



Rapport
de P6

RESEAU ELECTRIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES :
TRANSPORT ET PRODUCTION

Problématique : Comment faire évoluer le réseau électrique afin de l'adapter aux changements des modes de consommation et de production ?

*Emilie FESSLER
Mathilde ESNAULT
Juliette LECLERC
Baptiste MALINGREY
Ouentin LEREBOURS*

Responsable de projet : Dany VANDROMME

Sommaire

- Introduction 3**

- I. Etat des lieux..... 5**
 - 1) **La production d'électricité..... 5**
 - a) **Les centrales 5**
 - b) **Les énergies renouvelables 9**
 - 2) **Le transport d'électricité 13**
 - a) **La gestion du transport 13**
 - b) **la distribution 17**
 - 3) **Nécessité de l'évolution du réseau 18**
 - a) **évolution de la consommation 18**
 - b) **nécessité d'évolution : l'apparition des GED..... 21**

- II. Les Smart-grids.....25**
 - 1) **Description générale..... 25**
 - a) **Aspects pratiques..... 26**
 - b) **La transmission de l'information..... 30**
 - 2) **Le mix énergétique 33**

- III. Limites et alternatives39**
 - 1) **Limites..... 39**
 - 2) **Alternatives..... 41**

- Conclusion.....43**
- Avis sur le Projet45**
- Bibliographie.....48**

Introduction

Depuis une trentaine d'années, âge moyen du réseau électrique français, la consommation d'électricité dans le monde n'a cessé d'augmenter. De plus, avec la tendance actuelle au développement des énergies renouvelables, de plus en plus de petites sources d'énergie sont disséminées sur les territoires nationaux, au plus près des consommateurs ; le système traditionnel de production centralisée, pour lequel l'électricité était produite par un nombre restreint de grandes centrales et parcourait le réseau jusqu'aux consommateurs, est donc révolu. Ce phénomène de décentralisation de la production d'électricité est le plus marqué en Allemagne avec l'arrêt pur et simple de toutes les centrales nucléaires avant 2022, obligeant les gestionnaires de réseau allemands à développer les sources d'énergie renouvelable notamment. Or, le réseau actuel d'électricité n'a pas été conçu pour une telle consommation, ni pour un tel mode de production d'électricité, et la problématique du raccordement à grande échelle des sources d'énergie décentralisées au réseau électrique n'a pas été réfléchi dès le départ. Ce problème est bien réel, car si des solutions ne sont pas mises en œuvre rapidement, d'après les prévisions de l'augmentation de la consommation, le réseau électrique ne serait concrètement plus capable de supporter cette augmentation, ce qui amènerait à de nombreuses coupures à grande échelle sur le réseau, du type de celle du 4 novembre 2006, où une panne électrique a privé d'électricité environ 15 millions d'européens entre 22h et 23h.

Dans ce contexte de mutation énergétique, le réseau électrique est donc dans l'obligation de s'adapter rapidement, durablement, et à moindre coût. Pour répondre à ce triple défi, la construction de nouvelles lignes électriques n'est pas envisageable, d'un point de vue économique au vu des coûts que cela engendrerait, comme d'un point de vue sociétal car les habitants n'accepteraient pas de voir une ligne électrique haute tension construite à côté de chez eux. Il a donc fallu pour les gestionnaires de réseau trouver le moyen d'optimiser la production d'électricité, et notamment le raccordement des sources d'énergie décentralisées. En effet, il faut savoir que pour maintenir la stabilité d'un réseau électrique, il faut entre autres équilibrer en permanence la production et la consommation d'électricité ; or il est très compliqué de prévoir la production d'électricité des sources intermittentes que sont notamment les éoliennes et les panneaux solaires. L'enjeu est donc de rendre plus flexible et réactif le réseau existant, des sources d'énergie jusqu'au consommateur.

C'est pourquoi la solution adoptée par tous les gestionnaires de réseaux dans le monde réside dans la technologie des smart-grids, autrement dit les « réseaux intelligents ». On entend par réseau électrique intelligent un réseau sur lequel des moyens technologiques (compteurs intelligents, moyens de transmission de l'information,...) ont été mis en place

pour non seulement suivre en temps réel l'état du réseau (consommation d'électricité de tous les consommateurs et production d'électricité de toutes les sources), mais également adapter une réponse instantanée aux fluctuations de production et de consommation d'électricité. Un tel dispositif, basé sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), permettrait d'optimiser l'utilisation du réseau électrique déjà existant, en évitant les surcharges sur le réseau et en utilisant toutes les capacités de production des sources d'énergie décentralisées, qui sont aujourd'hui parfois déconnectées du réseau pour éviter de le déséquilibrer. Partout dans le monde, les smart-grids sont aujourd'hui déjà en train de se développer, à un niveau plus ou moins avancé.

Au travers de notre projet, nous avons donc voulu savoir comment les réseaux électriques pouvaient s'adapter à l'évolution des modes de consommation et de production d'électricité ; par la force des choses nous nous sommes concentrés sur la technologie des smart-grids, puisque c'est la solution qui semble avoir été adoptée partout. Nous nous sommes dans un premier temps penchés sur le fonctionnement actuel des réseaux électriques, de la production à la consommation en passant par le transport de l'électricité, puis nous avons étudié la mise en place, le fonctionnement et la portée des smart-grids, avant d'en décrire les limites ainsi que les solutions alternatives qui pourraient exister.

I. Etat des lieux

1) La production d'électricité

a) Les centrales

La France possède un parc de centrales électriques suffisant à alimenter tout le territoire. Ainsi, l'électricité produite est dite **excédentaire**, c'est-à-dire qu'elle dépasse la quantité consommée. C'est pourquoi la France exporte de l'énergie électrique aux pays voisins. Mais attention, ce bilan est annuel. La France est donc elle-même amenée à importer à certaines périodes de l'année, de la journée,...

Dans ce parc de production électrique, on distingue différents types de production :

- Le nucléaire
- La production thermique à flamme (charbon, fioul, gaz)
- La production à partir d'énergies renouvelables

Le diagramme ci-dessous montre la part de chacun d'eux.

provenance de l'énergie électrique en France

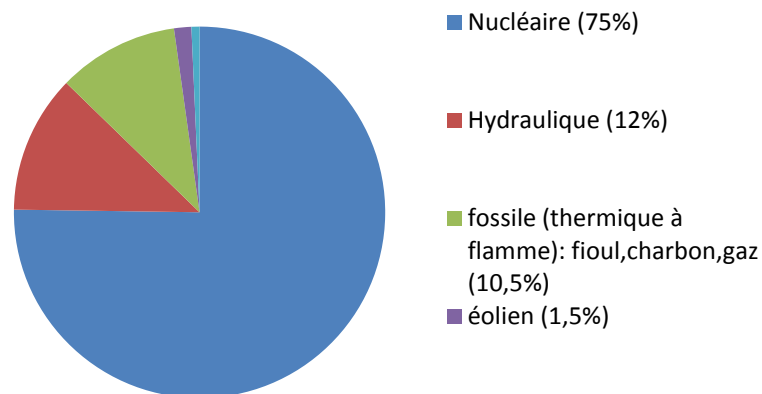


Image 1 : Provenance de l'énergie électrique en France

(Source chiffres : « le grand voyage de l'électricité » (C'est pas sorcier))

Comme on peut le voir, le Nucléaire représente le moyen majoritairement employé. Les centrales nucléaires ont un rôle de **production de base**.

Historiquement parlant, on doit cela au fait que la France ait nettement investi dans ce type de production électrique depuis les années 50, voyant en lui une énergie à la fois **rentable** et **fiable**. Sur la carte ci-dessous, on peut observer le paysage nucléaire français.



Image2 : Disposition des 19 sites nucléaires français

On remarque l'absence de sites nucléaires en Bretagne. Cela explique que la Bretagne ne produise que 7% de l'électricité qu'elle consomme.

Maintenant, développons un peu le plan technique.

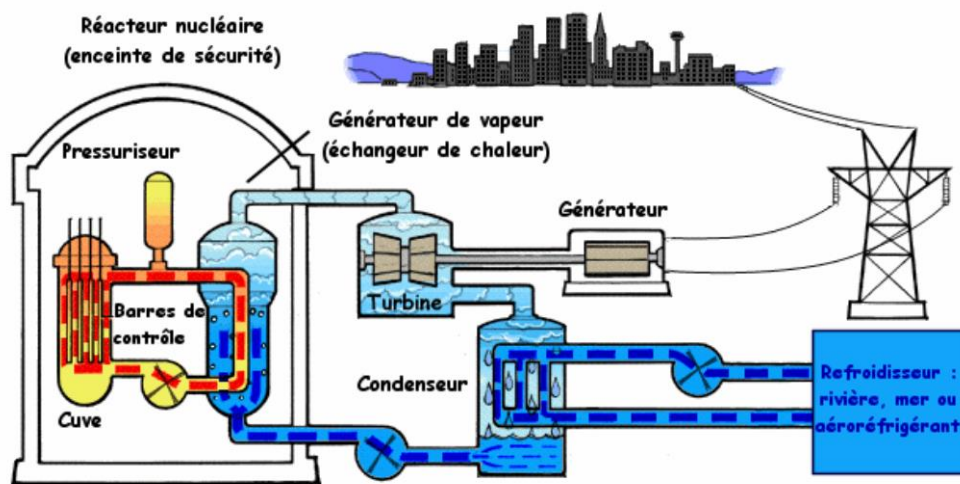


Image 3 : Fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Le principe est relativement simple. Il repose sur l'énergie dégagée par la fission d'atomes d'uranium naturellement instables.

Il faut distinguer 3 circuits principaux :

- Le circuit primaire (radioactif) comprend la cuve remplie d'eau où se déroule la réaction de fission du combustible. On remarque des barres de contrôle dont le but est de freiner en cas de besoin la réaction en chaîne. L'eau est ainsi chauffée (jusqu'à 300°C) tout en restant liquide du fait de sa pression élevée (rôle pressuriseur). Enfin, on peut voir sur le schéma qu'une pompe assure le mouvement de l'eau dans ce circuit.
- Le circuit secondaire (non-radioactif) est basé sur un cycle évaporation-condensation. L'évaporation se fait grâce au transfert de chaleur avec le circuit primaire. La vapeur obtenue fait tourner une turbine qui est couplée à un alternateur (générateur) qui produit l'électricité.
- Enfin le circuit tertiaire où a lieu la condensation (ou plutôt liquéfaction). Celle-ci se déroule au niveau d'un condenseur qui utilise une source froide telle que : cours d'eau, air, mer,...

Enfin, terminons sur le Nucléaire en parlant de ses **inconvenients**.

Bien sûr, il y a les risques d'emballement de la réaction de fission. Nous vient immédiatement à l'esprit la catastrophe de Tchernobyl en 86 et plus récemment celle de Fukushima il y a deux ans maintenant.

