre manière de penser le système, de le vivre.

Des investisseurs proposeront de rénover vos bâtiments et se rembourseront grâce aux économies générées, la production d'énergie va se décentraliser et s'ancrer dans les territoires, les consommateurs seront devenus producteurs et pourront à choix consommer l'énergie produite, la stocker ou la réinjecter dans des réseaux d'électricité, de chaleur, etc.

Toute cette métamorphose sera rendue possible grâce au développement des *smart grids*. Pour reprendre les termes de Thomas Friedman, vainqueur du prix Pulitzer : « Les *smart grids* seront une nouvelle expérience, jamais ressentie auparavant. Tous les équipements énergétiques, dans votre habitation, à votre travail, communiqueront avec tous les systèmes d'information et ils auront fusionné dans une grande, impalpable plateforme permettant d'utiliser, de stocker, de produire et enfin vendre des électrons verts. Cela se ressentira comme la révolution des technologies de l'information, et la révolution des technologies de l'énergie. Cela se vivra comme l'Internet de l'énergie. »³ Ce virage ne pourra être pris en un jour. Néanmoins, la direction peut être suivie dès maintenant grâce au système énergétique actuellement en place : les centrales de production et réseaux énergétiques existants permettront de garantir un approvisionnement robuste et fiable en énergie, même avec une forte croissance des capacités de production « aléatoires ».

3 Citation issue de sa présentation à Portland en octobre 2012.

Enfin, la chance sourit aux audacieux. Aujourd'hui déjà, nombreuses sont les autorités locales exemplaires, qui ont décidé de prendre ce virage pour une meilleure qualité de vie, pour un développement durable, pour promouvoir une économie locale basée sur l'innovation. Imaginez une ville qui décide de contraindre et de subventionner la rénovation de 80% des bâtiments présents sur son territoire, durant les 40 prochaines années. Imaginez cette même ville qui s'engagerait à exploiter toutes les richesses énergétiques présentes sur son territoire, d'ici à 2050. Imaginez enfin que cette ville mette en œuvre sur le terrain cet Internet de l'énergie, élément nécessaire pour garantir le fonctionnement efficient du système.

Quels en seraient les risques ? Que son économie locale renaisse, de par les besoins en technologies, compétences, constructions, et investissements y relatifs ? Que les prix de l'énergie augmentent, sauf pour les collectivités qui bénéficieront d'un taux d'indépendance suffisant. Que les citoyens ressentent cette révolution énergétique et informatique, cette meilleure qualité de vie issue d'une politique plus durable ?

Rappelez-vous en, la chance sourit aux audacieux.

Avec nos remerciements à Mme Marielle Chervaz pour son pertinent travail de relecture

— BIBLIOGRAPHIE

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2011). Erneuerbare Energien in Zahlen; Nationale und internationale Entwicklung. [en ligne] Disponible sur : http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/2720.php

Capezzali, M. & Cherix G. (2012). MEU – *Une plateforme web et cartographique pour le management et la planification énergétique de zones urbaines. Conférence Francophone ESRI 2012, (Versailles, 3 et 4 octobre 2012).*

Cherix G. (2010). Planification énergétique à l'échelle du territoire. *Collage* (6).

Cherix, G., Capezzali M., Chapuis, A., Püttgen, H.-B., et Finger, M. (2009). *Action and influence of the multiple decision levels over the whole energy chain. Dubrovnik Conference on sustainable development of Energy, Water and Environment Systems (Dubrovnik, 29 septembre au 3 octobre).*

Cherix, G., Weber C., Maréchal, F., et Capezzali, M. (2007) Intégration optimale des couplages chaleur-force dans les systèmes urbains. *Bulletin SEV / AES* (9), 27-32.

Crettenand, N. (2012). *The Facilitation of Mini and Small Hydropower in Switzerland : Shaping the Institutional Framework (with a Particular Focus on Storage and Pumped-Storage Schemes)*. Thèse de doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse.

Darmayan, L., Cherix, G., Cudilleiro, M. et Kuchler, F. (2011). *PlanETER, Planification Energétique Territoriale : Approche territoriale pour définir une stratégie énergétique à l'échelle d'une collectivité locale. Conférence Francophone ESRI 2012, (Versailles, 3 et 4 octobre 2012)*.

Haldi, P.-A. & Favrat D. (2006). Methodological aspect of the definition of a 2 kW society. *Energy*, 31 (15), 3159-3170.

Kämpf, J., Montavon, M., Bunyesc, J., Bolliger, R., et Robinson, D. (2009). Optimisation of buildings' solar irradiation availability. *Solar Energy* (84), 596-603.

Keirstead J., Shulz N. (2009). London and beyond: Taking a closer look at urban energy policy. *Energy Policy*, 38(9), 4870-4879.

Nguene, G., Cherix, G., Maréchal, F., Finger, M. et Revaz, J.-M. (2006). Enhancing the quality of Energy Services in Urban Areas by Means of Renewable Energy Technologies and Information and Communication Technologies in Energy Networks: Issues, Challenges and Opportunities. *World Renewable Energy Congress (Florence, 19-25 août 2006)* (pp.19-25). Florence : WREC.

OFEN (Office fédéral de l'énergie). (2011). Statistiques suisses de l'électricité 2011.

OFEN (Office fédéral de l'énergie). (2012). Rapport explicatif concernant la Stratégie énergétique 2050. (Projet soumis à consultation du 28 septembre).

OFS – Office fédérale de la statistique. (2011). Recensements fédéraux de la population et statistique des bâtiments et des logements.

Pallot, M., Trousse, B., Senach, B. et Scapin D. (2010). Living Lab Research Landscape: From User Centred Design and User Experience towards User Cocreation. *First European Summer School "Living Labs"*. [en ligne] Disponible sur : <http://hal.inria.fr/inria-00612632>.

Rifkin, J. (2002). *The hydrogen economy*. New York : Tarcher/Putnam.

Wang, L., Gwilliam, J. et Jones, P. (2009). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and Buildings* (41), 1215-1222.

Weber, C. (2008). *Multi-objective design and optimization of district energy systems including polygeneration energy conversion technologies*. Thèse de doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse.