



Pôle Climat-Energie-Environnement (PCEE)

Club de l'Orme

Document de présentation d'ELECTREO Groupe de travail Mixte STIC-Energie électrique-Economie sur les "Systèmes électriques intelligents"

10 Mai 2010

1. Ambition

Au moment où notre pays développe une stratégie nationale de recherche et d'innovation mettant en exergue la nécessaire double révolution des écotecnologies et des technologies de l'information, il est maintenant urgent, dans le cadre du développement du Campus du plateau de Saclay, de mettre en place les conditions de l'émergence de projets interdisciplinaires innovants dans ce domaine. C'est dans cet esprit qu'est créé le groupe mixte Electreo, chargé de : a) mobiliser les communautés scientifiques publiques et privées disposant d'expertises complémentaires dans les domaines des STIC, du génie électrique et de l'économie ; b) pérenniser la réflexion collective dans le domaine des systèmes électriques intelligents (ou "SmartGrids").

Les applications visées sont notamment les systèmes de génération électrique (provenant par exemple des énergies renouvelables), les réseaux de distribution électriques, les grands réseaux de transport électriques interconnectés, les systèmes électriques embarqués et les véhicules électriques terrestres dans leur réseau d'infrastructures de recharge (des automobiles aux navettes électriques automatisées).

2. Missions

Le groupe Electreo aura pour principales missions de :

- Développer une vision stratégique des besoins de R&D dans le domaine des systèmes électriques intelligents, en cohérence avec la demande exprimée par les pôles de compétitivité (System@tic, Mov'eo, AsTech, Advancity) et les industriels (EDF, AREVA, Alstom, Schneider, PSA, Renault...) concernés.
- Promouvoir et développer des nouveaux projets apportant une réelle valeur ajoutée à la R&D sur les systèmes électriques aux plans régional et national, en complément des structures et programmes existants (voir en particulier Annexe 1 : Projet de Campus Intelligent).
- Développer les échanges scientifiques et techniques aux plans national et européen, notamment via l'EECI ("European Embedded Control Institute") et le Réseau d'Excellence européen HYCON2

("Highly Complex and Networked Control Systems") qui s'appuie sur un IAB ("Industrial Advisory Board") européen (et qui rassemble 23 partenaires de 7 pays européens).

- Développer les échanges avec des partenaires sur les aspects socio-économiques et sur l'analyse des comportements induits par les évolutions technologiques, de façon à étayer son argumentation scientifique (exemple de partenaire envisagé : Club de l'Orme).
- Promouvoir et développer des interactions de nature diverse, liées au triangle de la connaissance (formation, recherche, innovation) avec la KIC Climat, "Knowledge and Innovation Community" sur la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ce changement, rassemblant 16 organismes de recherche (dont le CEA), universités et industriels de rang mondial, qui constitue une structure incontournable pour l'innovation et le développement d'une société bas carbone.
- Interagir avec l'ADEME, "Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie" ; voir la "Feuille de route sur les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables" (juin 2009).

3. Composition

Le groupe sera animé par un "core team" composé d'experts représentatifs des communautés visées, principalement Digiteo (automatique, informatique, traitement du signal, communication...) et SPEE Labs (génie électrique). Il organisera des réunions de travail élargies aux experts concernés du Plateau de Saclay et au-delà, académiques et industriels, en incluant des Journées Scientifiques du PCEE, des séminaires thématiques semestriels ouverts à tous publics scientifiques et industriels, où des équipes pourront présenter leurs thèmes de recherche. Ces activités pourront être couplées aux séminaires organisés par les groupes de travail des divers Groupements de Recherche (GDR) thématiques concernés, ainsi qu'aux journées des doctorants des différents établissements. La première réunion de ce "core team" a eu lieu le 19 janvier 2010.

Core team:

Digiteo	Frederic Bonnans Thierry Collette Gilney Damm Merouane Debbah Françoise Lamnabhi-Lagarrigue Pascal Larzabal Arnauld Leservot David Mercier Mariana Netto William Pasillas-Lepine Jean-Luc Thomas	X (CMAP) et INRIA CEA (List) EECI SUPELEC (Chaire en Radio Flexible) CNRS (L2S) et EECI SATIE CEA (List) CEA (List) LCPC CNRS (L2S) SUPELEC (E3S, Dép. Energie) & CNAM
Club de l'Orme	Séverine Dautremont	CEA (I.tésé)
SPEE Labs	Olivier Bethoux Demba Diallo Pierre Yves Joubert Juliette Kauv Zoubir Khatir Marc Petit Yannick Phulpin Bertrand Revol Vincent Rious	LGEP LGEP SATIE INRETS (LTN) INRETS (LTN) SUPELEC (E3S, Dép. Energie) SUPELEC (E3S, Dép. Energie) SATIE SUPELEC (E3S, Dép. Energie)
Pôle Climat-Energie-Environnement	Jean-Marc Agator	CEA (DSM)

4. Thématiques concernées

A l'horizon 2020, les verrous technologiques, économiques et organisationnels s'articulent autour des technologies de réseau (ingénierie électrique), des systèmes d'information, des technologies de stockage décentralisé, de la sécurité des réseaux et systèmes électriques et des questions de régulation économique. Trois priorités ont été identifiées :

WP1 – Génération et transport de l'électricité

Gilney Damm et Vincent Rious (WP1 leaders)

Les récents développements techniques et scientifiques permettent de nouvelles avancées. Par exemple, les réseaux de transmission intelligents deviennent possibles grâce aux nouveaux systèmes de communication associés à des mesures GPS. Ceci permet la transmission en temps réel de grandes quantités d'information à de grandes distances avec une forte précision de l'instant de la mesure. Cette précision permet une prise en compte convenable des retards et une correcte synchronisation des informations reçues. Ainsi les algorithmes de commande et d'identification des systèmes électriques peuvent utiliser ces informations distantes.

Cette transmission d'information en temps réel permet également de prendre en compte les aspects économiques. Il devient ainsi possible de faire une vraie optimisation économique des réglages du réseau, au lieu de réglages approchés et empiriques. Ces procédures permettent aussi de proposer des changements en temps réel de ces réglages, au lieu d'utiliser des systèmes semi-statiques par manque d'information et de concevoir des schémas de prise de décision informatique en parallèle (où à l'aide) d'opérateurs humains.

Un autre point important de ces réseaux est la possibilité d'une grande pénétration des énergies renouvelables en tandem avec des systèmes de stockage d'énergie. Ce sont justement ces nouveaux systèmes de commande informatique et de transmission de l'information qui permettent une insertion de grandes proportions d'énergie renouvelable dans le système énergétique. Le stockage énergétique a largement bénéficié de récents développements techniques et est devenu une nécessité incontournable du réseau, mais des efforts considérables sont encore nécessaires pour lui permettre d'atteindre un bon niveau de maturité. La détermination du positionnement, du type et de la quantité des moyens de stockage doit être encore étudiée de manière à tirer le maximum de ces possibilités.

La maîtrise et l'intégration des nouveaux systèmes de stockage feront clairement partie des sujets d'intérêt d'Electreo, même si l'étude et le développement des systèmes de stockage eux-mêmes ne sont pas concernés. Ces thématiques (nouvelles batteries, piles à combustible, nouveaux moteurs...) sont en effet beaucoup plus du ressort de la chimie, de la physique ou du génie électrique proprement dit.

Voir détails en Annexe 2.1

WP2 - Réseau de distribution intelligent et consommation

David Mercier et Marc Petit (WP2 leaders)

L'évolution des systèmes électriques vers des systèmes plus intelligents va permettre de fortement développer les réseaux de distribution de moyenne et basse tension. Jusqu'à présent ces réseaux étaient assez peu équipés de dispositifs « smart ». Cet état de fait est principalement dû aux éléments suivants : i) des réseaux très étendus (1200000 km contre 100000 km pour le réseau de transport) qui rendent très coûteux le déploiement massif des équipements « smart » ; ii) un réseau moins critique que le réseau de transport pour la sûreté du système (pas de gros moyens de production connectés) ; iii) et un fonctionnement jusqu'alors satisfaisant.

Cette situation est en train de changer du fait des contraintes fortes sur le système électrique : croissance de la demande ou difficultés à investir dans les infrastructures (lignes, centrales). Parallèlement la prise de conscience de la nécessité de limiter les émissions de CO₂, conduit à un fort développement des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, cogénération, biomasse...). Ces ressources énergétiques étant par nature dispersées, cela conduit à une multiplication des petites unités de production (< 10 MW) qui sont raccordées sur le réseau de distribution. Enfin, face à la difficulté croissante de satisfaire la demande lors des fortes pointes, la gestion de l'équilibre offre-demande évolue. Désormais, on essaie aussi d'adapter la demande à la production en mettant en œuvre des mesures incitatives de maîtrise de la demande.

L'intégration de cette production distribuée dans les réseaux électriques et la mise au point de stratégies de gestion de la demande sont les deux piliers de l'évolution des réseaux de distribution. Ces changements massifs mettent en exergue les limites des réseaux actuels et de leurs modes de gestion. Les infrastructures actuelles ne pouvant être intégralement remplacées – la durée de vie moyenne des équipements est de 30 à 40 ans – il s'agit donc de les adapter en utilisant des moyens modernes principalement basés sur l'apport des technologies de l'information et de la communication (TIC), notamment la modélisation, le contrôle-commande, l'optimisation et la communication. Parallèlement la libéralisation du secteur électrique conduit au développement de nouveaux modèles d'affaires dont il faut s'assurer qu'ils ne mettent pas en péril la sûreté du système électrique.

Voir détails en Annexe 2.2

WP3 - Le véhicule électrique et son intégration au réseau électrique

Mariana Netto et Zoubir Khatir (WP3 leaders)

Les nouveaux réseaux électriques ne peuvent pas être étudiés sans considérer la problématique de l'intégration des véhicules électriques dans ces réseaux. Selon toute vraisemblance, les véhicules électriques seront de plus en plus courants dans un futur proche, ce qui représentera un grand nombre de systèmes à connecter au réseau tous les jours pour être rechargés, en ajoutant donc une grande charge supplémentaire.

Cette charge peut poser deux problèmes. Le premier est celui du besoin en énergie électrique supplémentaire qui remplacera la consommation en énergies fossiles. Le deuxième est celui de la consommation de pointe. Il sera primordial de piloter cette charge supplémentaire, de manière à ne pas recharger les véhicules aux heures de pointe, en induisant une communication entre le véhicule, le bâtiment et le réseau. Ce pilotage consistera à décaler, probablement sur la base de signaux de prix, la charge des véhicules vers les heures creuses.

Une autre possibilité sera l'utilisation par le réseau électrique d'une partie de la charge stockée dans ces véhicules, pendant la période de pointe de consommation. Ceci aura l'avantage pour le gestionnaire du réseau de ne pas utiliser des sources d'énergies plus polluantes, et beaucoup plus chères, pour maîtriser la pointe de consommation. Pour le propriétaire du véhicule, cette opération apportera l'avantage de charger son véhicule aux heures où l'énergie coûte le moins cher, et la revendre aux heures où elle coûte le plus cher. Cette technique nécessitera diverses spécialités de l'informatique, de l'économie, de la communication, de l'automatique, de l'électronique de puissance et des réseaux d'énergie.

L'intégration optimale et efficace des véhicules électriques dans les "smarts grids" se fera en lien étroit avec la problématique des transports dans son sens large. Les profonds changements qui émergent actuellement dans le monde automobile ainsi que l'émergence de nouveaux concepts de mobilité et de sécurité durables, par exemple, menant vers la ville de demain, seront intégrés en amont aux réponses aux nouveaux problèmes posés. Les thèmes, ou points durs, suivants, mariant la recherche publique à la recherche privée sont d'importance majeure :

- La recharge des batteries et la problématique associée en lien avec la mobilité durable : les infrastructures de recharge, leur plan de déploiement ainsi que l'accessibilité à cette infrastructure, la sécurité de la recharge, la facturation et le coût, et la gestion de la distribution.
- Les cycles de vie et la problématique associée, incluant l'analyse des filières énergétiques, les impacts des émissions de gaz à effet de serre et l'analyse des coûts (à préciser).
- La fiabilité et la sécurité des véhicules électriques dans leurs différentes configurations : le véhicule électrique ouvre des possibilités nouvelles et étendues pour les systèmes d'aide au conducteur. Sa fiabilité devra être largement et précisément étudiée et assurée.
- L'évaluation des nouveaux systèmes en lien avec le véhicule électrique avant leur introduction sur le marché, compte tenu de l'ensemble des aspects liés à l'humain, ce qui relève également les disciplines de la psychologie individuelle, sociale et de l'ergonomie.

Voir détails en Annexe 2.3

5. Activités d'Electreo

L'ensemble des activités suivantes relèvent du groupe Electreo et devront être organisées par le groupe selon un calendrier à établir :

- Site web.
- Montage de projets régionaux (DIM Systèmes complexes), nationaux (ANR), européens (KIC Climat...).
- Co-tutelles de thèses (bourses Digiteo par exemple).
- Co-encadrement de post-docs.
- **Mise en œuvre du démonstrateur SmartCampus (Annexe 1).**
- Rapports d'avancement (tous les trois mois et faisant suite à une réunion de la core team).
- Feuilles de route.
- Invitation d'experts et organisation de journées scientifiques thématiques.
- Co-organisation de workshops avec la KIC Climat et HYCON2.
- Séminaires.
- Ateliers / conférences avec les pôles de compétitivité.
-

ANNEXE 1 – Smart Campus (projet Campus Intelligent)

Groupe **ELECTREO**,

Animateurs: Gilney Damm (EECI), David Mercier (CEA), Marc Petit (SUPELEC)

Un des projets phare que le groupe Electreo propose de développer dans le moyen-long terme est la construction d'un "Smart Campus" sur le campus du plateau de Saclay. Ce projet consiste à équiper le Campus, en cours de construction, de toute l'infrastructure nécessaire pour qu'il devienne un démonstrateur des recherches menées sur les "Smart Grids".