Sur le long terme maintenant subsiste le problème complexe de la **gestion des déchets radioactifs**. En effet, la réaction nucléaire n'étant pas totale, il en résulte des déchets radioactifs. Et il semble qu'à l'époque des premières centrales nucléaires, on n'avait pas vraiment d'idées claires sur la gestion de ces déchets. On a donc joué un rôle d'entreposage et parié sur l'avenir en pensant que le progrès apporterait des solutions.

Il y a donc eu de nombreuses recherches, notamment depuis la loi de 91, puis celle de 2006, qui prolonge les recherches face à un bilan insatisfaisant, et stipule le choix d'une solution industrielle pérenne à l'horizon 2015. Ainsi, les différents types de déchets nucléaires, classifiés selon leur degré de radioactivité, sont traités et stockés différemment. La France a choisi de conditionner/traiter les déchets avant de les stocker. Ce processus a majoritairement lieu à La Hague et à Marcoule. Ce processus comprend une étape de recyclage d'une partie des combustibles. On recycle en particulier le plutonium et l'uranium. Cela permet d'économiser jusqu'à 10% de ces matières dans la fabrication de combustible neuf et de réduire le volume des déchets.

| | Vie courte (VC) ($T_{1/2} < 30$ ans) | Vie longue (VL) ($T_{1/2} > 30$ ans) |
|-----------------------------------|---|--|
| Très Faible Activité (TFA) | 10 à 100 Bq/g (~ radioactivité naturelle) Gravats issus du démantèlement et résidus miniers Stockage au centre TFA de Morvillier (capacité 650 000 m ³ , flux actuel : 30 000 m ³ /an) | |
| Faible Activité (FA) | 100 à 10 ⁵ Bq/g Principalement exploitation, maintenance et démantèlement des installations nucléaires. Stockage de la Manche (jusqu'en 1995) puis Centre de l'Aube ^(a) (capacité 10 ⁶ m ³ , flux actuel : 18 000 m ³ /an) | Déchets radifère (minerals) et Graphite (réacteur UNGG) ^(b) (volume : 11 400 m ³). Pourraient être stockés en subsurface. |
| Moyenne Activité (MA) | | 10 ⁵ à 10 ⁸ Bq/g Origine variée (coques et embouts provenant surtout du retraitement, déchets de maintenance et exploitation, boues de traitement des effluents) ^(c) (flux actuel : 530 m ³ /an) |
| Haute Activité (HA) | plus de 10 ⁸ Bq/g Produits de Fission et Actinides Mineurs ^(c) (flux actuel : 120 m ³ /an) | |

(a) Radioactivité proche de la radioactivité naturelle après 300 ans.
(b) 1^{re} génération de réacteur, Uranium-Naturel-Graphite-Gaz. Stockage à l'étude.
(c) Filière à l'étude.

Enfin, en ce qui concerne les perspectives d'avenir, on peut évoquer un projet d'envergure de l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des déchets Radioactifs) qui concerne la conception d'un **centre industriel de stockage géologique (Cigéo)** des déchets HA (Haute Activité) et MA-VL (Moyenne Activité – Vie Longue) au Nord-est de la France près de la ville de Bure.

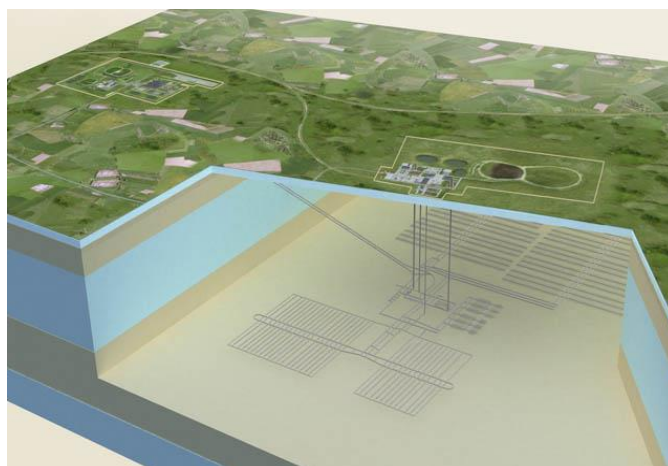


Image 5 : Vue installations de Cigéo.

Maintenant, parlons de la production thermique à flamme (énergies fossiles : charbon, fioul, gaz). Celle-ci se voit attribuer une fonction de **production de semi-base/pointe**. Elle a pour but de **gérer l'intermittence de la demande**.

Cette mise en second plan s'explique par le fait que la France ait épuisé ce type de ressource à bas prix. Enfin, cette production est caractérisée par sa pollution atmosphérique, un type de pollution inexistant pour le nucléaire.

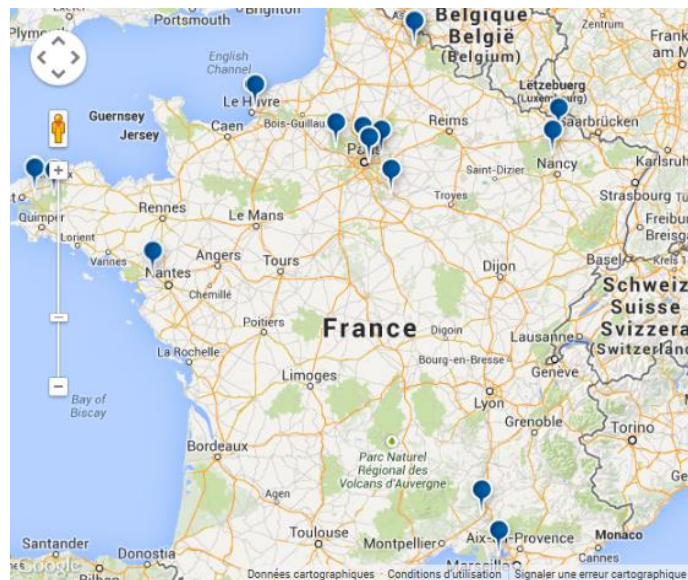


Image 6 : Les centrales thermiques à flamme (fuel, charbon, gaz) en France

Pour finir avec la production issue d'énergies renouvelables, qui sera plus développée par la suite, l'hydroélectricité se démarque largement comme on a pu le voir sur le graphique (elle dépasse la production thermique à flamme). La cause étant son omniprésence sur les cours d'eau français, vient ensuite le Solaire et l'Eolien, tandis que d'autres manières de produire se développent comme la géothermie, la biomasse ou encore les énergies marines (hydroliennes, centrales marémotrices).

b) Les énergies renouvelables

Une des décisions les plus intéressantes pour ce dossier est celle prise lors du Grenelle de l'environnement de 2007. L'état français a décidé que la production d'énergies renouvelables devrait atteindre 23% d'ici 2020. Nous allons donc nous intéresser aux quantités d'énergie produite grâce à ces différents moyens respectueux de l'environnement, mais d'abord nous décrivons leur mode de fonctionnement.

Les énergies renouvelables sont exploitables grâce au même système que l'énergie nucléaire liant une énergie mécanique engendrée par une ressource qui cette fois est naturelle et en quantité illimitée sur Terre, faisant tourner une turbine reliée à un alternateur produisant de l'électricité. C'est ce système qui est utilisé pour l'exploitation de l'énergie hydraulique. Si une centrale est dite de haute chute, de l'eau ayant une forte énergie potentielle est propulsée sur des turbines liées aux alternateurs. Sinon cette eau est injectée à haut débit sur les turbines.

Les 400 barrages français permettent la production de 67 TWh annuels, soit environ 14% de la consommation électrique française, et encore 84% de la production en énergies renouvelables. Cette énergie paraît donc très intéressante pour son faible coût d'exploitation, pour sa durabilité mais surtout parce qu'elle est disponible à notre demande.

Si celle-ci est bien gérée, elle est inépuisable. De plus, elle ne génère ni gaz à effet de serre, ni déchet toxique.

Cependant l'exploitation de l'énergie qui nous est offerte par l'eau possède certains défauts. La mise en place d'un gros barrage par exemple, peut être à l'origine du déplacement des populations locales, ce qui ne peut être un inconvénient négligé. En Chine par exemple, le barrage des Trois Gorges, qui est le plus gros au monde, a nécessité le déplacement de plus d'un million d'habitants dont l'habitat aurait été inondé sinon. En effet le barrage est tel que 600 km² de terres en amont sont submergées par les eaux. En aval, le barrage cause certaines dégradations et un assèchement des nappes phréatiques. Bien que cette énergie ait un potentiel important, nous ne pourrions construire plus de barrages qu'il y a de rivières et les sites hydrauliques les plus importants sont déjà exploités.

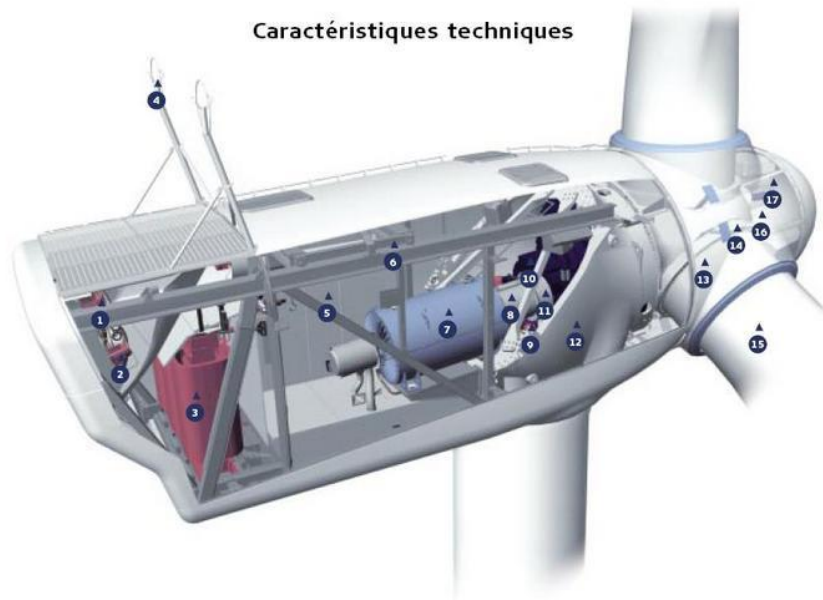


Image 7 : Barrage des Trois Gorges

Parlons maintenant de l'énergie tirée de la force du vent. C'est en 1887 que fut créée la première éolienne productrice de courant. Au fil des années les capacités ont augmenté pour donner celles que nous connaissons aujourd'hui.

Le cœur du fonctionnement d'une éolienne se situe dans la nacelle. Les pales et le rotor tournent, entraînant une génératrice. Le multiplicateur, qui est intercalé entre le rotor et la génératrice, est un composant indispensable car il multiplie considérablement le nombre de tours effectués par le rotor. En conséquence, la génératrice peut fonctionner à son régime optimal. La nacelle contient aussi un anémomètre, un frein d'urgence et d'autres composants spécifiques à l'exploitation du vent.

