

Semestre 3 Master : Réseaux Electriques

Semestre: 3

UE Fondamentale Code : UEF2.1.1

Matière: Réseaux électriques Intelligents

VHS:22h30 (Cours: 1h30)

Crédits: 2

Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à présenter le développement du réseau électrique intelligent de demain, à la fois communicant, interactif et multidirectionnel grâce à l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Connaissances préalables recommandées:

Notions sur le fonctionnement du réseau électrique

Contenu de la matière

Chapitre I : Introduction aux réseaux électriques intelligents «Smart Grids»

- I-1 Définition, Causes de leur émergence, Bénéfices attendus, Impacts et freins,
- I-2 La technologie des systèmes intelligents,
- I-3 Transformation structurel du système électrique suite à sa dotation de TIC,
- I-4 Réorganisation de l'entreprise,

Chapitre II : Enjeux socio-économiques des réseaux électriques intelligents,

- II-1 Ouverture des marchés de l'électricité, Tarifications,
- II-2 Réglementation, législation et régulation (normes, directives, conformité));
- II-3 Standards et pratiques industrielles,

Chapitre III : Adaptation des systèmes énergétiques

- III-1 Diversité des ressources des renouvelables et particularités;
- III-2 Exploitation des énergies renouvelables variables,
- III-2 Valorisation des énergies variables,
- III-4 Stratégies de stockage

Chapitre IV : Gestion et pilotage des réseaux électriques

- IV-1 L'apport des systèmes intelligents : maîtrise de la demande énergétique, gestion des pics de consommation « le Consom-acteur », gestion et flexibilité de la demande, gestion de crise (blackout);
- IV-2 Le Smart Metring (compteur intelligent, ou communicant),
- IV-3 Les courants porteurs en ligne

Chapitre V : Développements de service liés aux systèmes intelligents

- V-1 Croissance de l'industrie des TIC,
- V-2 Recherche et développement;
- V-3 Sécurité informatique;
- V-4 Calcul technico-économique et critères de décision (Manager- consommateur).

Mode d'évaluation: examen 100%

Références Bibliographiques:

1. N. Simoni, « Des réseaux intelligents à la nouvelle génération de services », Hermès, 2007
2. R.C. Dugan, M.F.McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, 'Electrical Power Systems Quality', Mc Graw Hill Companies, 2004.
3. S. Znay, M.P. Gervais, « Les réseaux intelligents », édition Hermès, 1997

Chapitre I : Introduction aux réseaux électriques intelligents «Smart Grids»

I. Un réseau électrique plus intelligent, une combinaison de trois systèmes

I.1. Définition d'un réseau électrique intelligent

Les experts de la Commission Européenne retiennent la définition suivante : *«un réseau électrique intelligent est un réseau qui est capable d'intégrer au meilleur coût les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont reliés : producteurs, consommateurs ainsi que ceux qui sont les deux à la fois. L'objectif est d'assurer au système électrique d'être durable et rentable, avec des pertes faibles et avec des niveaux élevés de sécurité, de fiabilité et de qualité de la fourniture»*.

De façon plus précise, un réseau électrique intelligent (*Smart Grid*) a pour objectif de générer et distribuer de l'énergie de façon **plus efficace, plus économique et plus durable** qu'un réseau classique, tout en assurant la sécurité de l'approvisionnement. Il intègre et interconnecte à cette fin des technologies et outils innovants sur l'ensemble de sa chaîne de valeur, depuis la production d'énergie jusqu'aux équipements du consommateur. Cette intégration est réalisée grâce à l'utilisation de capteurs et d'équipements numériques de protection, de mesure et de communication, en interface avec les centres de contrôle et de pilotage.

Le réseau électrique intelligent offre à tous les consommateurs la possibilité d'obtenir des informations précises sur leurs usages électriques. Cela leur permet de mieux connaître et piloter leur propre consommation, leur éventuelle autoproduction et d'améliorer leur efficacité énergétique, en liaison avec le réseau et ses opérateurs.

I.2. Caractérisation d'un réseau électrique intelligent

Le réseau électrique intelligent constitue un écosystème complexe que l'on peut décrire sous forme d'une combinaison de systèmes afin de saisir les éléments les plus structurants de cette « nouvelle économie de l'électricité » ou « nouvelle économie de l'énergie » au sens large. L'écosystème des réseaux électriques intelligents modifie le système actuel des réseaux qui repose sur une gestion unidirectionnelle (de l'amont vers l'aval) en introduisant une gestion systématique intégrée à plusieurs niveaux et bidirectionnelle (de la production centralisée aux productions décentralisées).

Trois niveaux de systèmes s'interpénètrent:

- **les systèmes de production** d'énergies conventionnelles et renouvelables, qui regroupent l'ensemble des capacités de production du vecteur électrique,
- **le système local** qui correspond à une activation de l'intelligence énergétique dans l'industrie et les bâtiments résidentiel, tertiaire ou collectif et à l'intégration des énergies renouvelables, des systèmes de stockage et des véhicules électriques,
- **le système transversal** qui est constitué des réseaux de distribution et de transport actifs, pilotés et ajustés en temps réel entre l'offre d'énergies (conventionnelles et renouvelables) et la demande du système local.

Le réseau électrique intelligent ainsi constitué répond aux priorités de la nouvelle économie de l'électricité, que l'on peut synthétiser en **trois grandes valeurs d'usage**:

- **l'intégration des énergies renouvelables**, intermittentes et des nouveaux usages électriques,
- **la flexibilité de la production et de la consommation** pour la réduction de la pointe électrique,
- **la gestion de flux d'information et d'énergie bidirectionnels** entre les trois niveaux de systèmes.

Le réseau électrique intelligent **se caractérise tout d’abord par :**

Sa **capacité à gérer des productions** d’énergie centralisées et décentralisées (notamment les productions à base d’énergies renouvelables, dont il permet le développement et l’intégration optimale). Il permet aussi le développement et l’intégration de sources d’énergie issues de moyens de stockage, notamment diffus et décentralisés.

Il se caractérise ensuite par le **déploiement massif** et l’utilisation à tous les niveaux **de compteurs intelligents** (ou Smart Meters) : Ces compteurs sont plus précis, capables de mesurer plusieurs types de flux électriques et surtout, ils sont communicants. Ils permettront de contrôler et de piloter des flux bidirectionnels de courant et d’information, à tous les niveaux du réseau.

Un réseau d’électricité intelligent rend également possible la **Maîtrise de la Demande d’Electricité (MDE)** au service de tous les consommateurs. Il s’agit premièrement de diminuer globalement la consommation d’électricité en changeant les comportements. En fournissant aux consommateurs des informations précises sur leur consommation et l’impact de leurs usages électriques, un réseau d’électricité intelligent permet à ces derniers de devenir « **consom’acteurs** » et d’adapter leurs comportements. Le pilotage et la gestion de leur éventuelle autoproduction leur permet de devenir « consommateurs-producteurs » (prosumers).

La **gestion active des bâtiments** (secteur tertiaire), le pilotage énergétiquement plus efficace des procédés de fabrication (secteur industriel) et l’optimisation de la consommation domestique sont facilités, au service de l’efficacité énergétique de tous les consommateurs. À plus grande échelle, un réseau électrique intelligent favorise le développement des villes du futur (smart cities) constituées d’éco-quartiers disposant de productions décentralisées et des moyens de pilotage de ces productions (microgrids).

La Maîtrise de la Demande d’Electricité (MDE) consiste à faire de la demande une variable d’ajustement : cela signifie que l’on doit pouvoir répondre à un déséquilibre du réseau en agissant sur la demande d’électricité plutôt que sur l’offre. Un réseau électrique intelligent est capable de **piloter finement et de lisser la courbe de charge** pour agir sur la demande, notamment en pointe (pic de consommation). Le pilotage de la courbe de charge passe par des effacements de consommation, c’est-à-dire la coupure momentanée, autorisée et ciblée (usages électriques reportables ou annulables sans impact sur le confort) de l’alimentation électrique de certains équipements. Pour offrir une grande capacité de demande effaçable, ces effacements – ou délestages – peuvent être diffus, c’est-à-dire qu’ils sont répartis entre de très nombreux consommateurs. Le pilotage de la courbe de charge passe également par des effacements programmés, qui visent en particulier le secteur industriel.

En diminuant ou en reportant dans le temps certains appels de puissance électrique, il est possible d’assurer l’équilibre du réseau tout en limitant le recours au démarrage de nouvelles productions d’électricité (qui sont les plus polluantes). Les véhicules électriques sont intégrés au réseau et leur usage (V2G, Vehicle to Grid) est optimisé : la rapidité de la charge est pilotée selon l’infrastructure et les moyens de production disponibles et les véhicules peuvent être utilisés comme un moyen de stockage diffus.

II. Les bénéfices attendus de la mise en œuvre de réseaux électriques intelligents

II.1. Bénéfices environnementaux

La réponse globale et locale du réseau électrique aux défis du changement climatique implique des actions tant au niveau de la fourniture que de la demande d’électricité. L’objectif est de répondre à une demande toujours plus grande, tout en diminuant drastiquement les émissions de CO₂.

La mise en œuvre d'un réseau électrique intelligent permet une diminution conséquente de l'impact de la fourniture d'électricité sur l'environnement par :

- L'évolution du *mix énergétique*,
- Une meilleure maîtrise de la demande d'électricité (MDE),
- L'amélioration de l'efficacité du réseau.

Ainsi, un rapport du *Climate Group* estime que grâce au déploiement des réseaux électriques intelligents, la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la production d'électricité atteindra 2,03 GT équivalent CO₂ dans le monde en 2020.

Aux États-Unis, selon l'Electric Power Research Institute (EPRI), une amélioration de 5% de l'efficacité du réseau aux États-Unis se traduit par une économie de 44 GW en pointe, soit la production de 25 centrales au charbon ou encore les rejets de 53 millions de véhicules. Les économies d'énergie attendues devraient représenter en 2020 entre 3,7 et 8,3% de la consommation totale d'énergie.

En Europe, un programme de MDE modéré aurait comme impact une économie de 59 TWh par an en 2020, une réduction du pic de production de 28 GW et une diminution des émissions de CO₂ de 30 MT par an. Un réseau électrique plus intelligent constitue donc une réponse pertinente aux enjeux environnementaux.

Il doit permettre aux États membres de l'Union Européenne, de tenir leur engagement du Paquet Energie Climat. Ce train de mesures, adopté en décembre 2008 par l'Union Européenne, engage les 27 aux « 3 x 20 » : il s'agit, par rapport au niveau de 1990, de réaliser 20% d'économies d'énergie, de diminuer de 20% les émissions de gaz à effet de serre et d'intégrer 20% d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie.

À plus long terme, l'objectif fixé par l'Union Européenne est le Facteur 4. Il s'agit d'un engagement à diviser par quatre d'ici 2050 le niveau des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990.

II.2. Bénéfices économiques

Un réseau électrique intelligent offre d'importantes perspectives de développement économique de l'ensemble du secteur des réseaux d'énergie et de l'écosystème associé :

- Il rend possible une **gestion plus efficace du patrimoine que constituent les actifs du réseau**, en particulier sur le réseau de distribution sur lequel la visibilité est très faible actuellement ;
- C'est un vecteur **d'émergence de l'innovation, de nouvelles offres, de nouveaux métiers** et d'emplois;
- La maturité des technologies électriques, électroniques, informatiques et télécom permet d'envisager un **déploiement rapide et à grande échelle**. Diffusées massivement auprès du grand public, financièrement abordables, avec des protocoles ouverts, modulaires et flexibles, ces technologies permettent d'accompagner le déploiement d'un réseau électrique intelligent. Leur accessibilité, leur compatibilité et leur ergonomie seront cruciales, notamment dans le résidentiel, pour sensibiliser le public et en faire de véritables « consom'acteurs ».

Le niveau des investissements consentis est à la hauteur de l'intérêt porté aux réseaux électriques intelligents. Ainsi, suite à l'*American Recovery and Reinvestment Act* de 2009, les États-Unis y consacrent un budget de recherche d'environ 4,5 milliards de dollars. Les sociétés de capital-risque, de leur côté, y ont investi en 2007 et 2008 plus de 800 millions de dollars. En France, le Grenelle de l'environnement a posé les bases d'une politique d'investissements publics de grande envergure dans le développement durable, avec 440 milliards d'Euros à l'horizon 2020, dont 115 consacrés aux énergies renouvelables.

II.3. Bénéfices sociétaux

Au delà des aspects environnementaux et économiques, un réseau électrique intelligent fournit des réponses à l'évolution des besoins fondamentaux de la société en énergie et accompagne la politique énergétique globale.

En permettant la hausse de la part des énergies renouvelables dans le *mix énergétique*, un réseau d'électricité intelligent rend possible une moindre dépendance aux sources d'énergies fossiles. Il permet d'accompagner une croissance durable, en répondant aux besoins en énergie et à leur augmentation, notamment celle entraînée par le développement de nouveaux usages.

L'enjeu de moindre dépendance énergétique est également stratégique. Les niveaux de dépendance risquent d'augmenter si le mix énergétique n'évolue pas. Ainsi, on estime que d'ici 2030 l'Europe pourrait devoir importer jusqu'à 84% de son gaz, 59% de son charbon et 94% de son pétrole.

Un réseau électrique intelligent est enfin l'occasion d'assurer et d'améliorer la qualité de la fourniture et la sécurité du réseau. En effet, il pérennise le développement de la télé-relève et de la télé-conduite des équipements électriques installés et en optimise la maintenance, il améliore la détection et la localisation des pannes. Ce faisant, il est capable de lancer des reconfigurations automatiques suite à un incident et devient auto-cicatrisant.

Toutes ces améliorations permettent d'assurer la qualité du courant fourni, et de diminuer la fréquence et la durée des coupures. En particulier, les moyens de pilotage de la demande et de meilleure efficacité du réseau permettent d'améliorer la gestion de la pointe et d'éviter les grands *blackouts*.

Ces améliorations permettent d'envisager un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident, dans un contexte de dépendance de plus en plus forte de toutes les activités humaines vis-à-vis de l'électricité. Face, notamment, aux phénomènes climatiques de grande ampleur ou au risque d'attaque terroriste, la sécurisation de l'alimentation électrique permet de répondre à une demande de plus en plus forte de la collectivité.

II.4. Une réponse à des attentes sociétales et des bénéfices répartis sur la chaîne des acteurs

Combinée à la raréfaction programmée des énergies fossiles et à l'impératif de sécurité énergétique, la protection de la qualité de l'air et du climat nous entraîne dans un mouvement inéluctable de recours accrus aux énergies renouvelables, qu'elles proviennent du vent, du soleil, de la terre ou de la mer.

Compte tenu de la volatilité intrinsèque de la production des énergies renouvelables (cycle diurne/nocturne, conditions météorologiques), il est essentiel de renforcer la disponibilité et la flexibilité de la production d'électricité et d'en faire un axe structurant du changement d'organisation globale et nationale du système électrique existant.

La fourniture d'énergies conventionnelles et renouvelables doit en outre répondre aux besoins de la demande des consommateurs à une échelle macroéconomique et, si possible, avec une instantanéité entre l'adéquation de l'offre et de la demande.

C'est pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande énergétique, toutes deux en pleine mutation, qu'il faut rendre les réseaux électriques intelligents pour, à terme, intégrer par capillarité les autres réseaux énergétiques.

Il est possible de synthétiser les moteurs et accélérateurs de mise en œuvre des réseaux électriques intelligents ainsi que les bénéfices attendus dans les tableaux ci-après.

III. Les moteurs et accélérateurs de la mise en œuvre des réseaux électriques intelligents

III.1. Moteurs

1. Ajouter de la stabilité aux réseaux électriques existants pour intégrer les nouvelles énergies et les nouvelles utilisations finales des énergies.
2. Augmenter la puissance électrique disponible et l'efficacité énergétique des réseaux pour couvrir les nouveaux besoins tels que le véhicule électrique et l'émergence des nouvelles économies.
3. Diminuer l'émission de CO₂ pour toutes les composantes de l'économie conventionnelle par l'intégration des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans les usages finaux.

III.2. Accélérateurs

1. Mobiliser les technologies de l'énergie et du numérique déjà existantes, tout en promouvant l'innovation, pour donner un élan de relance économique après une crise financière, économique et industrielle sans précédent.
2. Renforcer l'implication des pouvoirs publics sur des impulsions structurelles pour faire évoluer le cadre réglementaire et fiscal national et européen.
3. Accroître le rôle actif du consommateur (consom'acteur) dans sa propre gestion de performance énergétique par une acceptation sociétale largement partagée.

IV. Les bénéfices attendus des réseaux électriques intelligents

IV.1. Pour l'état et les comptes publics nationaux

- Atteinte des objectifs de l'Agenda 2020/2020,
- Mise en place des conditions favorables à l'efficacité énergétique,
- Accroissement de l'indépendance énergétique par l'intégration des énergies renouvelables et la réduction de la pointe,
- Contribution à la sécurité des réseaux électriques et plus largement au cyber sécurité,
- Sécurisation des débouchés commerciaux pour les industriels nationaux du secteur électrique,
- Pénétration des nouvelles technologies de l'énergie et soutien à la recherche nationale,
- Contribution à l'économie circulaire et à la préservation des matières premières.

IV.2. Pour les consommateurs

- Accès à des solutions d'efficacité énergétique économiquement compétitives et déjà existantes,
- Promotion des comportements vertueux par une tarification plus flexible en fonction des usages,
- Modification volontaire des comportements dans le respect de la vie privée grâce à une standardisation et une législation spécifique de protection des données,
- Meilleure maîtrise de la production d'énergie renouvelable et des nouveaux usages.

IV.3. Pour les distributeurs d'électricité

- Optimisation des réseaux et de leur gestion en fonction de la source de production d'électricité,
- Intégration harmonieuse de l'utilisation des véhicules électriques et des nouveaux usages électriques,
- Sécurisation de l'équilibre des réseaux.

IV.4. Pour les transporteurs d'énergie

- Pilotage global du système de production, de transport et de distribution,

- Gestion par anticipation et modélisation des capacités disponibles de production d'énergies en fonction de la demande réelle et/ou spontanée.

IV.5. Pour les constructeurs et industriels électriques

- Pérennité d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire,
- Soutien à l'exportation du savoir-faire et de l'excellence de l'industrie électrique française et européenne par l'interconnexion croissante des réseaux,
- Renforcement de la normalisation et des standards pour la pénétration des économies émergentes.

IV.6. Pour l'Université et la recherche

- Mobilisation des chercheurs et universitaires autour de plateforme applicative et grandeur réelle pour le croisement des technologies.

Chapitre II : Adaptation des systèmes énergétiques

I. Production d'énergies conventionnelles et renouvelables

En amont des Systèmes Énergétiques Intelligents se situent les centrales de production, historiquement basées sur des moyens de production centralisés conventionnels – charbon, gaz, nucléaire et hydro-électrique – et évoluant progressivement vers des moyens de production renouvelables décentralisés : éolien, solaire thermique et photovoltaïque, géothermie, énergies marines et piles à combustibles.

I.1 Production centralisée

Les gestionnaires de centrales s'efforcent déjà de maximiser le rendement en énergie issu de la conversion de leurs combustibles primaires en électricité. À cette fin, ils renouvellent et optimisent les technologies de contrôle et de pilotage de leurs installations. Actuellement, le rendement calorifique moyen de la base installée des centrales à charbon est inférieur à 30 % : plus de deux tiers de l'énergie générée du charbon part littéralement en fumée.

L'amélioration des technologies de contrôle des centrales électriques pourrait, à long terme, élever ce rendement jusqu'à près de 50 %.

I.2. Production distribuée et décentralisée

La production décentralisée est essentiellement associée à des moyens de production d'énergie renouvelable intermittente intégrés aux bâtiments (panneaux photovoltaïques, etc.), mais aussi à des moyens de production disponibles au niveau des infrastructures (cogénération, biomasse, moyens de génération de secours). Ces sources de production ont une capacité bien moindre (typiquement entre 0,1 et 50 MW) que celle des centrales de production (typiquement supérieure à 50 MW). Pour s'intégrer dans un réseau d'électricité intelligent, elles vont nécessiter :

- Une forte coordination de la production de multiples petites sources de production (alors qu'historiquement l'équilibrage temps réel offre/demande était réalisé au travers de quelques centaines de points de production) ;
- De meilleurs outils de planification de la production selon les données météo, les estimations de consommation, etc. ;
- Une intégration dans le réseau au travers de flux d'information bidirectionnels ;
- Des facilités d'intégration et raccordement au réseau électrique (de distribution notamment) ;
- L'intégration éventuelle de capacités de stockage permettant de compenser l'intermittence de ces sources d'énergie.

La transition de ces moyens de production intégrant une part croissante de ressources renouvelables nécessite donc de mettre en œuvre de nouveaux systèmes de pilotage et de contrôle de ces moyens de production pour amener une flexibilité opérationnelle suffisante.

II. Qualité et efficacité du transport de l'énergie électrique

Le réseau de transport électrique comporte des lignes à haute et très haute tension qui permettent la transmission de grandes quantités d'électricité sur de longues distances. Au même titre que les moyens de production intermittents perturbent l'équilibrage offre-demande, ces moyens impactent aussi la qualité de l'onde électrique et impliquent en particulier de nouvelles contraintes de stabilité en cas de défaut dans le réseau, du fait de leur très faible inertie.

Ceci nécessite, d'une part, la mise en œuvre de systèmes d'électronique de puissance associés au réseau pour compenser les défauts induits au niveau de la qualité de l'onde électrique en cas de défaut, d'autre part, d'optimiser les capacités des infrastructures de transport et de distribution selon la disponibilité temps réel de l'énergie renouvelable.

De plus, ces contraintes impliquent la mise en œuvre de nouvelles technologies de conversion de puissance au niveau des installations – convertisseurs éoliens et onduleurs solaires – devant échanger des informations en temps réel avec les opérateurs de réseau pour être télé-réglées selon les conditions de fonctionnement d'ensemble du réseau.

III. Protection, automatisation et contrôle des réseaux électriques

Les réseaux électriques permettent un aiguillage des flux électriques entre la production en amont et la consommation en aval. Leur grande diffusion et leurs caractéristiques critiques de disponibilité nécessitent la mise en œuvre d'équipements de protection extrêmement rapides permettant d'une part d'isoler les sections de réseau en défaut et d'autre part de piloter à distance la reconfiguration de certaines branches de réseau selon les incidents encourus ou les campagnes de mise en retrait de certains équipements.

Ceci nécessite la mise en œuvre d'équipements de protection, de contrôle et d'automatisme dans chacun des postes électriques des réseaux de transport et de distribution. Alors que ces technologies ont progressivement migré vers les technologies numériques dans les postes de transport, une part importante d'automatisation reste à réaliser au niveau des réseaux de distribution décentralisés pour permettre une interaction bidirectionnelle avec les nouveaux consommateurs énergétiques incorporant de plus en plus de points de micro production.

IV. Gestion et pilotage global des systèmes électriques

L'optimisation globale des systèmes énergétiques nécessite la mise en œuvre de technologies de « Centres de Contrôle » opérant sur les flux énergétiques temps réel dans les réseaux de transport et de distribution. Ces centres de contrôle sont répartis à différents niveaux des réseaux (national, régional et urbain) et opérés par les gestionnaires de réseau dans le cadre de leur fonction d'opérateurs systèmes.

Sur la base des informations fournies par les capteurs et les équipements de protection et de contrôle répartis dans les postes électriques, ils interagissent en temps réel avec les clients offrant une flexibilité suffisante pour contribuer à l'équilibrage des réseaux.

IV.1 Au niveau du réseau de transport

Le développement d'un véritable réseau de transport d'électricité intelligent, impactant tous les acteurs à tous les niveaux de ce réseau, répond à des besoins d'amélioration spécifiques.

Le gestionnaire du réseau de transport cherche aujourd'hui à améliorer la fiabilité du système global, son efficacité opérationnelle et à utiliser au mieux ses infrastructures.

Ces objectifs exigent l'amélioration des équipements électrotechniques et de leur efficacité. Ils nécessitent aussi la mise en œuvre de capacités améliorées du système d'information, fondé sur la collecte et la transmission de données sur le réseau de transport, mais aussi de données issues des acteurs avec lesquels le Gestionnaire du Réseau de Transport (GRT) est en interaction et qui vont lui permettre de piloter plus finement et de façon plus optimale l'équilibre général du réseau : producteurs de tous types, réseau de distribution, moyens de stockage, consommateurs de tous types

et autres réseaux de transport européens. Pour être correctement comprises et analysées, ces données doivent être parfaitement standardisées et partagées selon des règles claires.

Plus largement, le GRT va devoir faire appel, dans le cadre de sa recherche d'un équilibre optimal, à des services de stockage local, de production locale ou encore de mise en œuvre et de pilotage de son système d'information.

Cela nécessite par ailleurs la mise en œuvre de nouvelles structures d'agrégation d'information en lien avec les services (responsabilité d'équilibre) requis au niveau de la gestion des marchés.

IV.2. Au niveau du réseau de distribution

Le gestionnaire du réseau de distribution est le garant du raccordement au réseau du consommateur – ce dernier pouvant également être producteur. Il fait donc face à des variations de plus en plus intermittentes et localisées de l'offre et de la demande, variations sur lesquelles il n'a aujourd'hui quasiment aucune maîtrise. Afin d'optimiser son rendement, le gestionnaire du réseau de distribution doit élargir son rayon d'action et sa capacité d'analyse.

Les besoins du réseau de distribution pour intégrer un réseau véritablement intelligent sont donc nombreux, en particulier :

IV.2.1 Améliorer la conduite et l'exploitation du réseau

Tout au long du réseau de distribution français (1,2 million de kilomètres de câble), le gestionnaire du réseau doit être capable de collecter et de transmettre des données qui seront centralisées puis analysées. Pour gérer ces données et pouvoir s'en servir de façon optimale, le gestionnaire a aussi besoin de renforcer ses technologies de contrôle-commande pour être en mesure de prendre des décisions instantanées impliquant des millions d'adresses de communication différentes ainsi que des milliards d'unités de données collectées puis transmises par le réseau. Les logiciels devront embarquer des fonctions améliorées d'analyse d'incidents et de reprise automatique du service. Ces besoins doivent pouvoir être mobilisés pour gérer de façon locale le réseau qui peut être soumis ponctuellement à des pointes extrêmement localisées.

En cas d'incident, le gestionnaire du réseau doit être capable de faire de l'ilotage, c'est-à-dire d'isoler certaines zones afin d'éviter la propagation de l'incident. Plus largement, une meilleure conduite du réseau passe par de nouveaux moyens de supervision, de pilotage et de contrôle des infrastructures du réseau Basse Tension, au plus proche des consommateurs et jusqu'à leur compteur, sur lequel le gestionnaire est aujourd'hui quasiment aveugle : les pannes qui surviennent au delà d'un poste source ne sont pas détectées par ERDF, mais signalées par les consommateurs qui appellent pour l'en informer.

L'exploitation au quotidien d'un réseau de distribution intelligent suppose également le développement de capacités améliorées de communication avec le terrain, afin de piloter plus précisément les actions des agents et, ce faisant, d'améliorer la qualité de la fourniture et de diminuer la fréquence et la durée des interruptions de service.

IV.2.2. Optimiser et faciliter l'intégration des actifs du réseau

Afin d'optimiser la longévité et la disponibilité des différents équipements installés sur le réseau de distribution (gestion optimisée de ses actifs), le gestionnaire doit aussi développer ses capacités de prévision de défaillance et de détection de panne. Il doit enfin disposer d'outils plus efficaces de diagnostic de défaillance, tant à distance que sur le lieu de la panne.

Ces outils d'anticipation, de détection et d'analyse de panne reposeront également sur des moyens avancés de collecte et de transmission des données du réseau. Le gestionnaire du réseau de distribution doit également être capable d'incorporer et piloter tous les équipements actuels et futurs. L'intégration optimale de tous les types d'équipements amenés à être raccordés au réseau de distribution, en particulier des équipements de stockage et de production à base d'énergie renouvelables, passe par des standards ouverts.

V. Stockage distribué de l'électricité

Le caractère intermittent des moyens de production renouvelable nécessite la mise en œuvre de nouvelles ressources permettant un équilibrage de cette intermittence au niveau des systèmes énergétiques. Le stockage électrique, quoique complexe à réaliser, répond exactement à ces besoins. Pouvoir stocker l'électricité, c'est offrir la possibilité d'introduire de l'élasticité dans le flux tendu permanent, entre production et consommation, d'un réseau d'électricité. Le développement de capacités de stockage est un élément absolument nécessaire au développement d'un réseau intelligent, auquel il contribue de plusieurs manières : grâce à sa grande flexibilité et réactivité, le stockage permet de contribuer ponctuellement à l'équilibre du réseau et à sa stabilité, comme variable d'ajustement, notamment en pointe. C'est déjà la fonction principale des unités de production d'énergie hydroélectrique, mais ces capacités sont limitées par les stocks hydriques.

Ces capacités d'ajustement permettent également d'augmenter la fiabilité globale du réseau en régulant la fréquence du courant transmis. Des unités de stockage peuvent également être adossées aux centres de production fondés sur les énergies renouvelables et permettre de lisser l'intermittence de leur production en stockant de l'électricité lors de périodes de forte production pour la délivrer lors des périodes de pointe de consommation.

Des capacités de stockage peuvent également offrir – très ponctuellement – de précieuses solutions de secours en cas de risque de chute du réseau (*blackout*). Les solutions de stockage diffus doivent enfin permettre de favoriser l'autoconsommation, ce qui déchargerait les réseaux et limiterait les pertes dues au transport de l'électricité.

Les solutions de stockage de masse demeurent encore limitées. Le stockage diffus et décentralisé constitue une piste d'amélioration mais il faudra pouvoir l'intégrer au réseau et le piloter de façon globale avec les outils adéquats.

Pour pouvoir servir un réseau électrique intelligent, ces capacités de stockage requièrent donc des technologies fiables et économiquement accessibles, ainsi qu'une intégration optimale dans le réseau de distribution optimale, tant du point de vue des flux bidirectionnels d'électricité que des flux de données qui permettront de les piloter.

Le déploiement significatif des véhicules électriques permettra par ailleurs d'améliorer les technologies de stockage électrique à base de batteries tant en termes de durabilité que de coût, ce qui conduit à considérer de nouveaux usages de batteries connectées aux réseaux, soit directement dans les postes électriques, soit au niveau des centrales renouvelables ou de grands centres de consommation. Pour être exploités, ces moyens de stockage fortement distribués doivent être intégrés aux centres de contrôle.

Par ailleurs, d'autres moyens de stockage sont en phase d'émergence : dans les centrales de production, on utilise l'air comprimé ou le stockage thermique, alors que les volants à inertie sont pour l'instant réservés à des usages spécifiques.

Chapitre III : Enjeux socio-économiques des réseaux électriques intelligents

I. Le paradoxe des engagements pour le Smart Grid

I.1. Une attention accrue à l'environnement

Le souci d'un développement durable s'ancre progressivement dans la société. En 2009, l'environnement et la pollution sont classés sixième parmi les sujets de préoccupation, devant le financement de l'assurance maladie ou encore la sécurité des biens et des personnes. Des manifestations se multiplient dans le monde pour appeler à réduire l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

I.2. Assurer le « mix énergétique »

L'Union européenne joue depuis plusieurs années un rôle de leader international dans la lutte contre le changement climatique. Elle a agréé le protocole de Kyoto en 2002 et mis en place un marché européen du carbone en 2005. Elle a misé avant les autres grandes puissances sur le développement des énergies renouvelables pour réduire les émissions des gaz à effet de serre.

En 2007, le Conseil européen établit les objectifs « triple 20 ». Ces objectifs sont déclinés par pays en fonction de la situation de départ et du potentiel, notamment naturel. Dans le cadre des conférences sur le climat, des discussions sont d'ailleurs en cours au sein des instances européennes sur l'opportunité de fixer un objectif de 30 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui conduirait mécaniquement à une cible plus élevée pour les énergies renouvelables.

Ces ambitieux engagements sur le « mix énergétique » total ont un impact encore plus fort pour la production électrique, puisque l'énergie consommée dans les transports (essence, diesel) offre aujourd'hui encore peu d'alternatives renouvelables et économiquement viables.

En France, la production d'électricité à partir de sources renouvelables hors production hydraulique se développe rapidement. Principalement portée par celle de la production éolienne, elle atteint 15 TWh en 2010, soit 2,7 % de la production totale. Cela est presque le double de celle de 2009, elle-même en progression de 40 % par rapport à 2008. Le photovoltaïque réalise également une percée spectaculaire, avec environ 600 GWh en 2010, soit le triple de 2009.

I.3. Un double défi se présente alors au réseau : la dispersion et l'intermittence

Les sources d'électricité d'origine renouvelable représentent un nouveau modèle de production. Contrairement aux sources traditionnelles, elles sont en partie **dispersées** sur l'ensemble du territoire.

Intégrer ces sources dans le système électrique nécessitera d'abord que le réseau soit capable de relier ces nouvelles sources. Ceci implique une évolution des infrastructures, notamment pour accueillir la nouvelle production sur le réseau de distribution.

Les sources renouvelables telles que l'éolien sont marquées par une production **intermittente**. Elles dépendent directement des conditions météorologiques : ainsi la production d'énergie d'origine éolienne est localement dépendante de la vitesse du vent. Ce fait crée plusieurs difficultés. Tout d'abord l'intégration d'une source de production instable. Ensuite le risque d'une sous-production si le vent ne souffle pas quand on l'attend ou celui d'une surproduction dans le cas contraire. Le caractère intermittent de l'éolien peut créer des inadéquations extrêmes entre offre et demande d'électricité, et ce dans un temps très court, ce qui se traduit par une plus grande volatilité des prix.

L'exemple allemand fournit une illustration du phénomène. On observe une forte corrélation entre la production éolienne et le prix de l'énergie électrique. Une interruption de la production éolienne à

un moment de demande accrue peut entraîner un pic de prix maximal sur le marché de l'énergie. À l'inverse, des conditions météorologiques exceptionnelles entraînant une forte production éolienne en période de faible demande (la nuit par exemple), donc une surproduction globale, ont été à l'origine de l'apparition de prix négatifs (qu'autorise la loi allemande et qui ne sont pas autorisés en France).

L'intégration des renouvelables ouvre donc à la fois sur des défis techniques mais aussi sur des risques accrus de déséquilibre entre production et demande. Il existe un risque spécifique lié à la faible prévisibilité des changements de production des énergies renouvelables : les capacités d'ajustement doivent pouvoir être mobilisées dans des délais de l'ordre de la dizaine de minutes. Ce constat nécessite de mobiliser des capacités de production, de réserve (à l'échelle nationale ou européenne), mais aussi de mieux maîtriser la demande.

II. La tarification de l'électricité

II.1. Définition

Une tarification peut-être définie comme l'établissement d'un prix pour un bien/service (en conservant une marge) qui sera acquitté de façon égale par tous les consommateurs achetant ce bien dans les mêmes conditions. La fixation de ce prix est complexe et il existe de nombreux systèmes tarifaires dépendant, entre autres, de la typologie du marché (monopole, concurrence, etc.) et des principes « propres » au bien ou service à tarifier.

Dans le cas de l'électricité, les grands principes à prendre en compte, ayant prévalu lors de l'élaboration des tarifs dits « historiques » en France, sont :

- l'offre doit s'adapter instantanément à la demande (selon une logique d'appel des différentes sources de production électrique dans l'ordre des coûts marginaux croissants, dite logique de « merit order ») ;
- la demande d'électricité est aléatoire et soumise à des « effets de pointes » (niveaux de consommation élevés le matin et le soir) ;
- la consommation est saisonnière et le prix du MWh varie selon les saisons :
 - En été, la demande est moins forte et le MWh est peu cher, il est produit à partir du nucléaire et de l'hydraulique ;
 - En hiver, la demande est forte et très variable en cours de journée et le MWh est cher : la dernière centrale « appelée » doit pouvoir satisfaire rapidement la demande. Ces centrales capables de répondre à cette contrainte utilisent des combustibles fossiles (thermique à flamme : gaz, fioul ou charbon) dont le coût est plus élevé.

La tarification de l'électricité varie selon les types de contrats proposés par les différents opérateurs (EDF, Engie, Direct Energie, etc.).

II.2. Fondements théoriques

Le système historique de tarification de l'électricité mis en place par l'État en France au milieu du XX^e siècle s'est construit avec une entreprise publique intégrée (production, transport et distribution), EDF, en tenant compte de deux réflexions :

- la tarification doit intégrer les coûts réels de production, de transport et de distribution de l'électricité ;
- elle doit envoyer un « signal prix » au consommateur final qui reflète aussi fidèlement que possible le coût subi par l'opérateur à un moment précis pour satisfaire la demande.

La tarification de l'électricité doit alors absorber les coûts fixes et variables engendrés par la demande. A ce titre, EDF met en place une tarification dite binôme.

II.3. Tarification binôme (non linéaire)

La tarification au coût marginal correspond au coût de production du dernier kWh produit. En principe, calculée sur le long terme, elle permet d'assurer l'optimum économique, c'est-à-dire le prix minimum qui rémunère justement le producteur et comprend le financement de ses investissements. A ces coûts marginaux de production s'ajoutent les coûts de transport et de distribution qui s'additionnent dans le tarif du consommateur final.

Pour les consommateurs industriels qui s'approvisionnent en très haute tension au bord des centrales, les coûts marginaux évoqués ci-dessus forment la totalité du coût. Seuls les coûts de transport en très haute tension (en général uniformisés) s'ajoutent à ces coûts marginaux pour fixer les prix de revente de l'électricité sur le marché « de gros ».

La tarification au coût marginal est utilisée par l'entreprise EDF lorsqu'elle est chargée du service public de l'électricité en quasi monopole à partir de 1946. Elle offre l'avantage de donner une base objective de référence pour fixer le prix à des consommateurs qui ne peuvent alors pas s'adresser à d'autres fournisseurs.

Les coûts marginaux variant au long de l'année et de la journée, EDF a recours à une tarification binôme qui revient à faire payer à l'utilisateur un prix selon deux éléments :

- une part fixe proportionnelle à la puissance souscrite, appelée abonnement, censée couvrir le coût d'investissement et le coût de maintien en état de démarrage des centrales ;
- une part variable proportionnelle à la quantité de kWh consommée (très proche de la tarification au coût marginal).

Ces tarifications se complexifient pour tenir compte des situations différentes entre le jour et la nuit et entre les périodes de faible consommation (été) et de forte demande (hiver).

II.4. Catégories de tarifs

II.4.1. Les tarifs historiques

Avant l'ouverture à la concurrence, il n'existait qu'une seule catégorie de tarif : les Tarifs Réglementés de Vente (TRV) d'EDF. Ceux-ci se distinguent par une couleur en fonction du niveau de puissance souscrit :

- **le tarif Bleu** : puissance souscrite de 3 à 36 kVA, prime fixe et un ou plusieurs prix du kWh consommé selon les options ;
- **le tarif Jaune** : puissance souscrite de 36 à 250 KVA, livraison en basse tension, après paiement d'un forfait représentant une partie de l'investissement du poste de transformation. Le tarif Jaune prenait en compte 2 saisons (été, hiver), des heures pleines et des heures creuses, soit 4 prix différents du kWh ;
- **le tarif Vert** : puissance souscrite supérieure à 250 kVA, livraison en moyenne et haute tension par un poste privé appartenant à l'entreprise utilisatrice. Il distinguait 4 modes d'utilisation (très longue utilisation, longue utilisation, tarif général et courte utilisation) et 5 périodes tarifaires.

II.5. Les tarifs actuels

Aujourd'hui, le consommateur a le choix entre deux catégories d'offres de prix : les tarifs réglementés de vente, proposés uniquement par le fournisseur historique (EDF) et les fournisseurs

historiques locaux (entreprises locales de distribution) et les offres de marché, proposées par l'ensemble des fournisseurs (historiques ou alternatifs).

II.5.1. Les tarifs réglementés

Ces tarifs sont définis par les ministères en charge de l'économie et de l'énergie, sur proposition de la CRE. La loi NOME du 7 décembre 2010 a mis fin aux tarifs Jaune et Vert pour les professionnels, cette suppression étant entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2016.

II.5.2. Les offres de marché

Les fournisseurs historiques et les fournisseurs alternatifs proposent des offres à prix de marché. Ils sont libres de fixer le prix, notamment en fonction de l'origine de l'électricité produite (nucléaire, renouvelables, etc.). Pour concurrencer les tarifs réglementés peu élevés, certaines offres à prix de marché garantissent une stabilité des prix pendant la durée du contrat (résiliation possible, prix inférieur au TRV).

Au début de l'ouverture à la concurrence, le prix de marché s'avère avantageux. Mais celui-ci croît fortement avec la crise pétrolière et la perte d'une situation de surcapacité. Un Tarif Réglementé Transitoire d'Ajustement de Marché (TarRTAM) est mis en place en juin 2007. Il permet alors aux entreprises éligibles ayant souscrit une offre de marché de revenir à un tarif réglementé éventuellement plus avantageux. Prolongé à plusieurs reprises, ce tarif prend fin avec l'entrée en vigueur de la loi NOME en juillet 2011 et la mise en place du dispositif d'accès régulé à l'électricité nucléaire historique (ARENH) pour les fournisseurs concurrents d'EDF.

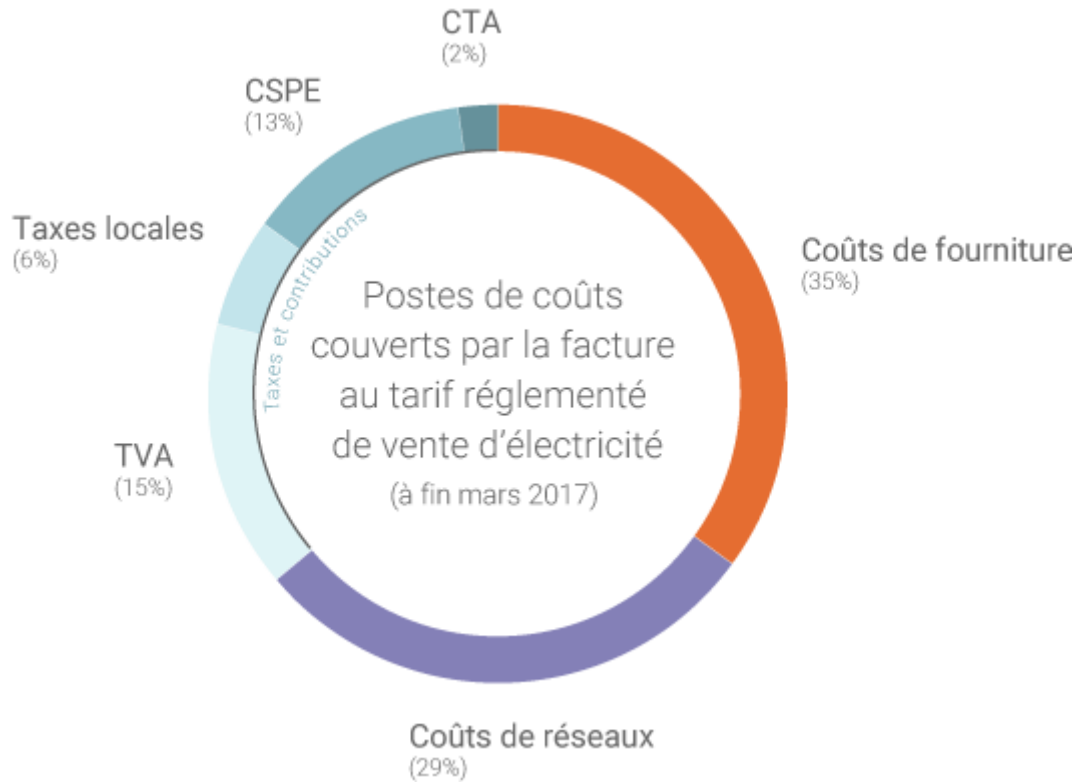
Les particuliers ont aujourd'hui le choix entre les tarifs réglementés d'EDF et des offres de marché. A fin mars 2017, 84,8% des 32,2 millions de sites résidentiels consommant de l'électricité en France étaient encore soumis aux tarifs réglementés, malgré l'existence d'offres de marchés plus compétitives.

II.6. Composantes de la tarification

Trois grandes composantes entrent en compte dans les différentes tarifications de l'électricité :

- une part liée au « tarif de l'énergie » relatif à la fourniture de l'électricité, qui couvre le coût de production (investissement et charges de fonctionnement : combustible, personnel, etc.), les coûts de commercialisation des fournisseurs d'électricité (publicité, marketing, gestion clientèle) et les coûts de d'approvisionnement (achat d'électricité sur la marché de gros de l'électricité) ;
- une part relative aux coûts d'acheminement de l'électricité par les réseaux publics de transport et de distribution, regroupée au sein du TURPE (Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Electricité). Il couvre les coûts d'exploitation, de maintenance et de développement. Ce tarif est calculé par la CRE. Cette composante est plus importante pour un consommateur résidentiel que pour une grande entreprise (qui n'utilise que le réseau de transport) ;
- une composante relative aux taxes et contributions : les Taxes locales sur la Consommation Finale d'Electricité (TCFE) qui dépendent du lieu d'habitation, au bénéfice des collectivités locales (commune et département), la Contribution Tarifaire d'Acheminement (CTA) qui finance les retraites des employés des industries électrique et gazière, la Contribution pour le Service Public d'Electricité (CSPE) qui couvre les charges relatives aux missions de service

public de l'électricité, et la TVA (taux de 5,5% sur l'abonnement et de 20% sur la consommation).



Répartition moyenne des coûts pour un particulier au tarif bleu réglementé d'EDF
(©Connaissance des Énergies, d'après CRE)

III. La normalisation internationale et les réseaux électriques intelligents

La normalisation est essentielle si la résolution de l'équation entre l'atteinte de l'optimum économique du marché, la mise en réseau de l'ensemble du système électrique et la sécurité juridique des investissements est un objectif prioritaire pour les Pouvoirs publics et les acteurs de la filière électrique.

Les actions prioritaires en matière de normalisation sont déjà fortement engagées au sein de la Commission Electrotechnique Internationale (IEC) qui doit rester le lieu principal d'élaboration des normes afin de ne pas générer des initiatives redondantes voire contreproductives.

Parmi les actions prioritaires en matière de normalisation à l'IEC figurent notamment :

- Accélérer les processus déjà engagés,
- Harmoniser les mesures d'énergie ainsi que leur contrôle selon des règles opposables,
- Accroître la coopération avec les nouvelles technologies de l'information,
- Formaliser des règles de protection et de confidentialité des données personnelles.

IV. Les modifications réglementaires et les incitations

pour développer les réseaux électriques intelligents en France

Le Gimélec (Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés) propose qu'un certain nombre de mesures puissent être mises en œuvre par les Pouvoirs publics français pour assurer un développement réussi des réseaux électriques intelligents.

Ces propositions sont classées par ordre hiérarchique décroissant en termes d'urgence d'actions pour le succès de la filière électrique industrielle dans la conquête de ces nouveaux marchés à l'international.

IV.1. Proposition majeure pour un marché domestique exemplaire

Proposition 1

1.1. Lancer rapidement plusieurs démonstrateurs à l'échelle d'une ou plusieurs régions pour les réseaux électriques intelligents du futur dans le cadre du programme des Dépenses d'Avenir, à condition d'être coordonnés entre eux	<i>Indication</i>
1.2. Structurer un fonds d'amorçage dédié aux réseaux électriques intelligents pour l'assurance d'une action à long terme et par un fléchage de taxes existantes pour la constitution des fonds propres	<i>Incitation</i>

IV.2. Mesures réglementaires pour la structuration du nouveau marché de l'électricité

Proposition 2

2.1. Généraliser la régionalisation de la gestion des réseaux électriques intelligents après l'évaluation du démonstrateur en termes de mutation de modèle économique	<i>Réglementation</i>
2.2. Accroître la transparence de gestion du TURPE (Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Électricité) en termes d'accès aux financements réservés à la promotion de l'innovation par les industriels de la filière	<i>Réglementation</i>

Proposition 3

Lancer la concertation autour des projets de décrets et d'arrêtés à prendre en application du projet de loi NOME (Nouvelle Organisation des Marchés de l'Electricité) en cours d'adoption en profitant de la plateforme du COSEI (Comité stratégique de filière des éco-industries).	<i>Réglementation</i>
--	-----------------------

Proposition 4

Etablir un tarif d'autoconsommation de l'électricité produite par des énergies renouvelables et durables	Réglementation
--	----------------

IV.3. Propositions en faveur du « consom'acteur » pour assurer des débouchés aux nouvelles technologies de l'énergie**Proposition 5**

Organiser la fongibilité des certificats d'économies d'énergies en « certificats carbone » pour générer les fondations d'un marché réel et assurer ainsi la liaison avec le marché européen des certificats carbone	Réglementation Indication
---	------------------------------

Proposition 6

Conditionner les aides fiscales « économies d'énergies » pour les clients domestiques à des offres garantissant des résultats réels en termes d'économies d'énergies et de réduction d'émission de CO2	Réglementation Indication
--	------------------------------

Proposition 7

Adopter une réglementation spécifique pour la protection des données personnelles du « consom'acteur »	Réglementation
--	----------------

IV.4. Propositions transversales en faveur d'une fiscalité environnementale durable**Proposition 8**

Créer un Conseil National de l'Energie Durable composé des associations de consommateurs, des syndicats patronaux et salariés, et de l'Etat	Réglementation
---	----------------

Proposition 9

Réformer la RT (Réglementation Thermique des bâtiments) en R3E (Réglementation Efficacité Energétique et Environnementale) afin d'acter de l'interdépendance entre les réseaux et les bâtiments, et migrer vers la culture du résultat par une approche systématique englobant tous les vecteurs énergétiques	Réglementation Indication
---	------------------------------

Proposition 10

Mobiliser les acteurs institutionnels européens pour relancer le débat sur une Contribution Climat Energie aux frontières de l'Union Européenne	Réglementation
---	----------------

Les membres les plus importants du Gimélec

- [ABB](#) France : 135 000 salariés dans le monde dont 2 000 en France
- [Alstom](#) : 93 000 salariés dans le monde
- [Johnson Controls](#) : 162 000 salariés dans le monde
- [Legrand](#) : 33 000 salariés dans le monde dont 6 500 en France
- [Schneider Electric](#) : 160 000 salariés dans le monde
- [Siemens](#) : 405 000 salariés dans le monde (2010) dont 7 000 en France

Chapitre IV : Perspectives et enjeux des énergies renouvelables

Introduction

Avant de définir ce qu'est une **énergie renouvelable**, il est essentiel de faire le point sur les utilisations énergétiques et les principales énergies utilisées par l'homme.