Cette chance unique que représente l'ensemble des projets de construction immobilière du campus devrait permettre, à un coût réduit, de disposer à terme d'un démonstrateur de taille réelle pour le stockage, la consommation et la distribution intelligente d'électricité, en incluant le déploiement de flottes de véhicules électriques. Ce Smart Campus pourra également être connecté à des démonstrateurs existants ou en construction dans le voisinage du campus comme à Massy (Alstom Power) ou à Satory.

L'aménagement du plateau de Saclay nécessitera l'extension du réseau de distribution électrique (moyenne tension – HTA – et basse tension – BT). Ce réseau alimentera :

- des bâtiments HQE ou plus probablement BBC ou à énergie positive, c'est-à-dire avec une forte production d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien urbain, cogénération...);
- des bâtiments équipés de systèmes de gestion de la charge (compteurs intelligents, *energy box*), pour contrôler des systèmes de chauffage, de climatisation, d'éclairage ;
- des moyens de stockage d'énergie dispersés sur ce réseau ;
- des systèmes de recharge pour véhicules électriques ou transport urbain électrique.

L'intérêt de ce démonstrateur est qu'il soit utilisable par les équipes de recherche, ou par des équipementiers partenaires du projet, afin de tester de nouveaux produits.

Pour garantir la réussite d'un tel projet, il est important que ces spécifications soient prises en compte très tôt par les acteurs qui interviendront dans la construction de ce nouveau campus, notamment les architectes et l'exploitant du réseau électrique. Ce nouveau démonstrateur ayant vocation à être utilisé pendant plusieurs décennies, il doit être facilement modulable avec :

- une facilité à changer des équipements numériques dédiés au contrôle-commande du réseau et au pilotage intelligent des charges ;
- des solutions technologiques de communication (courants porteurs, téléphone, fibre optique, internet...) entre les compteurs et le réseau électrique, qui ne doivent pas être figées afin d'en tester de nouvelles sans difficulté ;
- des possibilités pour introduire de nouveaux moyens de production d'énergie (sur les bâtiments par exemple).
- Une capacité à gérer la topologie du réseau, en particulier en pouvant isoler certaines sous-parties pour une approche micro-grid.

Ce projet doit profiter des compétences développées par la Fondation Européenne pour des Territoires Durables (Fondaterra), qui travaille en partenariat avec la région Ile-de-France sur le concept des "Green TIC Campus", en incluant les aspects liés à l'éco-construction, aux éco-quartiers, aux bâtiments à énergie positive et à la réduction des émissions de CO2 par les campus franciliens. Cette vision très systémique est totalement en harmonie avec le projet de Smart Campus qui est plutôt spécialisé dans les techniques et technologies de réseau électrique nécessaires pour réaliser un "Green TIC Campus".

Très rapidement, un état des lieux devra être fait sur le campus pour identifier les options qui sont déjà figées, les choix à faire très tôt dans le projet et les choix à faire au fil de l'eau. Les différents jalons de la construction de ce Smart Campus seront établis sur cette base.

Au-delà de sa vocation de démonstrateur régional, ce projet doit aussi être une vitrine du campus vis-à-vis de l'extérieur. Il contribuera à faciliter le recrutement des meilleurs étudiants en France et à l'étranger et à attirer les professeurs de haut niveau dans le cadre de chaires scientifiques. Ce projet bénéficie donc de multiples atouts :

- **atout politique** : les réseaux intelligents constituent un des thèmes prioritaires du Grand Emprunt et participent au développement d'un environnement "bas carbone" ;
- **atout scientifique** : le campus du plateau de Saclay réunit les compétences et expertises tant industrielles qu'académiques nécessaires pour mener des travaux à haute valeur ajoutée sur les systèmes électriques intelligents ;
- **atout industriel** : plusieurs partenaires industriels sont impliqués dans l'évolution du campus du plateau de Saclay, comme EDF R&D ;
- **atout pédagogique** : ce projet renforcera la capacité à attirer les étudiants sur les thématiques scientifiques que sont l'énergie et les STIC, et devrait permettre d'attirer davantage les étudiants des Grandes Ecoles d'ingénieurs vers la recherche ;
- **atout de reconnaissance internationale** : la multitude de personnes de passage sur le plateau (étudiants, professeurs, chercheurs des secteurs public et privé) constitue une formidable opportunité pour diffuser la connaissance des compétences et moyens scientifiques disponibles sur ce Smart Campus.

ANNEXE 2.1 – Génération et transport de l'électricité

L'ambition majeure d'Electreo est d'apporter de plus en plus de développements récents des STIC aux systèmes électriques. Ceci englobe évidemment les nouvelles technologies de la transmission de l'information et des systèmes embarqués, mais aussi les nouveaux résultats scientifiques de l'automatique et de l'informatique, ainsi qu'une forte utilisation de l'économie. Les sujets de recherche envisagés, qui sont au cœur des intérêts d'Electreo, sont par exemple les suivants :

1. Stabilité des grands réseaux électriques – stabilité transitoire, fréquence et tension

- Commandes automatiques bas niveau plus robustes aux perturbations.
- Inclusion des informations distantes dans les correcteurs locaux.
- Choix des signaux significatifs pour l'amélioration de la commande.
- Prise en compte des retards.
- Estimation des états du réseau par des algorithmes observateurs.
- Oscillations interzone, en probable augmentation avec l'expansion géographique du réseau européen.
- Prise en compte des variations du marché avec l'inclusion de signaux de prix dans les algorithmes de commande.
- Gestion et optimisation des flux de puissance dans le réseau de transport avec la prise en compte des énergies renouvelables et des marchés de l'énergie.

2. Simulation et analyse "on-line" pour la supervision et la prévention des pannes

- Nouveaux modèles des composants de réseaux et leur interconnexion.
- Inclusion de mesures des composants distants.
- Outils de simulation, analyse de la stabilité et algorithmes d'optimisation pour l'étude "on-line" de l'état du réseau pour l'aide à la prise de décision des opérateurs humains.

3. Génération basée sur les Énergies Renouvelables (EnR)

- Étude de la participation des EnR aux services systèmes, possiblement par inclusion du stockage et des prévisions/informations météorologiques à différentes échelles de temps.
- Étude de l'impact et maîtrise du réseau avec une grande pénétration des EnR.
- Maîtrise de l'interconnexion entre usines EnR avec le réseau, possiblement réalisé à travers des FACTS.
- Définition des responsabilités entre TSO et GSO dans le réglage de cette interconnexion.
- Interconnexion des EnR offshore au réseau à travers un faible nombre de points de connexion, possiblement via des "hubs" de concentration d'énergie.

4. Aspects économiques des réseaux

- Maîtrise de la congestion des flux de puissance dans les lignes de transmission par des signaux économiques.
- Long terme : prix moyen d'utilisation de part du réseau de transport plus élevé pour inciter/compenser les investissements à long terme dans la construction de nouvelles lignes de transmission.
- Court terme : prix moyens plus élevés dans différents tronçons du réseau de transport, ceci dans le but de maintenir les flux de puissance, surtout ceux de passage provenant des systèmes extérieurs, les plus petits possibles.
- Étude de la formation des prix et de leur impact sur la production et la consommation d'énergie.

- Systèmes de tarification pour le pilotage de la demande ; incitation à l'effacement partiel ou total de la consommation de différents segments de consommateurs.

5. Intégration dans le marché Européen

- Communication des informations de prix ("price signals") à plus grandes distances.
- Prise en compte de ces signaux dans les algorithmes d'optimisation utilisés pour le dispatching.
- Détermination et prédiction à plusieurs heures de ces signaux tarifaires pour qu'à l'issue de la phase d'optimisation le réseau soit équilibré.
- Meilleure connexion entre des systèmes de décision et de réglage basés sur les lois physiques et ceux basés sur les lois économiques.

6. Ré-configuration du réseau par FACTS

Utilisation (choix du type, localisation, dimensionnement et développement de l'algorithme de commande) de FACTS (possiblement à implantation temporaire) pour la reconfiguration et la maîtrise du réseau de transport ; maîtrise de la congestion, commande des flux de puissance, stabilité en tension.

7. Aspects du réseau de communication associé aux réseaux électriques

- Interdépendance des réseaux électriques et de télécommunication ; augmenter la robustesse des réseaux électriques par rapport à des défaillances ou failles de sécurité du réseau de communication.
- Qualité de service et robustesse de la communication.
- Maîtrise de grands flux de données provenant des divers capteurs distribués.

ANNEXE 2.2 – Réseau de distribution intelligent et consommation

Intégration de la production dispersée

L'intégration massive de ces nouveaux moyens de production tant en moyenne tension (HTA) qu'en basse tension va – comme c'est souvent souligné – créer des flux de puissance bi-directionnels sur le réseau. En soit ce n'est pas dramatique car les éléments du réseau (transformateurs et lignes) sont bi-directionnels par nature. La difficulté vient du fait que :