Caractéristiques techniques



- | | | | |
|---|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 Système de refroidissement | 6 Pont roulant | 11 Frein mécanique | 16 Vérin de réglage de pas |
| 2 Système de refroidissement de l'alternateur | 7 Alternateur OptiSpeed® | 12 Châssis | 17 Régulateur du moyeu |
| 3 Transformateur | 8 Couplage composite | 13 Roulement de pale | |
| 4 Anémomètre et girouette ultrasoniques | 9 Moteur d'orientation | 14 Moyeu | |
| 5 Régulateur supérieur VMP avec convertisseur | 10 Multiplicateur | 15 Pale | |

Image 8 : Eléments d'une éolienne

Mais les éoliennes ne sont encore que très peu utilisées, en effet seulement 2,5% de notre électricité en provient. Les éoliennes les plus puissantes fabriquées aujourd'hui produisent 8MW par heure, mais la moyenne est de 5MWh. Concernant les implantations d'éoliennes, les côtes françaises nous permettent de posséder le second meilleur potentiel d'Europe, c'est pourquoi cinq projets de sites offshore sont en cours de finalisation. Le retard français sera donc rattrapé grâce aux 550 éoliennes du Tréport, de Fécamp, de Courseulles/Mer, St-Brieuc ainsi que St-Nazaire. La production d'électricité par le biais des éoliennes augmente d'année en année et continue son évolution quant à la puissance de celles-ci. Cependant l'énergie éolienne est assez peu productrice, en effet la production de 5 mégawattheures par mât implique qu'une très grande quantité d'éoliennes sera nécessaire pour remplacer une centrale nucléaire. En effet, il faudrait environ 700 éoliennes on shore pour remplacer un réacteur nucléaire. Du fait de l'instabilité de la production d'énergie par les éoliennes, le chiffre précédent ne peut être qu'une estimation. En continuant cette démarche on comprend que pour remplacer les 58 réacteurs français, environ 40 000 éoliennes terrestres seraient nécessaires, ce qui est évidemment impossible pour des raisons d'espace (40 000 éoliennes représenteraient une superficie telle que celle du Calvados) et de prix. Evidemment, la solution offshore existe et est plus performante mais plus coûteuse. En effet, bien que ces éoliennes fonctionnent 40% du temps contre 25% pour les implantations terrestres, le coût d'un parc est exorbitant. Celui du Tréport par exemple coûtera 1.8 milliards d'euros pour 141 mâts.

Pour le respect de nos engagements pris lors du Grenelle de l'environnement, nous devons faire face à ce coût, mais il faudra aussi régler le problème du stockage de l'énergie afin d'utiliser au mieux le potentiel des éoliennes.

Voyons maintenant une énergie tirée directement du rayonnement solaire : La production d'énergie électrique par le biais des panneaux photovoltaïques est totalement différente de celles vues jusqu'à présent. Un panneau est constitué de deux couches de silicium, l'une en surplus d'électrons grâce au phosphore, et l'autre en défaut d'électrons grâce au bore. Lorsque le rayonnement solaire frappe les panneaux, les électrons entourant le silicium s'agitent, il y a échange d'électrons entre les électrodes positives et négatives. On obtient finalement un système équivalent à une pile, et donc à l'origine d'un courant électrique.

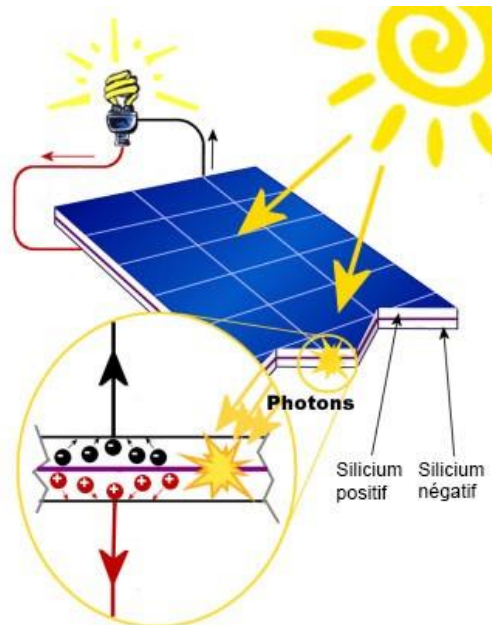


Image 9: Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

Cette méthode de production, bien que très intéressante, est la moins utilisée des trois énergies renouvelables présentées dans ce dossier. En effet, celle-ci permet l'approvisionnement de seulement 0,4% de la population française en énergie, soit environ 200 fois moins que le nucléaire. Le solaire est très utilisé ponctuellement, afin d'alimenter en énergie des maisons isolées. Le solaire est très accessible du fait de son faible coût d'entretien et du fait des tarifs de revente d'électricité aux grands distributeurs. Tout comme l'éolien, le solaire est une méthode de production d'électricité vouée à se développer, mais comme pour les éoliennes, les panneaux photovoltaïques sont fortement dépendants des conditions climatiques. Bien qu'ils captent la luminosité, et non pas les rayons du soleil, ceux-ci sont beaucoup moins productifs par un temps nuageux. L'énergie produite n'est pas toujours consommée immédiatement, il faut donc des moyens de stockage de cette énergie, et ceux-ci coûtent très cher pour les particuliers.

Bien qu'ils soient utiles pour ces derniers, les panneaux photovoltaïques semblent ne pas être encore assez compétitifs lorsqu'il s'agit d'une production importante d'énergie comparée à l'éolien ou au nucléaire.

Tout comme l'éolien la durée de vie d'un panneau photovoltaïque est réduite à une vingtaine d'années et pour finir la production d'énergie solaire ne peut se faire sans grande superficie à disposition, or dans le contexte de croissance démographique et de sous-nutrition, il ne sera pas simple de trouver les lieux où installer les centrales solaires.

Nous avons parlé ici des énergies renouvelables les plus utilisées, mais beaucoup d'autres modes de production sont recherchés et beaucoup d'entre eux sont prometteurs.

2) Le transport d'électricité

a) La gestion du transport

Le réseau électrique comporte trois principales unités qui permettent de répondre aujourd'hui à la demande d'électricité en France. Ce réseau est donc constitué de la partie production (développée dans la première partie), du transport et enfin de la distribution. Nous allons ici nous intéresser au réseau de transport qui conduit l'électricité depuis son lieu de production jusqu'au réseau de distribution. Son rôle est aussi d'assurer les interconnexions au niveau européen.

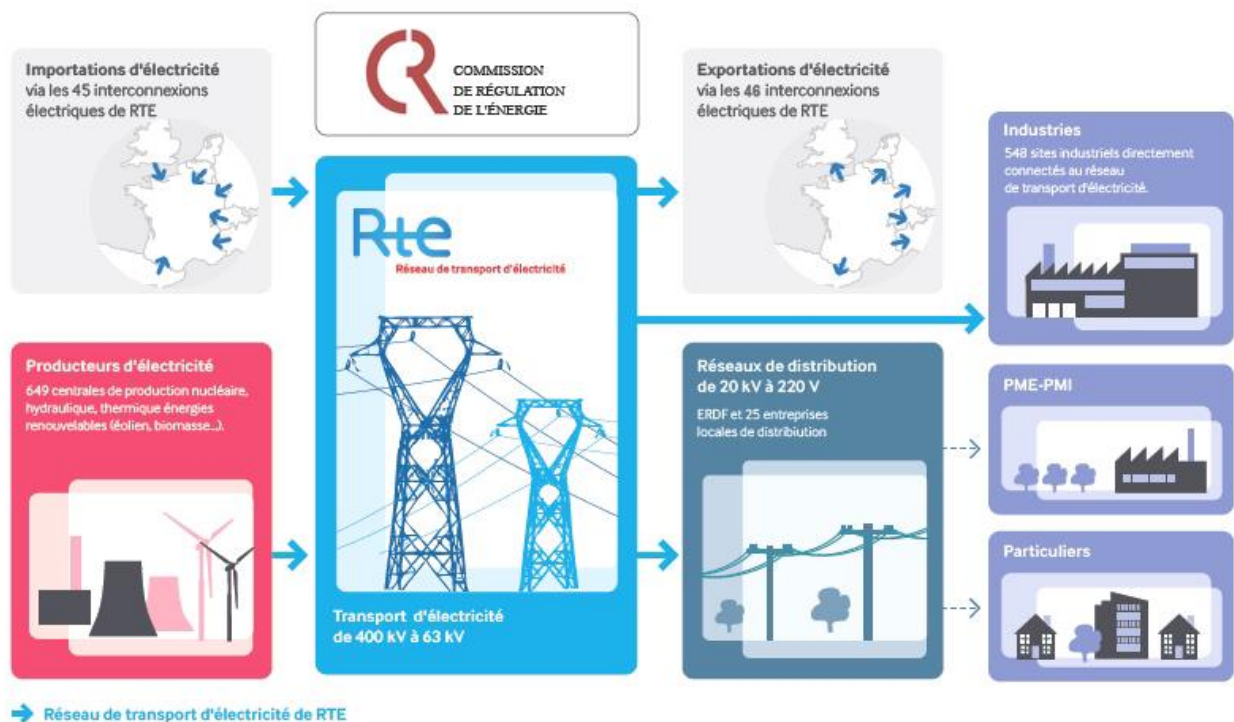


Image 10 : Fonctionnement du réseau de RTE.

La société RTE (réseau de transport d'électricité), filiale du groupe EDF, s'occupe de l'exploitation de ce réseau ainsi que de son développement et de sa sûreté. Cette société française achemine l'électricité à l'aide de lignes électriques à haute et très haute tension entre les fournisseurs d'électricité et les divers types de consommateurs (les distributeurs d'électricité ou alors des industries attachées au réseau de transport). Le réseau RTE pos-

sède des lignes électriques dont la tension peut varier de 63kV à 400kV. Au total, le réseau est constitué de 100 000 km de lignes et de 46 lignes transfrontalières.

Comment le réseau de transport fonctionne-t-il ?

L'électricité provenant des divers moyens de production possède un courant alternatif, triphasé et sinusoïdal. Afin de la transporter sur de longues distances jusqu'au réseau de distribution, il a fallu adapter les installations électriques pour qu'elles soient les plus efficaces possible.

Le transport d'électricité s'effectue dans la plupart des pays sur des grandes distances et à de fortes tensions afin de diminuer les pertes causées par l'effet joule. Celui-ci provient de l'agitation inter-particulaire qui provoque une augmentation de la température. Ces pertes sont liées par la relation suivante $P_{\text{joule}} = R \cdot i^2$, la résistance R étant la résistance électrique du câble et dépendant notamment de sa longueur. C'est pour cela que lorsque l'électricité est produite, elle passe d'abord par un transformateur qui augmente sa tension afin de pouvoir intégrer le réseau de transport.

Il existe également des pertes engendrées par l'effet couronne qui correspond à une énergie dissipée dans l'air qui entoure le câble électrique. « Au voisinage des fortes charges électriques qui se déplacent dans le câble, des charges sont arrachées aux particules de l'air et le câble. C'est généralement à cet effet que l'on doit le bourdonnement généré par les lignes à haute tension. Ces pertes sont aussi proportionnelles à la distance parcourue. Elles pèsent pour près de 10% des pertes totales ».

Quels sont les dispositifs utilisés ?