La société actuelle est une grande consommatrice d'énergie. On distingue trois besoins principaux :

- **L'électricité** : L'électricité est une source d'énergie très utilisée dans la vie quotidienne, que ce soit au niveau industriel ou d'un point de vue domestique. Cependant, pour produire cette électricité, nous avons besoin de transformer d'autres sources d'énergie. Les principales sources d'énergie utilisées pour produire de l'électricité sont les énergies fossiles (centrales thermiques), l'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, etc.
- **La mobilité** : En effet, nos moyens de locomotion (voiture, train, avion) sont très gourmands en énergie. A l'heure actuelle, la principale source d'énergie utilisée pour se déplacer provient des énergies fossiles et des produits dérivés du pétrole.
- **Le chauffage** : Dans de nombreux pays tempérés, le chauffage est essentiel pour assurer un confort minimum, voire la survie, durant les périodes hivernales. Il existe plusieurs types de chauffage : électrique, au gaz, au bois, au fioul, etc.

Les **besoins énergétiques** des humains sont en augmentation constante, or certaines **ressources énergétiques** sont limitées ou polluantes à différentes échelles. Que ferons-nous lorsque nous ne pourrons plus produire de l'énergie ou lutter contre les effets nocifs ? Cependant, il existe des énergies naturelles illimitées et non polluantes : ce sont les **énergies renouvelables**.

Nous allons présenter les différents types d'énergies.

L'**énergie nucléaire** utilise la radioactivité de certains éléments tels que l'uranium pour produire de l'énergie. Cette technique n'a besoin que de très peu de matières premières pour produire une grande quantité d'énergie. Les réserves ne sont donc pas menacées. Par contre, elle présente un risque environnemental important, car l'énergie nucléaire est également productrice de nombreux déchets radioactifs, extrêmement nocifs.

Le **pétrole** fait partie des **énergies fossiles non renouvelables**. Les **énergies fossiles** ont été formées à partir des résidus organiques de plantes et d'animaux préhistoriques.

Le **charbon** fait partie des énergies fossiles.

Le **gaz naturel** fait partie des énergies fossiles.

Le **bois** pourrait être considéré comme une source d'**énergie naturelle renouvelable**. Cependant, si la consommation dépasse la production, les réserves diminuent. Le bois étant aussi utilisé pour d'autres domaines tels que la menuiserie et les forêts étant essentielles pour l'équilibre environnemental de la planète, **le bois n'est pas considéré comme une énergie renouvelable**.

L'**eau** est également par principe une énergie renouvelable. Cependant, le bilan actuel sur l'eau est plutôt négatif, car c'est un élément essentiel pour la vie de tout organisme. De nos jours, nous avons déjà de nombreuses stations d'épuration pour garantir des réserves d'eau potable suffisantes.

Le **soleil** est une source d'énergie renouvelable car inépuisable, le panneau solaire est une solution connue et devient très utilisés.

Le **vent** est aussi une énergie renouvelable. L'éolienne ou la petite éolienne pour les jardins sont peu à peu utilisés, mais assez lentement.

Les **marées** : la force des marées crée de l'énergie renouvelable.

La **géothermie** est une énergie thermique produite par le noyau terrestre. Les geysers en sont des exemples naturels.

La **biomasse** est une énergie renouvelable directement produite par de la matière végétale.

Parmi les avantages de l'exploitation de l'énergie renouvelable, on peut citer :

- l'augmentation de la production d'électricité,
- la création d'emploi dans ce secteur,
- la protection et la conservation de l'environnement, (gestion des émissions de gaz à effet de serre et des changements climatiques),
- plus économique,
- des ressources inépuisables.

I. La diversité des ressources renouvelables

Les énergies renouvelables comprennent un ensemble de filières qui ont certes un point commun – ce sont des énergies de flux et non pas des énergies de stock à l'échelle humaine – mais ces filières se différencient à de nombreux égards, ce qui ne facilite pas leur prise en compte dans une approche globale. Elles se différencient par le type de vecteur énergétique qu'elles produisent (électricité, chaleur, combustible ou carburant), par le caractère plus ou moins modulaire des équipements qu'elles mobilisent (de la maison individuelle au grand barrage hydroélectrique), par leur degré de maturité technico-économique (du bois combustible traditionnel aux nouvelles couches minces photovoltaïques), par l'importance des interactions qu'elles entretiennent avec d'autres secteurs de l'activité humaine (agriculture, eaux et forêts, logement, déchets, etc.) et par la nature des contraintes environnementales qu'elles génèrent (faune aquatique, paysage, etc.).

Seuls l'hydroélectricité et le bois-énergie pèsent lourdement aujourd'hui dans les bilans énergétiques. D'autres filières émergent d'une manière significative (éolien, solaire, biocarburants). D'autres, enfin, sont au stade de la recherche ou de la réalisation de pilotes (géothermie des roches profondes sèches, nouvelles couches minces photovoltaïques, etc.).

II. Particularité des énergies renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables, en dehors de la géothermie, sont issues de l'activité solaire à travers divers processus. Elles s'inscrivent dans des cycles naturels et sont de ce fait généralement moins agressives pour la santé et l'environnement que les sources fossiles ou nucléaires. Elles sont très souvent mises en avant par des promoteurs trop zélés comme une solution alternative lorsqu'un pays adopte un moratoire sur l'énergie nucléaire, alors qu'en général, elles ne couvrent pas le même type de demande. Cette dernière attitude leur a valu en retour une hostilité de principe injustifiée de la part de certains décideurs, tout particulièrement en France.

Les sources d'énergies renouvelables ont en général un coût plus élevé que les énergies traditionnelles. Ce handicap est accentué par le fait que les coûts environnementaux des sources fossiles, notamment ceux liés au changement climatique, ne sont pas internalisés. C'est le cas également du nucléaire qui bénéficie souvent de moyens budgétaires et de garanties de l'état qui

n'apparaissent pas dans les coûts directs. L'internalisation de ces coûts des filières traditionnelles ne serait toutefois pas suffisante pour rendre compétitives aujourd'hui toutes les filières renouvelables.

La question qui se pose alors est de savoir s'il est judicieux de leur faire parcourir une courbe d'apprentissage, comment et à quel coût ? Leur qualité d'énergie de flux, leurs impacts environnementaux modérés et maîtrisables, leur adéquation pour répondre à une demande dispersée ainsi que la nécessité de prendre des assurances face à un avenir énergétique assez incertain justifient des prises de décisions visant à accélérer le parcours d'une courbe d'apprentissage pour abaisser les prix. À côté de l'effort de recherche, l'ouverture de certains marchés est nécessaire dans cette perspective. Pour y parvenir, la problématique retenue consiste à laisser jouer la concurrence entre les promoteurs d'une filière renouvelable mais de ne pas la mettre en compétition directe dans une phase initiale avec les sources d'énergies traditionnelles.

II.1. La situation européenne

L'Union européenne a été, depuis le premier choc pétrolier, un moteur important de la prise en compte des énergies renouvelables et de la maîtrise de la demande dans les bilans énergétiques des états membres. Plusieurs états font preuve d'un réel dynamisme en matière d'ouverture des marchés aux énergies renouvelables et de promotion industrielle associée. L'Allemagne, par exemple, a installé 2645 MW d'éolien en 2003 (100 MW en France) et 120 MW de solaire photovoltaïque (4,5 MW en France).

L'adoption de la directive du 27 septembre 2001 relative à la promotion d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables est la décision la plus déterminante prise jusqu'ici pour donner du contenu aux ambitions affichées dans un livre blanc approuvé en 1998 (12 % d'énergies renouvelables en 2010 contre 5,5 % en 1995). La valeur de référence pour la France est de 21 % d'électricité renouvelable en 2010 contre 15 % en 1997, grande hydraulique comprise.

Si les sources d'énergies renouvelables productrices de chaleur ne disposent d'aucun texte de référence majeur pour les promouvoir, les différents textes de la Commission européenne sur l'énergie et l'environnement font une large place aux biocarburants qui, jusqu'à une époque récente, étaient essentiellement perçus comme une composante de la politique agricole commune en réponse aux mesures de gel des terres. Les objectifs affichés pour 2010 par la Commission permettraient de couvrir 5 à 6 % de la consommation de carburants en Europe contre moins de 0,5 % actuellement.

II.2. Des incitations récentes en France

Les sources d'énergies renouvelables ont bénéficié depuis 1998 de plusieurs dispositions nouvelles favorables à leur développement après une décennie de mise à l'écart due notamment à l'ampleur d'un programme électronucléaire non affecté par les préoccupations nouvelles liées aux émissions de CO₂.

La loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité a été élaborée pour assurer la transposition en droit français de la directive de 1996 sur l'ouverture à la concurrence du secteur électrique. Elle n'a certes pas été conçue pour promouvoir les sources d'énergies renouvelables en France, mais elle a abordé le sujet puisqu'il fallait bien tenir compte des situations existantes, concernant par exemple la petite hydraulique ou les premières fermes éoliennes retenues dans les appels d'offres d'Eole 2005.

La première modalité de soutien (article 10), réservée à des installations dont la puissance est inférieure à 12 MW, est une obligation d'achat sur la base d'un tarif fixé par arrêté pour chaque filière productrice d'électricité renouvelable, hors grande hydraulique. La seconde modalité de soutien (article 8), est une obligation d'achat de l'électricité produite par les installations retenues suite à un appel d'offres. Ces appels d'offres sont lancés lorsque les capacités de production ne répondent pas aux objectifs de la programmation pluriannuelle des investissements définis par un arrêté ministériel (article 6). Cette modalité est obligatoire pour les installations d'une puissance supérieure à 12 MW.

III. Exploitation des énergies renouvelables

Précédée par un débat lancé par le gouvernement en mars 2003, un projet de loi d'orientation sur l'énergie a été soumis et sensiblement modifié par l'Assemblée nationale et le Sénat au second semestre 2004. Son adoption définitive devrait avoir lieu dans les mois à venir. La maîtrise de la demande d'énergie et la promotion des sources renouvelables, du fait de leur communauté d'intérêt avec l'énergie nucléaire en termes de prévention des émissions de CO₂, font l'objet de propositions favorables à la promotion de la chaleur renouvelable et des biocarburants. Toutefois, les industriels rassemblés au sein du Syndicat des énergies renouvelables n'y retrouvent pas certaines de leurs demandes prioritaires (abandon du plafond de 12 MW pour l'application des tarifs d'achat de l'électricité éolienne, mesures spécifiques en faveur du solaire photovoltaïque, par exemple). Ils sont en outre très inquiets quant à la portée que pourraient avoir d'ultimes arbitrages défavorables au moment de l'adoption définitive d'un texte dont la justification majeure aux yeux de certains décideurs est de légitimer un nouvel engagement nucléaire du pays.