- *le réglage de la tension* est localisé aux postes sources (postes HTB-HTA à l'interface avec le réseau de transport). Ce réglage a pour rôle de maintenir la tension dans les plages réglementaires. Avec des flux de puissance de l'amont vers l'aval le point haut de tension était au poste source, ce qui ne sera plus le cas avec de la production distribuée (la tension monte au point d'injection). La gestion de ce plan de tension devient critique et nécessite une bonne connaissance des moyens de production et consommation et le recours à des moyens spécifiques dispersés (bancs de condensateurs par exemple). L'intermittence de certaines productions (éolien, PV) peut conduire à des fluctuations de tension nuisibles (flicker). Un contrôle dynamique des moyens de réglage de la tension doit permettre de les atténuer.
- *les moyens de protection* – éléments essentiels pour garantir la sécurité – fonctionnent sur la base de relais bien souvent non directionnels (moindre coût). Or les nouveaux moyens de production vont créer des courants de défauts bidirectionnels. Pour éviter des déclenchements intempestifs qui dégraderont la continuité de service, les plans de protection doivent être revus en s'aidant des moyens de communication disponibles pour faire dialoguer les relais. Par ailleurs les "*grid codes*" imposent des contraintes de tenue aux creux de tension lors de perturbations sur le réseau.

Maîtrise de la demande

La gestion de la demande va permettre d'agir sur les charges (domestiques, tertiaires, voire industrielles, mais aussi les véhicules électriques) pour préserver la sûreté du système. La gestion de la demande est ainsi devenue un moyen incontournable pour faire face :

- à la difficulté liée à la pointe de consommation. Dans le cas de la France, l'équilibre offre-demande – lors des fortes pointes – n'est assuré que grâce aux interconnexions, dont les capacités sont limitées. Par ailleurs certaines topologies particulières du réseau de transport (non bouclé en Bretagne et région Sud-Est) limitent fortement les transits admissibles. Au final les marges de sécurité du système sont faibles lors des fortes pointes.
- aux fluctuations de fréquence. En présence de moyens renouvelables, le réglage de fréquence repose sur les groupes traditionnels. La gestion du parc de production impose une limitation de la réserve de puissance des groupes dédiée au réglage de fréquence. Un moyen pour limiter la construction de nouveaux moyens émetteurs de CO₂ est le recours à une gestion de la demande pour participer au réglage de fréquence (court et moyen terme) en proposant des offres d'effacement.
- à la volatilité des moyens de production renouvelables. L'idée est alors de coupler la consommation locale avec la production locale raccordée en BT ou HTA, afin de limiter les fluctuations de transit et donc de tension sur le réseau. Ce type de stratégie peut être opportun sur des bâtiments intégrant de la production photovoltaïque, surtout si les tarifs de rachat venaient à évoluer.

La mise en œuvre des stratégies de gestion de la demande passera par l'émission et l'envoi de signaux tarifaires en vue de créer des incitations à une meilleure maîtrise. Parmi les enjeux apparaissent alors :

- l'équipement des bâtiments d'une intelligence énergétique réactive aux signaux tarifaires. Il est en effet peu crédible de considérer qu'un particulier ou un gestionnaire de bâtiment ou d'entreprise va accepter d'être constamment dérangé par ces signaux tarifaires et va disposer en permanence de la réactivité nécessaire pour pouvoir agir sur son système. Cette tâche doit donc être automatisée mais l'outil doit rester accessible pour que le grand public puisse facilement le configurer.
- la définition de signaux tarifaires pertinents. Des évolutions du tarif trop faibles n'arriveront pas à équilibrer le réseau. Des évolutions trop fortes vont provoquer le déséquilibre inverse. A un instant donné, l'enjeu est de déterminer de combien faire évoluer le prix du KWh pour faire économiser à la région une quantité donnée de MW. Il s'agit donc d'identifier les moyens et mécanismes de négociations entre les très nombreuses et différentes intelligences présentes dans le réseau pour trouver en temps réel le prix d'équilibrage du réseau.
- maîtriser le déplacement de la pointe pour éviter de générer une pointe plus importante – mais décalée – à la remise en route des équipements coupés.

Systèmes d'information et de communication

Qu'elle soit rudimentaire ou très complexe, l'intelligence artificielle – dont l'intelligence énergétique n'est qu'un cas particulier – n'est jamais spontanée et divinatoire. De tels systèmes ne fonctionnent bien que si les systèmes décisionnels reçoivent dans les temps suffisamment d'informations pertinentes et correctes. Un autre point essentiel de cette thématique concerne donc les nouveaux systèmes de communication et d'informatique embarquée qui permettent une communication entre chaque bâtiment et un centre de commande local ou entre différents bâtiments. Ce réseau de communication, dual du réseau électrique de transport ou de distribution, doit être impérativement bidirectionnel. Beaucoup de solutions restent envisageables aujourd'hui : par le réseau électrique lui-même (des courants porteurs en ligne), par des câbles dédiés (par exemple par le réseau téléphonique ou par fibre optique) ou par ondes hertziennes (p.ex. les systèmes cellulaires). Les performances de ce réseau en termes de latence, de débit, de taux d'erreur ou de pertes dans les données transmises conditionnent fortement la disponibilité de l'information et donc la performance des systèmes d'intelligence énergétique. Il convient donc d'identifier les bonnes solutions de communication et de les valider conjointement aux autres tâches. Par ailleurs, au delà des purs critères de performance et de qualité de service, ce réseau de communication, couplé au réseau de transport et de distribution électrique, doit répondre entre autres aux exigences suivantes :