Les lignes aériennes : Le transport aérien se fait généralement sur 3 câbles en courant triphasé. Un fil de terre à forte capacité n'est pas nécessaire. Ces câbles sont tendus entre deux pylônes, la distance entre les câbles est calculée de telle sorte que ceux-ci ne se touchent pas (même lorsqu'il y a du vent). Ils sont souvent en acier et entourés d'aluminium, ce couple possède le meilleur rapport conductivité/poids. Leur isolation électrique est assurée par l'air. Il est cependant nécessaire de les isoler de l'armature du pylône à l'aide de disques isolants en verre (ou en résine). Les pylônes haute tension ont une hauteur proportionnelle à la tension transportée, entre 35 et 50 m de haut et transportent en général 6 câbles principaux. Ils sont disposés afin de maintenir une distance minimale de sécurité avec le sol et des obstacles divers. Des câbles de garde situés au-dessus des câbles conducteurs permettent de les protéger contre la foudre.

Les lignes souterraines : A la différence des câbles aériens, les câbles souterrains doivent impérativement être isolés. Pour cela, ce sont des matériaux synthétiques qui sont utilisés comme du polyéthylène. La taille de l'isolant est proportionnelle à la tension du câble

électrique. C'est l'une des raisons qui justifient la faible utilisation des lignes souterraines pour les très hautes tensions (de 225 kV à 400 kV). En France, seulement 4km de lignes à 400kV sont souterraines. La difficulté d'adapter ces lignes aux contraintes naturelles et le coût que cela requiert dissuadent la RTE d'en construire. Cependant, en ce qui concerne les lignes à haute tension (63kV et 90kV), leur nombre ne cesse d'augmenter, « depuis 2003, RTE a mis en souterrain près de 40% des lignes à haute tension ». Il existe plusieurs modes d'installation pour ces lignes qui diffèrent selon le terrain exploité et la matière du câble (aluminium, cuivre ou plomb). Par exemple, la pose en galerie « consiste à regrouper les câbles dans les galeries souterraines, ce procédé est utilisé à la sortie des postes de transformations urbains ». Ou encore la pose en caniveau qui elle « consiste à mettre les câbles dans les caniveaux en béton armé remplis de sable et munis d'un couvercle ». La mise en place de ces câbles est réalisée par tronçons (d'environ 800m pour les hautes tensions) qui sont ensuite joints entre eux.

Les postes électriques : Le poste électrique a un rôle crucial dans le réseau de transport. Il permet dans un premier temps d'orienter le courant. Il contient des transformateurs qui permettent de passer d'une tension à une autre, pour permettre la cohésion du réseau, entre la production et la distribution. Il permet également de maintenir le réseau en sécurité grâce aux disjoncteurs et aux sectionneurs.

Disjoncteur : dispositif électronique de protection dont la fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident comme la foudre ou la chute de branches d'arbres.

Sectionneur : appareil électrique permettant de séparer, de façon mécanique, un circuit électrique et son alimentation. Il permet d'éliminer une partie du réseau en dysfonctionnement.

Comment est organisé le réseau ?

Il existe plusieurs structures mais la plus efficace est la structure maillée. Celle-ci assure la résilience et renforce la sécurité de fonctionnement du réseau en garantissant une alimentation stable même lors d'incidents ou de perte d'éléments. Elle est composée de réseaux en boucles regroupées afin de relier des points très éloignés les uns des autres.

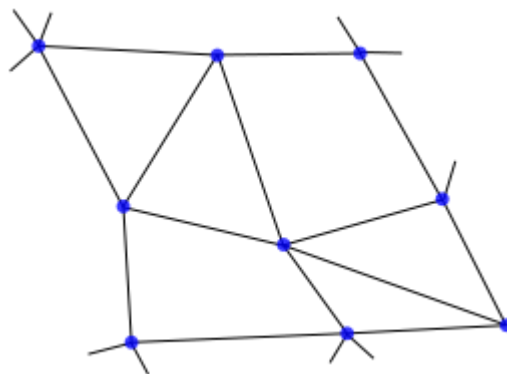


Image 11 : Structure maillée du réseau

Il existe également des structures arborescentes. Dans ce cas, les lignes proviennent toutes d'un point central (par exemple d'un poste électrique). Lors d'une panne sur le tronc principal, l'ensemble du réseau se retrouve alors paralysé, par contre si l'incident se trouve sur les branches et ramifications, la perturbation n'impacte évidemment que l'aval vers le consommateur. Il y a également des structures radiales. Mais ces deux dernières ne sont pas utilisées pour le réseau de transport car elles n'assurent pas une sécurité suffisante.

Les interconnexions ?

Les interconnexions électriques permettent de relier les réseaux de transport des différents pays européens entre eux. La France est actuellement interconnectée avec six pays : la Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, la Belgique et la Suisse. Cette interconnexion a plusieurs buts. Tout d'abord, elle permet d'apporter une aide aux pays voisins dans le cas d'une défaillance brutale. Mais elle instaure également un marché d'exportation et d'importation d'électricité selon les besoins d'un pays. Un même pays peut exporter et importer de l'électricité dans la même journée. Par exemple, l'Espagne peut acheter de l'électricité à la France pendant la nuit, car celle-ci est moins chère, et pendant la journée les éoliennes espagnoles qui tournent à plein régime produisent de l'électricité bon marché dont la France peut acheter une partie. La France est plutôt un pays exportateur comme on peut le voir sur la carte ci-dessous :

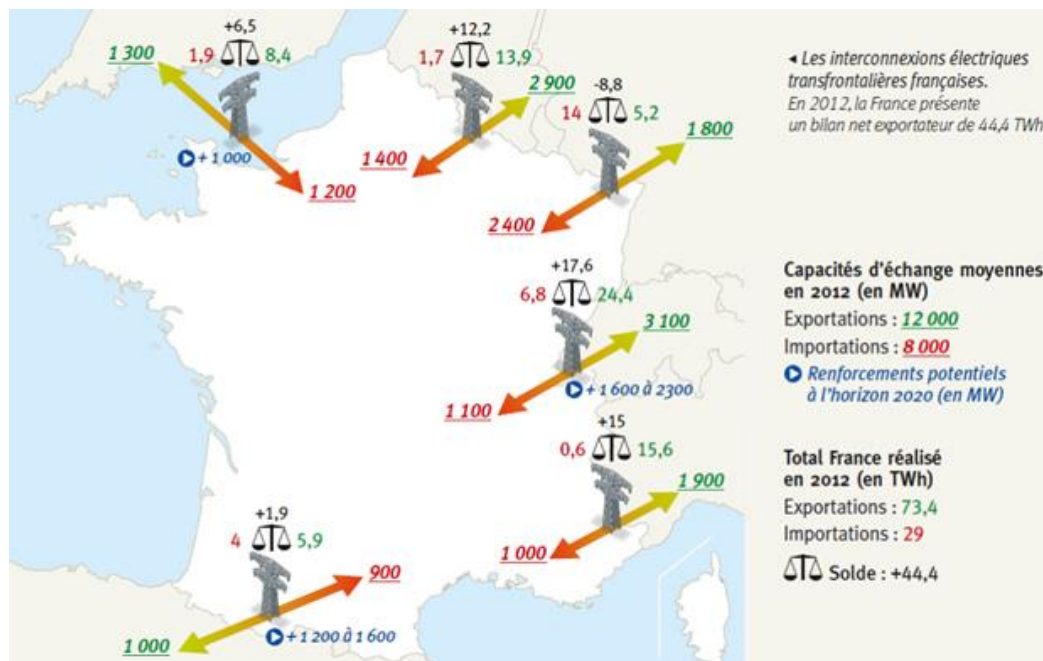


Image 12 : Importations et exportations de courant

b) la distribution

Tout comme le réseau de transport, le réseau de distribution français fonctionne en régime triphasé.

1) Les postes de transformation

Les postes de transformation HTB/HTA

Ils permettent :

- de passer d'une tension HTB (souvent 225 000V) à une tension HTA (souvent de 20 000V)
- De diriger l'énergie électrique dans le réseau HTA
- De surveiller et protéger le réseau

Dans des conditions normales d'utilisation, ils permettent de connecter ou déconnecter une ligne électrique : ils sont télécommandés. Ce sont également eux qui sont chargés de protéger le réseau en cas de court-circuit ou de surintensité : dans les 2 cas, les disjoncteurs se déclenchent automatiquement quand le courant qui les traverse est trop important, ou en cas de court-circuit.

Les postes de transformation HTA/BT

Ils sont constitués de cellules ayant chacune un rôle :

- cellule de transformation
- cellule de protection
- cellule de comptage

Eux ne sont pas télécommandés, ils permettent uniquement la transformation, et la coupure en cas de problème.

2) Le dimensionnement et la structure du réseau

Les réseaux de distribution dans le monde ont été à l'origine dimensionnés pour faire circuler de l'énergie dans un seul sens : on parle d'ailleurs d'"amont" et "aval" du réseau.

3) Le dimensionnement des câbles

Les sections des câbles ont été dimensionnées en fonction de l'intensité admissible qui peut y circuler : c'est l'intensité qui, si elle circule en permanence dans le circuit, ne diminuera pas la durée de vie du câble. Le matériau des câbles influe ainsi, ainsi que la température ambiante, et la proximité d'autres conducteurs, entre autres.

Les problèmes de chutes de tension, venant s'ajouter aux pertes par effet Joule et aux coûts des conducteurs sont à la base de la conception de la topologie des réseaux de distribution : il faut limiter la longueur des câbles, mais en assurant une sûreté du service.

4) La topologie du réseau

Contrairement au réseau de transport, le réseau de distribution a une structure arborescente : le courant circule depuis le poste source jusqu'au consommateur en parcourant des lignes de plus en plus petites.

Il existe plusieurs architectures de réseau, en fonction du niveau de sûreté désiré. Bien entendu, moins la structure est sûre, plus elle est économique car les sécurités mises en place impliquent une plus grande quantité de câble utilisée :

Le réseau HTA (MT) ne peut pas dans certains cas se permettre de faire l'objet de coupures fréquentes car certaines installations directement reliées en MT (hôpitaux, industries agro-alimentaires,...) ne doivent pas être assujetties à des coupures d'électricité. C'est pourquoi l'architecture du réseau MT a généralement été conçue pour qu'en cas de panne ou de matériel défectueux localement, le courant puisse tout de même être acheminé par d'autres moyens. Pour cela il existe divers types de réseaux qui permettent au courant d'emprunter des « chemins de secours » ; on dit que le réseau MT est bouclé.

En BT, les architectures de réseaux ne sont pas aussi évoluées, il n'existe pas de réseau BT bouclé.

5) Le consommateur

Le consommateur final est branché en monophasé, entre 1 phase et le Neutre du réseau BT. Les prises électriques sont donc à 230V, elles sont évidemment branchées en parallèle. La puissance facturée au client est la puissance active (puissance moyenne).