Parmi les mesures proposées concernant les sources renouvelables, le projet de loi fait état :

- d'objectifs 2010 (plus 6 % d'électricité renouvelable, plus 50 % de chaleur renouvelable, plus 4 à 5 % de biocarburants mais aussi d'un plan Face-Sud spécifique au solaire thermique et photovoltaïque particulièrement bienvenu)
- de la mise en place d'un crédit d'impôt de 40 % sur le revenu des personnes physiques portant sur les équipements d'énergies renouvelables destinés aux habitations principales avec un plafond de 16 000 euros par ménage d'ici à 2009 (plafond englobant d'autres équipements énergétiques performants)
- de diverses mesures à inscrire dans les codes de l'urbanisme et de la construction, mesures visant à permettre aux autorités locales de promouvoir plus facilement les sources renouvelables dans les PLU ou à rendre obligatoire l'étude d'options renouvelables avant l'attribution de permis de construire pour des bâtiments d'une certaine importance sans imposer pour autant leur mise en œuvre.

Une contribution raisonnable des sources renouvelables à la couverture d'une partie de la demande énergétique française et européenne est souhaitable. La compétitivité économique des sources renouvelables ne permet pas encore aujourd'hui d'assurer leur développement sans intervention des pouvoirs publics ou des instances de régulation. L'adoption d'un texte fondateur comme la loi d'orientation évoquée ci-dessus donnerait du contenu à une volonté de diversification souvent affirmée et jusqu'ici beaucoup moins souvent promue.

CHAP V : LES RÉSEAUX INTELLIGENTS : GRANDES CARACTÉRISTIQUES

I. Introduction

La notion de réseau intelligent (*smart grid*) désigne les futurs réseaux électriques. Le terme est un peu exagéré, puisque le réseau actuel – en particulier de transport – est déjà doté de technologies et d'outils de gestion sophistiqués.

Le concept de réseaux intelligents ne recouvre pas encore aujourd'hui une réalité précise mais plutôt l'émergence d'un nouveau modèle de système électrique. Au lieu d'ajuster la production électrique maîtrisée à une consommation « fixe », il s'agit d'ajuster en temps réel à la fois l'offre et la demande dans l'ensemble du réseau, y compris le réseau de distribution, en impliquant les consommateurs pour répondre à une production plus respectueuse de l'environnement mais moins maîtrisable et en utilisant éventuellement des sources de stockage. Nous aborderons ci-dessous les évolutions attendues du réseau, notamment à travers des exemples internationaux.

II. Les trois innovations du *smart grid*

II.1. Adapter la demande pour plus d'efficacité

Les actions sur la demande électrique peuvent être menées de deux façons : la réduction de la demande ou son décalage dans le temps.

II.1.1. L'amélioration de l'efficacité énergétique

Pour améliorer l'efficacité énergétique, il existe trois leviers majeurs : l'installation de dispositifs de contrôle automatiques, l'information des consommateurs, les normes de consommation des appareils et d'isolation des bâtiments.

Les dispositifs de contrôle, comme les détecteurs de mouvement reliés à l'interrupteur, permettent d'automatiser certains des gestes utiles et parfois oubliés comme le fait d'éteindre la lumière en quittant une pièce. La sensibilisation des consommateurs et, au-delà, le fait de fournir une information plus fine sur la consommation et son coût, comme le permet la partie « Home » des réseaux intelligents s'adressant aux consommateurs contribue à la prise de conscience et à la généralisation des réflexes d'économie. L'acceptabilité des automatismes s'améliore d'ailleurs quand ils facilitent et augmentent le pilotage de la maison lors des moments de présence des membres du foyer, et qu'ils diminuent les gaspillages pendant les temps d'absence. Les standards de consommation des appareils et d'isolation des bâtiments permettent quant à eux d'agir à la racine, en réduisant de manière drastique l'énergie consommée par les appareils lors de leur fonctionnement ou en mode veille ou la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir la température d'un bâtiment.

Une étude publiée par le McKinsey Global Institute montre que le taux de rendement dans des investissements permettant d'améliorer l'efficacité énergétique avoisine en moyenne 17 %. Cependant de nombreux blocages existent, ainsi que des inefficacités de marché.

Par exemple, pour beaucoup de petites et moyennes entreprises (PME), un surcoût d'investissement peut représenter une charge trop lourde dans un environnement concurrentiel, même si elle est rentable en 5 ou 10 ans. De même, dans les relations entre le locataire et le propriétaire d'un logement, le propriétaire qui effectue l'investissement en efficacité énergétique n'est pas celui qui va en bénéficier par une réduction de sa consommation future.

Afin de corriger de telles inefficacités de marché, les dispositifs réglementaires tels que ceux définis à l'issue du Grenelle de l'Environnement ont bien sûr un rôle majeur à jouer, notamment par des incitations fiscales. Les réseaux électriques peuvent et doivent aussi apporter leur contribution en permettant une mesure plus fine de la consommation pour informer les utilisateurs et pour permettre aussi de valoriser les économies d'énergie.

II.1.2. Le décalage dans le temps d'usages électriques

Ainsi qu'évoqué dans la première partie, les pointes de consommation sont pour le système électrique une source majeure de surcoûts, de risques de défaillance et d'émissions de gaz à effet de serre. Pour les réduire, il faut pouvoir décaler dans le temps des consommations susceptibles de l'être (comme, par exemple, le lancement d'une machine à laver). Ces usages sont alors reportés à des moments où la demande est moins forte, permettant une diminution de la pointe électrique.

De nombreuses solutions techniques sont déjà disponibles pour tous les usages liés à la température. Il est par exemple possible de moins chauffer une pièce lors des périodes de pointe en l'ayant davantage chauffée lors de la période creuse précédente, par le déclenchement de chauffage à distance avant de quitter son lieu de travail. De la même manière, il est possible grâce à l'inertie thermique de maintenir une température acceptable dans un réfrigérateur ou dans un congélateur avec des microcoupures de quelques minutes, qui répliquées à grande échelle et de manière coordonnée peuvent soulager les réseaux. La Floride présente une illustration de ce mécanisme pour la climatisation, avec un parc de 8 000 climatiseurs pilotés à distance de manière fine.

Les réseaux intelligents ont un rôle clé à jouer pour permettre le déploiement à grande échelle de telles solutions techniques et pour coordonner leur mise en œuvre.

Une initiative innovante en Floride

Guld Power, filiale de Southern Company, gère un programme d'efficacité énergétique depuis les années 1990, connu aujourd'hui sous le nom d'Energy Select. Huit mille foyers y ont souscrit en payant un forfait de cinq dollars par mois. Ils bénéficient alors d'un tarif moyen préférentiel (8 cents par kWh) sauf pendant les heures de pointe où le prix de l'énergie est quatre fois supérieur. Un système de commande est mis à leur disposition et contrôle à distance la climatisation, le chauffage, le chauffe-eau et la pompe de la piscine. Gulf Power estime la baisse moyenne par consommateur à 2 kWh et jusqu'à 50 % de réduction sur la demande électrique durant les heures de pointe. De leur côté, les consommateurs ont pu bénéficier d'une réduction de 15 % de leur facture en moyenne.

II.2. Augmenter les transferts d'informations grâce aux NTIC

La transformation des réseaux actuels en réseaux intelligents entraînera une très forte augmentation des flux d'informations à collecter, à enregistrer, à traiter. Dans le modèle traditionnel, la quantité d'informations échangées entre les réseaux et les sites de consommation reste faible pour deux raisons : d'une part, la fréquence de remontée des informations est peu élevée car coûteuse, puisqu'elle s'effectue essentiellement via un relevé manuel du compteur ; d'autre part, l'information recueillie est agrégée, puisque le compteur affiche de manière cumulative l'énergie électrique consommée. Ainsi, les acteurs disposent d'une très faible visibilité sur la consommation réelle.

La gestion dynamique de la demande exige au contraire une telle connaissance. Cela entraînera une multiplication exponentielle des données, de quelques points de mesure par an et par site de

consommation à une fréquence du quart d'heure, voire de la minute. Les échanges devront être automatisés. Au-delà de la consommation, une transmission en temps réel se fera tout à la fois sur l'état des réseaux, sur la mise à jour des prévisions météorologiques, sur l'influence de ces dernières quant à la production intermittente.

Avec plus d'informations, plus d'acteurs, plus de complexité, l'avènement des réseaux intelligents s'appuiera de manière intensive sur les technologies de l'information et de la communication (TIC) et sur le développement de nouveaux outils de recueil, de stockage, de transmission et d'analyse. Il n'est donc pas surprenant de voir les grands acteurs des TIC se lancer dans l'industrie des réseaux intelligents.

II.3. Sortir du cadre national

Aujourd'hui, les réseaux s'arrêtent à l'entrée des sites de consommation. Au-delà du compteur électrique, ils ne disposent d'aucune visibilité ni de moyen d'action sur l'usage des différents équipements (chauffage, chauffe-eau, réfrigérateur, etc.). Dans le nouveau modèle, la gestion de la demande nécessitera de réellement interagir avec le réseau domiciliaire pour connaître la consommation en temps réel de l'habitation, pour proposer, voire actionner, des solutions de réduction ou de décalage dans le temps.

En amont, la part croissante des sources intermittentes nécessitera d'aller au-delà des frontières nationales. Pour trois raisons. Tout d'abord, certaines sources renouvelables abondantes se situent ou se situeront hors du territoire français (grands gisements éoliens offshore, solaire en Afrique du Nord). Ensuite, interconnecter les pays permet de lisser la demande, car les pointes ne se produisent pas toujours au même moment dans chaque pays. Un rapport de l'European Climate Foundation (ECF) montre ainsi qu'au niveau européen, les pointes de demande d'électricité se compensent partiellement. Ceci vient du fait que les rythmes de vie comme les modes de vie, donc les profils de consommation électrique, sont différents, avec une pointe vers 19 h en France contre 21 h en Espagne. Enfin, un même effet de lissage est obtenu quand on agrège les profils de production éolienne au niveau européen. La diversité des ressources renouvelables permet ainsi de profiter des conditions climatiques variées (12 couloirs venteux en Europe au lieu de 3 en France). Une plus grande coordination, et dans le transport et sur les marchés d'énergie, pourrait également permettre de partager les capacités de réserves, dont le besoin total pourrait être réduit de 40 %⁵³, ce qui éviterait les investissements redondants et peu rentables.