- (a) *Disponibilité* : le réseau doit offrir une connectivité permanente et stable entre les différents éléments communicants, aussi bien au sein du bâtiment, qu'entre le bâtiment (p.ex. le smart-meter) et le centre de commande, ou entre des points de mesures/contrôles sur le réseau électrique et le centre de commande. En particulier, le réseau de communication doit pouvoir rester opérationnel malgré une coupure électrique.
- (b) *Résilience et tolérance aux pannes* : le réseau doit mettre en œuvre des mécanismes de détection (voire d'anticipation) de pannes et de reconfiguration afin d'assurer une continuité de service malgré les incidents pouvant survenir dans l'infrastructure.
- (c) *Scalabilité* : les mécanismes et protocoles de communication utilisés doivent permettre de supporter un très grand nombre d'éléments communicants (et l'ajout dynamique de nouveaux éléments) sans introduire de surcharge dans le réseau. En particulier, des techniques permettant des communications de groupe (ou point-à-multipoint) efficaces sont nécessaires.

- (d) *Flexibilité et durabilité* : le réseau doit pouvoir supporter une évolution des services applicatifs (et types de trafic associés) à transporter, garantissant ainsi une certaine pérennité de l'infrastructure. Par exemple, au-delà de la maîtrise de la demande et de l'intégration de la production dispersée, l'utilisation de ce réseau pour de nouvelles applications de maintenance ou de surveillance doit être possible.
- (e) *Sécurité* : les données stockées dans le réseau, ainsi que l'échange d'informations jugées confidentielles (p.ex. liées aux utilisateurs), doivent être sécurisées de manière appropriée. De même, l'infrastructure de communication et les services réseaux doivent être sécurisés pour éviter par exemple toute intrusion ou injection de trafic perturbateur ; toute faille de sécurité pouvant avoir des conséquences importantes non seulement sur le réseau de communication lui-même mais aussi sur la stabilité du réseau électrique.

Dans ce cadre, le développement de standards et l'interopérabilité de l'ensemble des dispositifs sont primordiaux.

Véhicules électriques

Les véhicules électriques sont une classe particulière de charges concernées par les programmes de gestion de la demande. Actuellement une des craintes des gestionnaires de réseau concerne le renforcement de la pointe du soir lié à une recharge simultanée de nombreux véhicules. Au-delà, le déploiement des bornes de recharge va introduire sur le réseau électrique des charges mobiles, c'est-à-dire des contraintes mobiles, donc plus délicates à gérer. Par ailleurs, se posera aussi les conditions d'utilisation d'une partie de l'énergie stockée dans les batteries comme réserve de puissance pour le réseau. Ce thème est détaillé dans le WP3.

Contexte économique

Les aspects économiques qui constituent une couche transverse aux éléments mentionnés précédemment, vont influencer fortement sur les stratégies développées. En particulier, les modalités économiques des mesures incitatives joueront un rôle important dans la réussite des actions de maîtrise de la demande. Par ailleurs, les modèles d'affaires proposés par les agrégateurs (type Voltalis en France) détermineront leurs capacités à réunir un portefeuille suffisant de clients afin de déposer des offres suffisantes sur le mécanisme d'ajustement. Concernant le développement des énergies renouvelables, quelles mesures mettre en œuvre lorsque les politiques de rachat obligatoire cesseront ? Comment garantir la rentabilité économique de ces projets sans de tels tarifs ?

ANNEXE 2.3 – Le véhicule électrique et son intégration au réseau

La recharge des batteries en lien avec la mobilité durable

Le contexte automobile mondial évolue à une vitesse accélérée vers de profonds changements qui touchent différents aspects. L'introduction de nouvelles philosophies et de nouveaux concepts de mobilité en ville, par exemple, est au cœur des discussions dans les pôles de compétitivité concernés en France (Moveo, Advancity). De plus, les systèmes de transports et de mobilité évoluent vers la route intelligente, c'est-à-dire équipée d'une infrastructure de télécommunications permettant le flux de différentes informations dans le réseau routier. Des nouveaux concepts intégrant la construction de voies de véhicules électriques automatisés font également l'objet de recherches en France, ce qui permettra par exemple de faciliter les déplacements des personnes à mobilité réduite.