3) Nécessité de l'évolution du réseau

a) évolution de la consommation

Il est difficile d'estimer l'évolution de la consommation d'électricité car elle dépend d'énormément de facteurs. On peut regrouper ces incertitudes en trois groupes :

- Les transferts d'usage : Principalement le transfert de l'usage du pétrole vers l'électricité, nécessaire en raison de la raréfaction du pétrole et pour une baisse des émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, les transports électriques vont certainement se développer dans les prochaines années.

Pour le moment, en France, la consommation d'électricité représente 44% de la consommation d'énergie primaire (l'énergie qui résulte de la première transformation, par exemple l'électricité nucléaire ou hydraulique) et le pétrole 30.3%, selon EDF.

- Les mesures de Maitrise de la Demande en Energie (MDE) qui sont des économies d'énergie prévues, entre autres, par le Grenelle de l'Environnement. Elles se portent sur plusieurs projets :
 - o Une meilleure isolation des bâtiments : par exemple, dans les habitats résidentiels en France, le chauffage représente environ 68% de la consommation d'énergie totale. L'objectif du Grenelle est donc de rénover les maisons et bâtiments anciens (réduction de la consommation de 38% d'ici 2020), les HLM ou les logements à loyer modéré les plus énergivores (plus de 230 kWh/m² par an) ainsi que d'inciter à la construction de bâtiments basse consommation (avec une consommation de seulement 50 kWh/m² par an).
 - o Des appareils électriques plus efficaces : en effet, la consommation d'électricité spécifique (éclairage, appareils électroménagers, ...) représente 13% de la consommation d'énergie dans l'habitat résidentiel. Le Grenelle vise à encourager l'achat d'appareils peu énergivores (repérables via l'étiquette énergie). Par exemple, un réfrigérateur de classe A consommera deux fois moins d'électricité par an qu'un réfrigérateur de classe C.
 - o Une sensibilisation de la population : pour éteindre les appareils en veille, diminuer la température de chauffage, ...

- L'augmentation de la consommation dépendra également du taux de croissance, de l'évolution des industries et des transports (qui représentent respectivement 21 et 32% de la consommation d'énergie totale en France) et de la démographie.

Voici les hypothèses de l'UFE (union française de l'électricité) concernant l'évolution de la consommation. Trois scénarios sont considérés : une croissance du PIB de 1% en vert, de 1.5% en bleu et de 2.5% en rouge. Les facteurs d'augmentation ou de diminution de la consommation sont ceux expliqués plus haut.

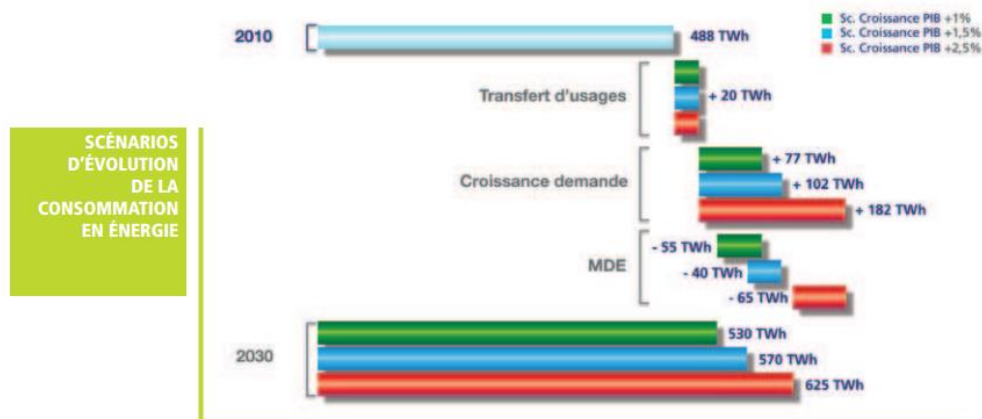


Image 13 : Hypothèses de l'UFE

Les scénarios de la RTE en arrivent environ aux mêmes chiffres

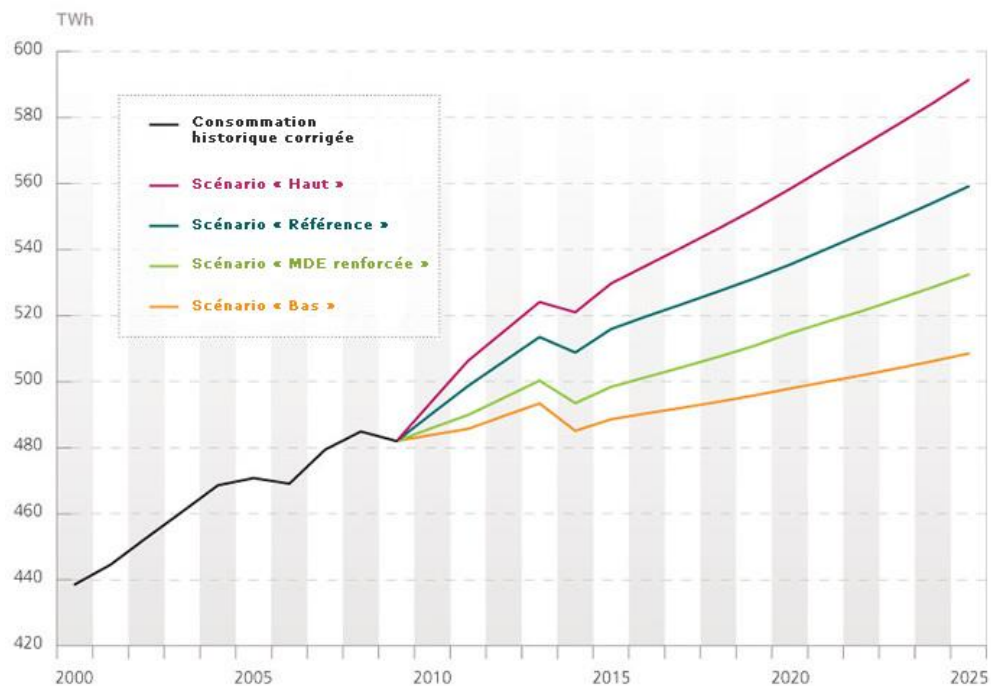


Image 14 : Hypothèses la RTE

Quatre scénarios sont détaillés :

- Scénario « Haut » : hypothèse majorant la consommation.
- Scénario « Référence » : hypothèse centrale pour chacun des facteurs exposés ci-dessus.
- Scénario « MDE renforcée » : prise en compte de l'accélération des mesures de maîtrise de la demande en énergie.
- Scénario « Bas » : hypothèses minorant la consommation.

Cependant, on ne peut pas parler uniquement de la consommation globale. En effet, l'électricité est très difficile à stocker, il faut donc avoir assez de puissance au bon moment, notamment aux heures de pointe. Cette évolution dépend des mesures de MDE mises en place et du développement des smart-grids. En voici une estimation par l'UFE :

**ÉVOLUTION
2010 - 2030
DE LA PUISSANCE
APPELÉE EN POINTE
(60h les plus char-
gées - conditions
climatiques
normales)**

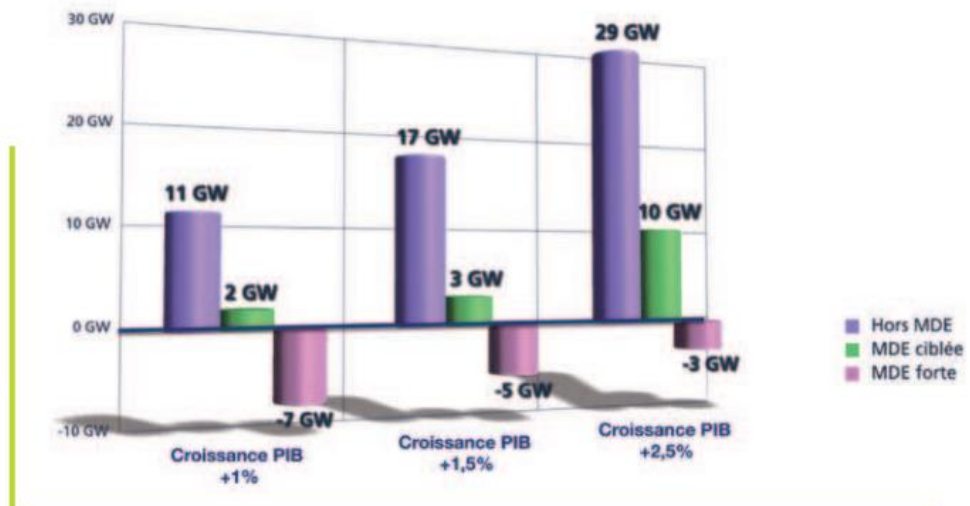


Image 15 : Estimations de l'UFE

On constate qu'avec des MDE efficaces, on peut fortement limiter l'évolution de la puissance consommée. On peut aussi envisager des mesures d'effacement de consommation électrique.

Enfin, l'Europe s'est engagée sur certains points concernant la consommation d'énergie, à satisfaire d'ici 2020. Ces engagements sont appelés le « paquet climat énergie » ou encore les « 3 x 20 », il s'agit de :

- faire passer la part des énergies renouvelables en Europe à 20%
- réduire les émissions de CO2 des pays de l'Union de 20 %
- accroître l'efficacité énergétique de 20 %

b) nécessité d'évolution : l'apparition des GED

Les GED (générateurs d'énergie dispersés) ou PED sont les sources d'énergie décentralisées, c'est-à-dire des petites sources d'énergie (éoliennes, panneaux solaires) disséminées sur le territoire et donc reliées non pas au réseau haute tension comme les centrales « classiques », mais au réseau moyenne voire basse tension.

Comment sont raccordés les GED au réseau, et en quoi cela pose-t-il problème ?

Du fait de la faible puissance fournie, les petites centrales photovoltaïques, éoliennes, et autres GED sont situés sur le réseau de distribution, en aval donc du réseau. Or celui-ci n'a pas été conçu pour cela.

Comment les gestionnaires de réseau ont-ils réussi à raccorder les GED au réseau de distribution, et pourquoi les solutions adoptées aujourd'hui ne seront pas suffisantes à l'avenir ?