Ainsi un tel développement des réseaux, qui marque une rupture par rapport aux rythmes actuels d'investissement, nécessite que des financements *ad-hoc* soient mobilisés, mais également que le cadre institutionnel entourant le développement des infrastructures de réseau soit pris en compte pour mobiliser les investissements nécessaires.

III. Solutions techniques et architectures des systèmes d'information

III.1. Comptage, mesure et équipement de contrôle

III.1.1 Compteurs intelligents

Les entreprises du Gimélec développent des offres de compteurs communicants et des systèmes répondant aux besoins de tous les acteurs amenés à intervenir sur les réseaux intelligents :

- **Les opérateurs de réseau**

Ils pourront intégrer les informations de comptage intelligent en temps réel à leur centre de contrôle pour permettre une modélisation plus fine du réseau et de la demande, en lien avec les différents usages.

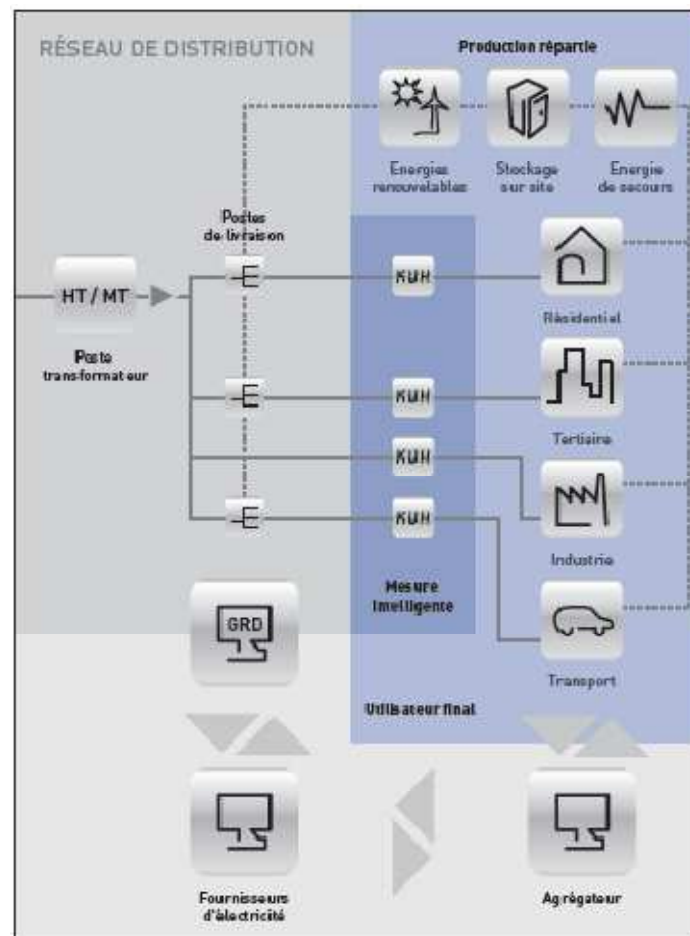
- **Les fournisseurs / agrégateurs**

Ils permettront un accès plus fréquent aux profils de consommation de leurs clients pour élaborer des offres de tarif et de service multiples.

- **Les consommateurs / consom'acteurs**

Ils pourront directement accéder à des informations concernant leur consommation.

Ils pourront, s'ils le souhaitent, connecter leur compteur avec le système de gestion énergétique et permettre un affichage déporté en temps réel des informations.



L'infrastructure passe par des moyens de communication et des concentrateurs de données associés à un système d'information capable de traiter et modéliser les données générées ainsi qu'à des technologies de contrôle-commande capables de piloter les compteurs.

Ces systèmes de comptage intelligents doivent en particulier être hautement sécurisés pour résister à des cyber-attaques et permettre une sécurisation de bout en bout des informations de comptage.

L'ensemble de ces technologies doit s'intégrer avec les dispositifs mis en place par les gestionnaires de réseau qui permettent de faire de la gestion de la charge et de l'optimisation globale du réseau. Il est enfin important de noter que les compteurs communicants ne se situent pas uniquement chez les consommateurs ; ils ont vocation à être placés à tous les niveaux du réseau.

III.1.2 Equipements de mesure et instrumentation : capteurs, actionneurs et équipements d'automatisme

Les capteurs de données physiques, qui embarquent de plus en plus d'électronique à des coûts compétitifs, permettent d'obtenir, en plus des données de comptage, des informations pertinentes nécessaires d'une part à une gestion optimale des flux dans les réseaux énergétiques et d'autre part à la protection de ces infrastructures. Associés à des actionneurs, les capteurs de courant et de tension, situés au pied de l'appareillage des postes électriques, sont des éléments critiques et de base de l'intelligence du réseau électrique.

Ces équipements mesurent, surveillent et recueillent les informations d'environnement là où ils ont installés. Ces données peuvent être de nature variée, selon les besoins d'analyse et de suivi de la qualité de l'onde électrique (phase, fréquence, tension, intensité, etc.). Ils permettent, en plus, d'analyser ces données, de les formater et de les enregistrer localement. Certaines de ces données sont transmises au niveau des centres de contrôle via des systèmes de télécommunication de diverses natures (optique, *wireless*, etc.) en utilisant différents types de protocoles dédiés.

Les entreprises (*du Gimélec*) fournissent des solutions de mesure, d'instrumentation complètes et d'automatisation répondant à tous ces besoins, depuis le capteur jusqu'aux systèmes d'information des clients qui opèrent sur la chaîne des réseaux intelligents, tant sur l'amont compteur (les infrastructures) que sur l'aval compteur (les usages). Elles proposent des dispositifs de cybersécurité permettant de protéger l'accès aux solutions de pilotage de ces infrastructures.

III.1.3 Equipements de stockage

Les équipements de stockage proposés par les entreprises *du Gimélec* sont principalement basés sur l'électrochimie Li-Ion. Cette technologie s'est dans un premier temps développée pour répondre aux deux extrêmes du spectre des attentes ; d'un côté, le stockage destiné à la grande consommation de faible capacité, faible coût et durée de vie réduite, essentiellement pour téléphonie mobile et petits équipements similaires et, de l'autre côté, le stockage très performant à cyclage fréquent, longue durée de vie et très faible série pour satellites civils et militaires. Cette technologie peut dorénavant être utilisée pour les applications de stockage au sein d'un réseau électrique.

Intégrés au réseau, des dispositifs de stockage décentralisés peuvent répondre aux besoins d'injection et de soutirage rapide et ainsi participer aux fonctions de service système au niveau national. Dans le cadre d'une gestion plus fine des équilibres locaux, ils peuvent aussi apporter la flexibilité nécessaire au réseau de distribution.

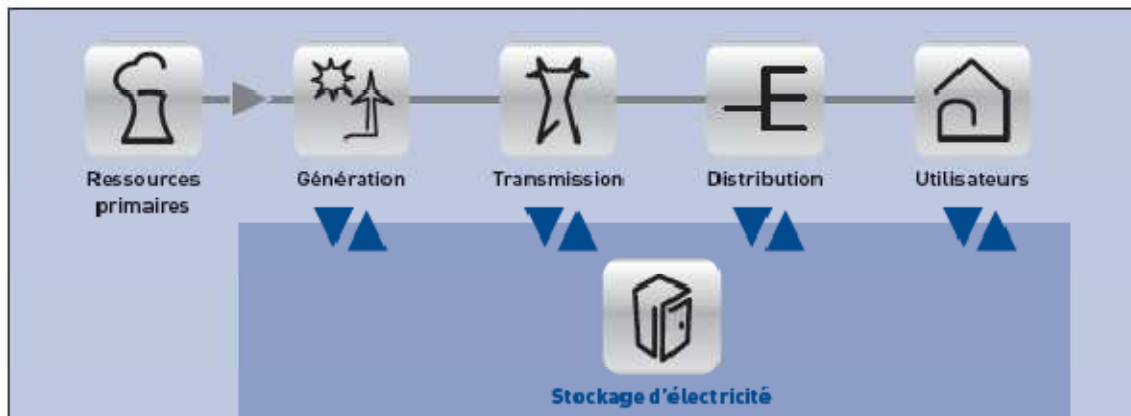
Couplés aux installations de production d'électricité renouvelable d'une certaine dimension, ces dispositifs décentralisés permettent d'améliorer la qualité et donc la valeur d'usage de l'électricité produite, notamment en minimisant l'écart entre le profil de l'énergie réellement produite et le profil d'une prévision communiquée préalablement au gestionnaire, en lissant la production pour en gommer l'intermittence (sur période comprise entre quelques secondes et quelques heures) et en déplaçant (de quelques heures) l'injection de la période de production vers la période de pointe de consommation.

Le panachage de ces différentes fonctions, au bénéfice du réseau comme de l'installation de production, est d'ailleurs le modèle d'affaire envisagé et testé à ce jour.

À l'extrémité de la ligne, les équipements de stockage « diffus », situés en proximité immédiate des producteurs domestiques et de capacité réduite, permettent d'assurer l'autoconsommation de ces utilisateurs, autoconsommation génératrice d'économies pour la collectivité (réduction du tarif de rachat), pour le client (facture d'électricité réduite) et pour l'opérateur de réseau (moindre besoin d'adaptation du réseau aux exigences des ENR).

Enfin, ces installations diffuses peuvent aussi être placées sous le contrôle et la commande d'un opérateur de réseau dans le cadre d'un contrat adapté. L'opérateur dispose ainsi d'un « nuage d'énergie » (*cloud storage*) qui lui donne la possibilité d'insérer aux tranches horaires désirées une énergie répartie.

Il est à noter que d'autres technologies de stockage éprouvées sont à la disposition des opérateurs. Ces dernières couvrent plutôt les besoins de stockage massif et sont en dehors du champ couvert par le Gimélec : Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) ou encore *Compressed Air Energy Storage* (CAES). D'autres enfin sont en phase de développement ou de mise au point tels que les volants d'inertie ou le stockage par hydrogène.



		Service	
		Opérateurs de génération et transmission	Utilisateurs
Localisation	centralisée (MW)	<ul style="list-style-type: none"> • Energie Déplacement d'énergie dans le temps • Puissance Ecrêtage - Lissage - Montée en puissance - Services réseaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Stockage commercial Ecrêtement de la demande pour réduire les facturations en heures « pleines »
	décentralisée (kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Réseaux de distribution Contrôle des flux d'énergie entre génération décentralisée et réseau de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Maisons intelligentes Autoconsommation Maison avec zéro impact énergétique Protection contre les pannes secteur