A cela s'ajoutent l'inter-modalité et la recherche associée. De nouveaux systèmes permettront un usage optimal de différents moyens de transport, notamment le vélo électrique, le concept "d'auto-lib", les navettes partagées et le véhicule électrique à usage personnel. Ce contexte élargi de mobilité est étroitement lié à la connexion des véhicules électriques à leurs réseaux de recharge. Par exemple, l'établissement d'un plan de déploiement d'un ensemble d'infrastructures de recharge est fonction du type de structure routière sur laquelle ce déploiement se fera : i) un réseau de voies dédiées à des véhicules électriques automatisés ou un réseau à circulation standard ; ii) un réseau au cœur d'une grande ville, avec une présence plus accentuée de l'inter-modalité ; iii) ou un réseau autoroutier avec une présence plus accentuée de poids lourds.

Plus loin, au réseau communicant entre le véhicule, le bâtiment intelligent et l'infrastructure de recharge, construit pour l'accessibilité des véhicules électriques à ces infrastructures de recharge, s'ajoutera le flux d'informations lié au concept de la route intelligente : des surcharges dans certains points du réseau de recharge dues à un départ en vacances pourraient par exemple être repérées. Ceci signifie l'intégration aux "Smart Grids" de l'information disponible dans le cadre de la route intelligente. La problématique est multidisciplinaire et requiert l'interaction entre les expertises du génie électrique, des STIC et de l'économie pour l'optimisation de la distribution des stations de recharge et du temps de recharge d'un ensemble de véhicules électriques automatisés ou à usage normal. Cette description est étendue également au niveau du véhicule avec son équipement en capteurs et la gestion de leur communication avec les infrastructures.

la sécurité de la recharge, la facturation et le coût.

Au-delà du problème de la gestion et de la distribution de la recharge, celle-ci devra se faire en toute sécurité pour l'utilisateur. Par ailleurs, des études doivent être menées pour déterminer le modèle économique le mieux adapté pour le service de recharge en termes de coût et de facturation pour l'utilisateur.

L'analyse des cycles de vie des véhicules électriques

L'analyse du cycle de vie (ACV) sert à évaluer l'impact du véhicule sur l'environnement et ce tout au long de son existence, depuis l'extraction des matières premières, son utilisation et jusqu'à sa mise au rebut. L'acceptabilité sociale de ces véhicules passera par la démonstration que leur impact environnemental, obtenu par l'analyse ACV, sera moindre que celle des véhicules thermiques. En termes d'éco-bilan, le problème particulier de la recyclabilité des grandes quantités de batteries devra être résolu.

La fiabilité et la sécurité des véhicules électriques

Le déploiement du nouveau système de véhicule électrique implique une étude visant sa fiabilité. Il s'agit de relever des défis tant au niveau de l'électronique de puissance que dans le domaine de l'automatique. Ainsi, la gestion de la sécurité des moteurs-roue devra être assurée. De plus, le

déploiement de ces véhicules permet le développement de nouveaux systèmes d'aide à la conduite, notamment par le biais du contrôle indépendant de moteur dans chaque roue. La commande de ces véhicules et la sécurisation de leur conduite sont des thèmes à traiter. A la conception de ces nouveaux systèmes de sécurité devra s'intégrer également l'ensemble de caractéristiques liées à ces nouveaux véhicules telles que par exemple la capacité d'accélération ou d'autres caractéristiques physiques.

L'attente du conducteur vis-à-vis de ces systèmes électriques est aussi un aspect significatif à prendre en compte. Ceci relève des sciences humaines. En effet, la sensibilisation mondiale croissante à la réduction des émissions de gaz à effet de serre peut aussi engendrer un changement de critères de choix du véhicule par le consommateur, comme le remplacement du critère du luxe par des critères écologiques. Le véhicule électrique apparaît déjà comme la cible envisagée, et l'attente du consommateur vis-à-vis des systèmes embarqués peut être différente. Si la sécurité est une attente permanente, d'autres critères pourront être moins importants, tels que le luxe, déjà cité, et la vitesse longitudinale de pointe du véhicule, par exemple. Ceci est donc à prendre en compte dans le développement des nouveaux systèmes embarqués.

Evaluation et acceptabilité

L'évaluation des nouveaux systèmes avant leur introduction sur le marché est un point dur à traiter à des différents niveaux :

- A l'intérieur du véhicule, les systèmes d'optimisation de différentes sources d'énergie dans le véhicule sont à évaluer en cohérence avec des critères de définition de succès et un plan d'expérience bien établis.
- Du point de vue du conducteur, l'acceptabilité individuelle et sociale de ces véhicules est un thème de recherche lié au déploiement des véhicules électriques.
- Au niveau économique, l'étude des retombées économiques du déploiement des véhicules électriques est d'une importance majeure.