Le problème :

Comme nous venons de le dire, le réseau électrique, notamment en France, a été conçu pour être unidirectionnel :

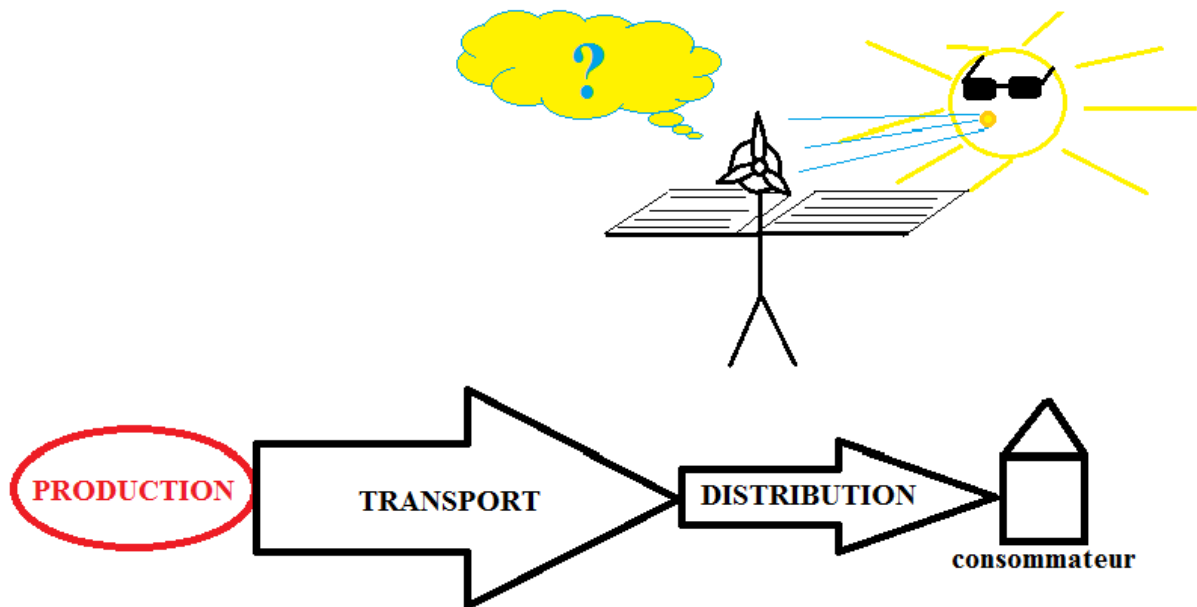


Image 16: le problème des sources d'énergie décentralisées

En effet, comme l'illustre la figure ci-dessus, les flux de puissance étaient jusqu'à maintenant unidirectionnels : des centrales de production aux consommateurs passifs, en transitant par le réseau de transport et distribution.

Or, avec l'apparition des GED, ces flux de puissance deviennent de plus en plus bidirectionnels, et il a donc fallu trouver le moyen de les raccorder au réseau sans:

- Que la source d'énergie ne se comporte comme un récepteur, et ne reçoive donc de la puissance du réseau ! En effet, si on branche directement le GED au réseau, cela revient en schématisant à brancher dans un circuit électrique 2 générateurs en parallèle : si on fait cela, l'un des 2 générateurs (ici le GED) se comportera comme un récepteur...

- Que la puissance injectée sur le réseau par la source provoque un pic de tension

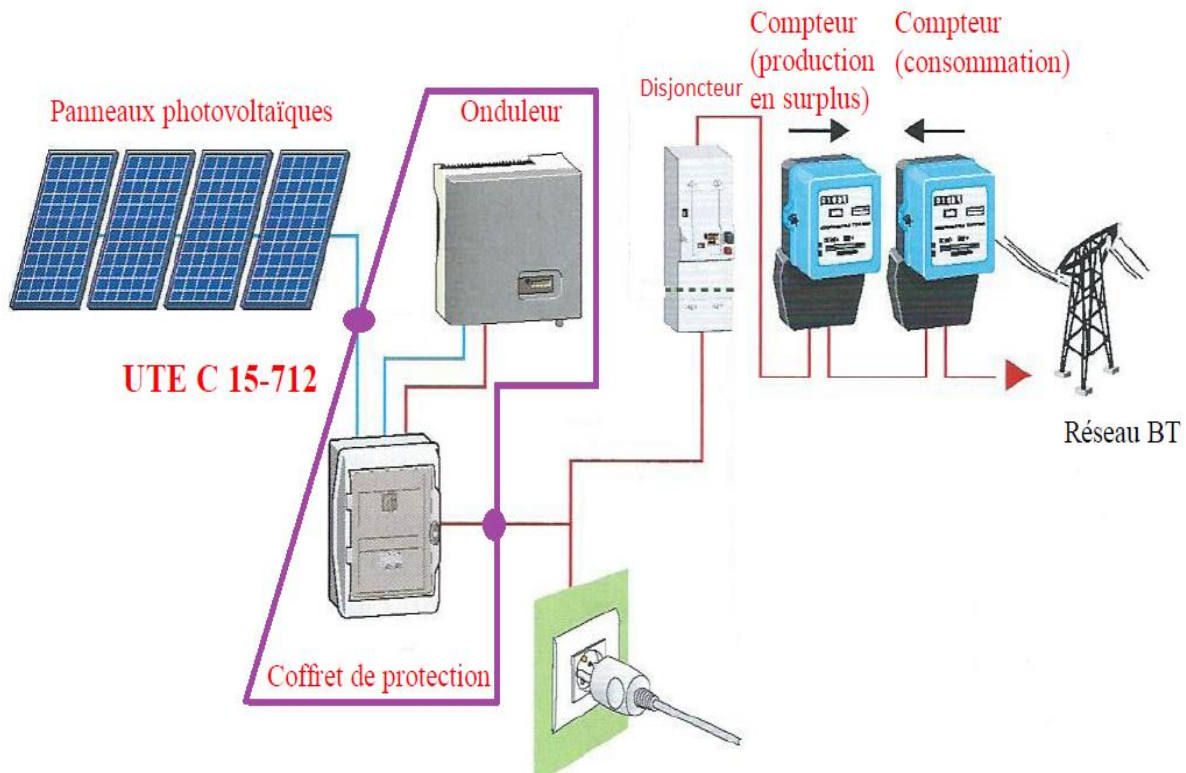


Image 17: Le raccordement actuel des GED au réseau BT

Source : http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf

Aujourd'hui, pour pouvoir raccorder les GED au réseau de distribution, que ce soit en basse ou en moyenne tension, on place entre le GED et le réseau un système permettant de fournir de la puissance réactive au réseau.

Prenons l'exemple d'une installation photovoltaïque chez un particulier, qui décide d'utiliser l'énergie de son panneau solaire pour sa maison, d'utiliser en complément l'énergie qui vient du réseau BT si besoin, et de revendre le surplus d'électricité qu'il produit à EDF si surplus il y a.

Concrètement ce que le particulier a à faire, c'est uniquement de brancher le boîtier violet entre le panneau solaire et une prise électrique (voir schéma ci-dessus).

Ce boîtier violet contient un onduleur qui transforme le courant continu fourni par le panneau solaire en de l'alternatif prêt à être envoyé sur le réseau de distribution, et un boîtier de contrôle et de protection. Ce coffret de protection « surveille » localement le réseau de distribution, et adapte la puissance (c'est-à-dire le couple intensité/tension) envoyée dans le réseau en déphasage/amplitude.

Autrement dit, en parlant de puissance active/réactive : le fait d'envoyer de la puissance active sur le réseau fait localement, au niveau du raccordement, augmenter la tension ; si la tension augmente trop, cela détériore le réseau. Le coffret de protection, en ajustant la puissance réactive envoyée, permet de maintenir la tension dans des limites acceptables.

tant les phases de l'intensité et de la tension, « crée » de la puissance réactive qui va d'une certaine manière « annuler » le pic de tension provoqué par la puissance active injectée au réseau.

En pratique, on peut schématiser les choses de la manière suivante: le coffret de protection est un circuit électronique qui transforme une source de tension en une source de courant : ainsi il peut injecter de la puissance au réseau, mais il n'y a plus de problèmes de générateurs de tension en parallèle, ni de pic de tension.

On peut donc voir qu'aujourd'hui, le raccordement des GED sur le réseau de distribution reste très fragile et ne fonctionne que parce que les GED ne sont pas encore très développés. Cependant, au vu de la tendance actuelle qui favorise le développement de telles sources d'énergie décentralisées, cette solution ne sera dans très peu de temps plus adaptée car les hausses de tension ne pourraient plus être absorbées par le réseau. C'est pourquoi il est aujourd'hui nécessaire que ce réseau s'adapte aux changements de mode de production d'électricité.

II. Les Smart-grids

1) Description générale

Les smartgrids sont une technologie qui permettrait d'affronter les changements actuels dans le paysage énergétique comme l'intégration des énergies renouvelables au réseau, la gestion de l'augmentation de la consommation ou encore le développement des voitures électriques. En effet ce réseau de distribution intelligent basé sur des technologies informatiques augmenterait l'efficacité de la gestion entre l'offre et la demande d'électricité. Ce nouvel équilibre engendrerait une optimisation du réseau de distribution mais aussi de la production. Les smartgrids minimiseraient les pertes en ligne (comme produire inutilement de l'électricité lorsque l'offre est supérieure à la demande) ainsi que les problèmes causés par les énergies intermittentes (comme le solaire et l'éolien) sachant que l'énergie électrique est difficilement stockable. Elles seraient également l'alternative au remplacement et la construction de nouvelles lignes électriques.

Jean-Marie Chevalier, directeur du centre Géopolitique de l'Énergie et des Matières, précise sur le site de la CRE (la commission de régulation de l'énergie) que « La notion de Smart grids combine deux idées : d'une part, rendre plus intelligents les réseaux existants et, d'autre part, créer des mini-réseaux autonomes et dans lesquels on pourra associer aisément différentes sources d'énergie [...] Il sera également possible d'adjoindre à ces réseaux de nouveaux modes de transport, comme la voiture électrique, qui se rechargera pendant la nuit. Il y aura bien entendu des recoupements entre le grand réseau et les réseaux décentralisés. »

Ce nouveau système se baserait plutôt sur le consommateur qui deviendrait un acteur du réseau selon ses besoins personnels. En prenant en compte le consommateur ainsi que la production et la distribution, ce système va également permettre de profiter le plus possible de la production locale afin d'éviter le transport d'électricité sur des très longues distances (qui engendre forcément des pertes).

Le réseau intelligent possédera donc des caractéristiques différentes de celles du réseau électrique actuel qui nécessiteront des installations plus ou moins importantes. Son réseau ne sera pas linéaire mais bidirectionnel (l'ensemble des acteurs sera en interaction). Il se concentrera principalement sur le réseau de distribution car celui-ci n'est que faiblement doté de technologies de communication et gèrera l'équilibre du système électrique par la demande (consommation) et non par l'offre. Pour cela, il utilisera différents supports comme le CPL, les réseaux déployés pour la téléphonie mobile ou la fibre optique pour récupérer les

informations provenant des différents capteurs du réseau. Ces méthodes seront détaillées dans la suite du rapport.

a) Aspects pratiques

Compteurs intelligents

L'un des éléments principaux du dispositif des smart grids est le compteur intelligent. Il doit permettre de collecter et transmettre les données relatives à la consommation d'électricité du consommateur, mais également de recevoir des ordres à distance de la part du gestionnaire de réseau et, dans certains cas, de la production décentralisée d'électricité par le consommateur. Les conséquences de l'installation de tels compteurs sont doubles : d'une part, évidemment, mieux gérer à l'échelle nationale le rapport production/demande en temps réel, mais également d'un point de vue financier pour le consommateur, il permettra baisser la facture (grille tarifaire mieux adaptée au mode de consommation réel du client, messages d'alerte aux heures de pointe,...).



Image 18 : Compteur Linky d'ERDF

Source : CRE

Entre 2010 et 2011, ERDF a expérimenté le prototype du compteur LINKY sur 2 zones : à Lyon et en Indre et Loire. Le but était, après les tests en laboratoire, de vérifier la capacité du distributeur à mettre en place et gérer non seulement les compteurs, mais aussi tout le matériel en amont (concentrateurs, systèmes d'information,...). ERDF a globalement réussi le test, malgré quelques soucis mis en évidence et qui ont pu être réglés.

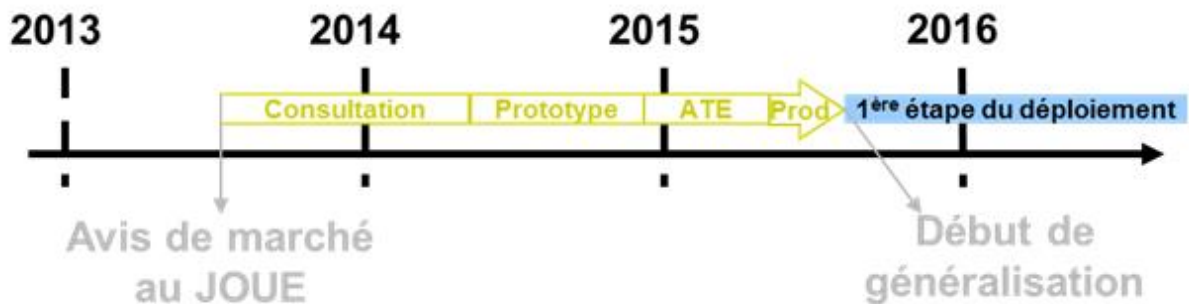


Image 19 : calendrier du déploiement de LINKY

Source : CRE

Ainsi, le 9 juillet 2013, le Premier ministre Jean-Marc Ayrault a annoncé le lancement d'un appel d'offres pour le déploiement de 3 millions de compteurs communicants Linky. A terme, l'objectif est d'équiper les 35 millions de foyers français à l'horizon 2020.

Les compteurs communicants en Europe

Le développement des compteurs communicants n'est pas homogène dans toute l'Europe, d'un point de vue de l'avancement des projets mais également du point de vue des fonctionnalités attendues. Néanmoins, on observe une récurrence des bénéfices attendus quant à la performance du système : baisse des coûts de facturation, de gestion des clients (vérification des compteurs, relevés, appels au service client,...), baisse des fraudes sur les compteurs, baisse des coûts de recherche de panne sur le réseau.

La Suède, avec 99% des clients équipés de compteurs évolués, est le pays le plus avancé, suivi par l'Italie avec 90%. A l'inverse, dans beaucoup de pays, le développement des compteurs évolués n'en est qu'au stade des projets et scénarios envisagés ! Pourtant, comme le montre la carte ci-après, les pays comme la Suède dans lesquels le déploiement des smart grids est le plus avancé ne sont pas forcément ceux qui en ont tiré jusqu'à présent des bénéfices financiers.

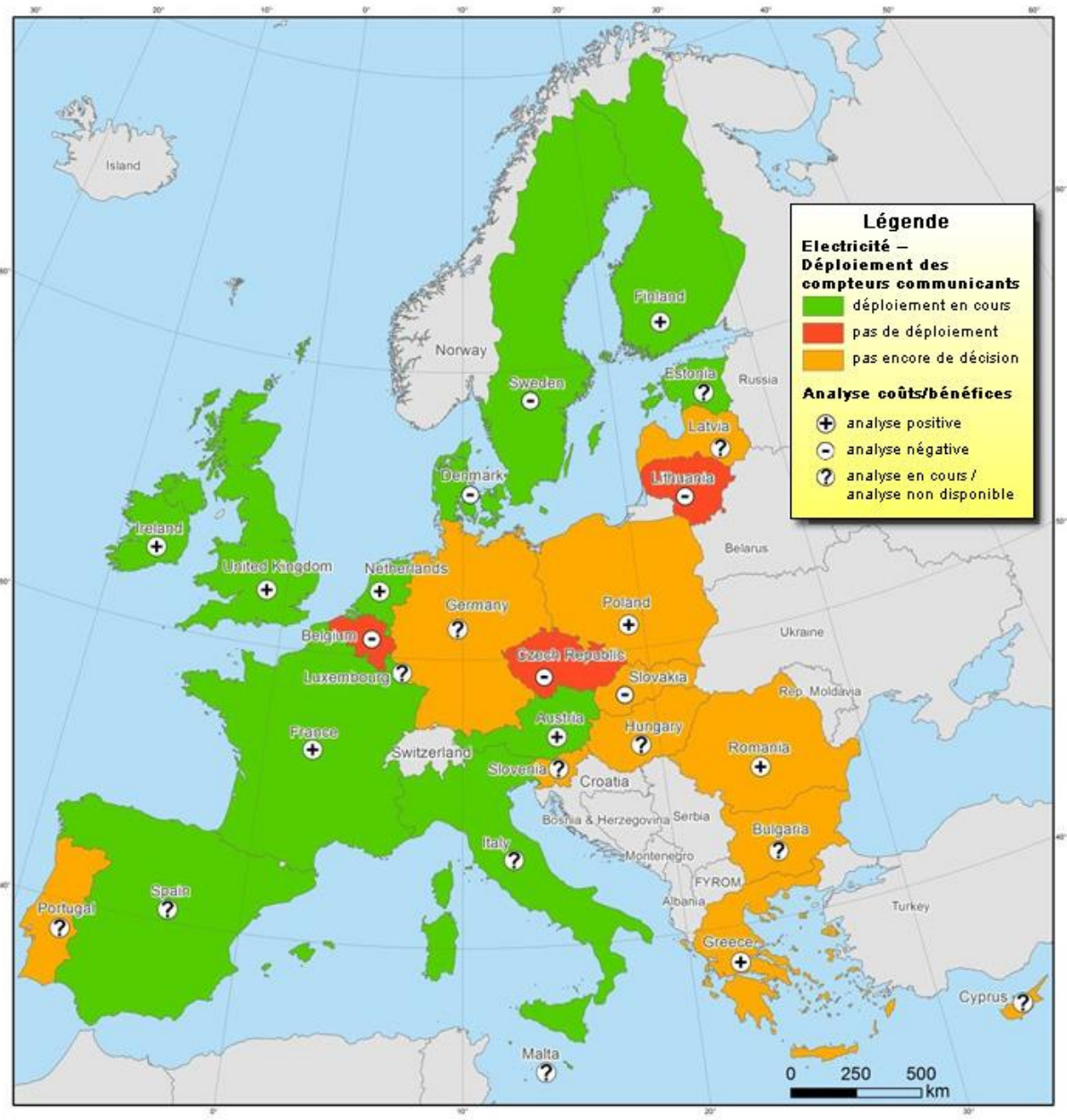


Image 20 : Développement des compteurs communicants en Europe

Source : CRE

Le CPL

Depuis novembre 2013, c'est officiel : le CPL (pour Courant Porteur en Ligne) sera utilisé dans le cadre des smart grids pour véhiculer l'information au niveau local : à l'intérieur du domicile et sur le réseau basse tension.

Principe de fonctionnement

La technologie du CPL est déjà largement utilisée à l'intérieur même du domicile, par exemple comme alternative au WIFI pour connecter plusieurs ordinateurs à une box internet. Il permet de faire circuler les informations dans les câbles électriques déjà existants.

Le principe est de superposer au signal électrique 50Hz qui circule dans les câbles un signal haute fréquence et basse amplitude, signal qui est le "codage électrique" des données que l'on veut transporter. Etant donné sa fréquence et son amplitude, le signal ajouté ne perturbe pas le courant 50Hz qui circule à l'origine, et il suffit en sortie, à l'aide d'un filtre passe-haut, de récupérer uniquement ce signal (courbe rouge) en sortie et donc de décoder les données voulues.

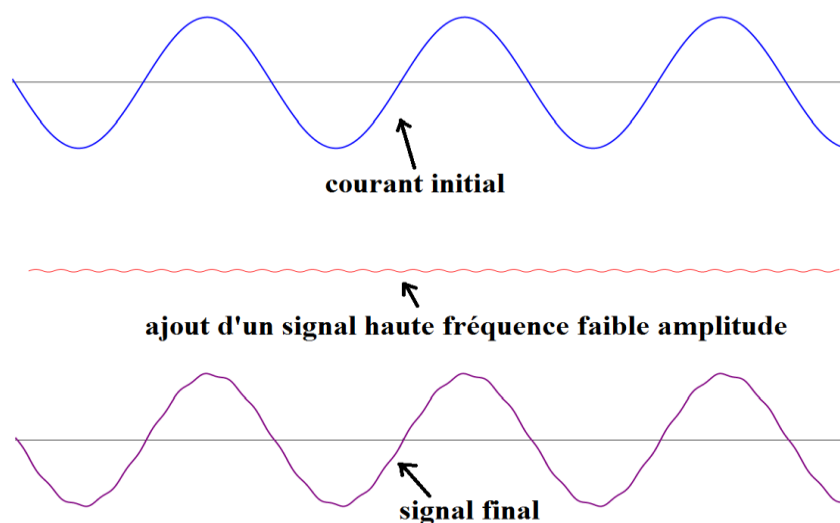


Image 21 : Principe du CPL

Il est à noter que plus la longueur des câbles est élevée, plus le signal que l'on ajoute est détérioré (d'autres facteurs influent également) ; c'est pourquoi si la longueur des câbles est trop grande, on installe des répéteurs le long du parcours du signal, qui comme leur nom l'indiquent permettent de répéter le signal afin qu'il ne faiblisse pas.

Le CPL en particulier : pour les smart grids

Le CPL est à la frontière de 4 domaines de réglementation principaux : l'électricité et les télécommunications bien sûr, mais également la compatibilité électromagnétique et la gestion du plan de fréquence ; il a été très compliqué de trouver une norme pour l'utilisation du CPL dans le cadre des smart grids, mais une norme vient finalement d'être adoptée fin novembre 2013 (la norme **IEEE 1901.2-2013**).

Image 22 : Zone d'action du CPL

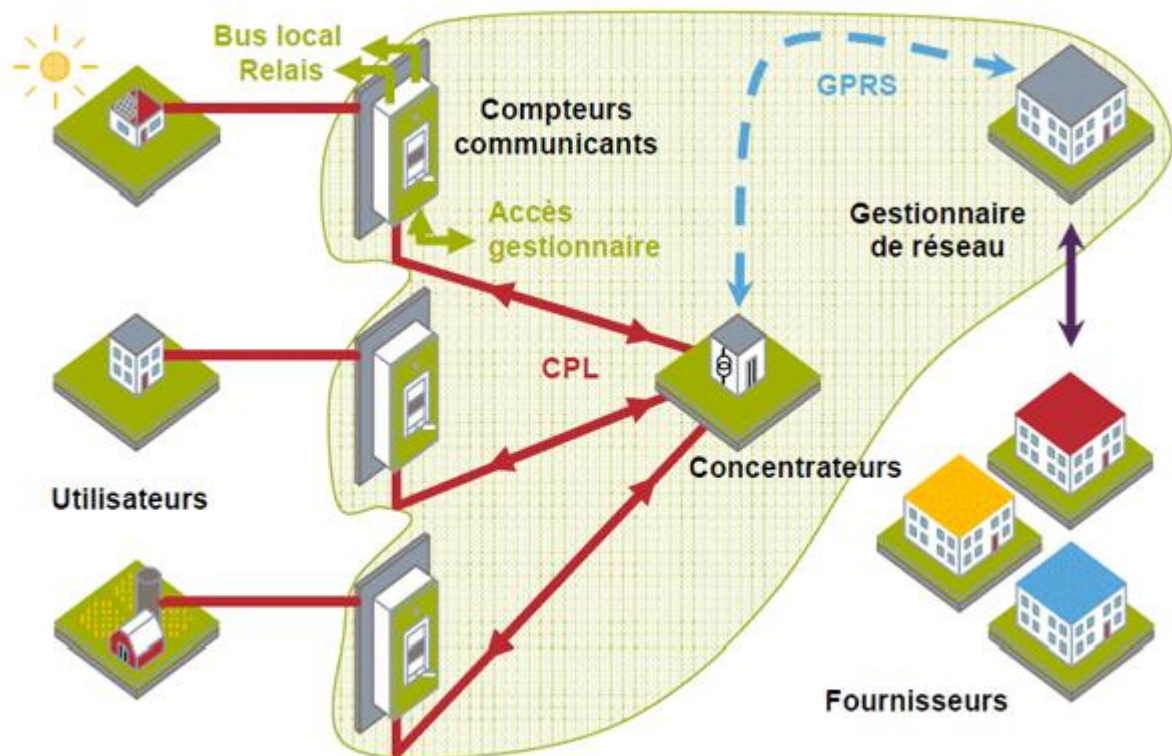


Schéma d'un modèle couramment retenu pour un système de comptage évolué en électricité
Source : CRE

Au niveau du fonctionnement, le CPL sera présent à l'intérieur même du domicile, puis les données seront regroupées par le compteur intelligent LINKY qui les enverra à son tour sur le réseau, toujours en utilisant le CPL.

b) La transmission de l'information

Comme expliqué précédemment, l'utilisation du courant porteur en ligne permet l'acheminement d'informations dans les lignes basse tension. Il est donc nécessaire

d'utiliser une autre technique d'acheminement de l'information pour la faire parvenir au fournisseur lorsque les tensions sont moyennes voire élevées. Pour ce faire, l'utilisation du réseau GPRS est prévue. Le « General Packet Radio Service » permet le transport de données, notamment pour les données de la téléphonie mobile. L'utilisation d'un tel protocole implique les opérateurs de télécommunication dans le projet des smart-grids. Le principe serait donc de mettre une carte SIM sur chaque concentrateur, qui permettrait l'envoi d'informations à un centre de récupération et de traitement des données.

Maison intelligente et smartgrids

Les smart-grids consistent à communiquer tout au long du réseau, jusqu'à l'intérieur des bâtiments. Le but est de réduire la consommation globale, mais aussi de l'adapter à la production. On commence donc à parler de « maisons intelligentes », qui pourraient gérer leur consommation d'énergie elles-mêmes.

L'idée d'une maison intelligente est notamment de réduire les pics de consommation : La maison pourra directement gérer l'utilisation du chauffage, des appareils électroménagers, etc. afin de réduire la consommation à toute heure, et spécialement aux heures de pointe. Du point de vue des énergies renouvelables, cela peut aussi permettre d'utiliser les appareils quand l'énergie est disponible (la maison devra donc être connectée au réseau pour suivre la production d'énergie en temps réel). Les appareils électroménagers pourraient par exemple se mettre en marche le midi, lorsque la production des panneaux solaires est la plus forte, et ainsi créer des pics de consommation correspondant aux pics de production, évitant le stockage.

La maison intelligente va même plus loin en s'intégrant directement au réseau : les voitures électriques, une fois branchées sur leur prise, ne resteraient pas inertes. Après avoir emmagasiné de l'énergie, elles pourraient la restituer lors des pics de consommation, en alimentant le réseau ou la maison, directement. Elles serviraient ainsi à soutenir le réseau et à aplatir les pics de consommation, se rechargeant lorsque l'énergie est disponible puis la rendant ensuite.

En plus de la gestion de la consommation, les maisons intelligentes peuvent aussi gérer leur propre production d'énergie. Cette production peut venir d'énergie renouvelables (solaire, éolien) mais aussi de la cogénération : il s'agit de produire avec le même appareil du chauffage et de l'électricité. Ce procédé, d'abord utilisé au niveau industriel, arrive chez les particuliers. Par exemple, l'entreprise Cogentec vient de commercialiser une chaudière dont la chaleur fait tourner un piston, produisant de l'électricité, grâce à un système d'échange de chaleur chaud-froid. La décentralisation de la production d'énergie sera gérable à grande échelle grâce aux compteurs communicants.

La maison intelligente s'appuiera donc sur un réseau domestique intelligent, reliant ensemble toutes les fonctions (chauffage, appareils électriques, éclairage, systèmes de sécurité, production d'énergie, voitures électriques, ...). Ce réseau devra être géré par un ordinateur, que l'on pourra paramétrer soi-même (température et heure d'allumage du chauffage, ouverture des volets, ...). Elle peut aussi posséder différents procédés ou gadgets connectés permettant de réduire la consommation d'énergie. On peut notamment citer la poignée intelligente : réglée grâce à une simple molette, elle éteint les lumières lorsque l'utilisateur sort, et rallume quand il rentre !

Pour ce qui est du chauffage, un système centralisé permet de le programmer dans toute la maison. On peut décider de le baisser pendant la journée, à environ 17°C, lorsque personne n'est à la maison, puis de le remonter 30 min avant le retour des occupants. Cette baisse de quelques degrés permet de faire une économie tout au long de la journée sans surconsommation (qui adviendrait pour réchauffer si le chauffage était entièrement coupé). On peut même aller plus loin en réglant le chauffage de chaque pièce suivant l'heure : on chauffe le salon en fin d'après-midi, puis les chambres en soirée, par exemple. Évidemment, ce système fonctionne de pair avec une maison peu gourmande en chauffage, avec une bonne isolation, des baies vitrées dirigées au sud, ...

Des dispositifs rendant la maison intelligente existent déjà aujourd'hui : Par exemple, la box Wiser de Schneider Electric permet de gérer les appareils de la maison sans installer tout un système de domotique onéreux. La box centralise ses informations grâce à des appareils sans fil disséminés dans la maison : une sonde pour le radiateur, des prises électriques programmables, ... tout cela communiquant grâce au wifi de la maison. Elle est bien sûr également reliée au compteur électrique.

Ce système permettrait de rendre une maison intelligente en gestion de l'électricité sans devoir la rénover entièrement, et permettrait des économies non négligeables. Schneider annonce 1000 euros pour équiper un appartement de 4 pièces, pour une économie de 30% sur la consommation d'électricité. De nombreux autres constructeurs travaillent sur le projet, comme Thomson et sa Thombox ou Toshiba, dont le projet est encore en développement.

2) Le mix énergétique

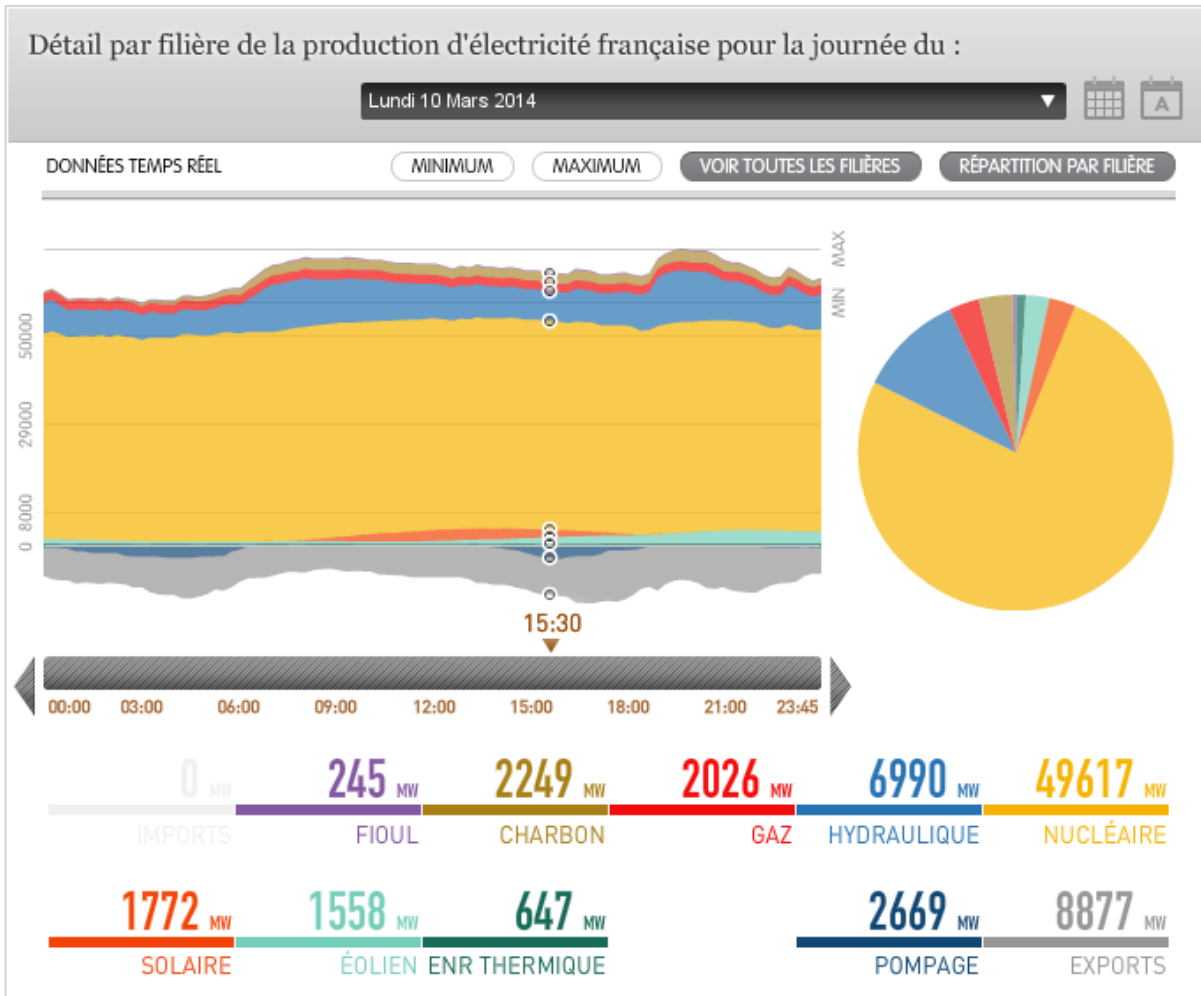


Image 23 : Mix énergétique

Le mix énergétique est déjà géré intelligemment aujourd'hui : la part de production d'énergie par source varie selon l'heure de la journée. Cette gestion devra être d'autant plus efficace avec l'augmentation de la part d'énergies renouvelables.

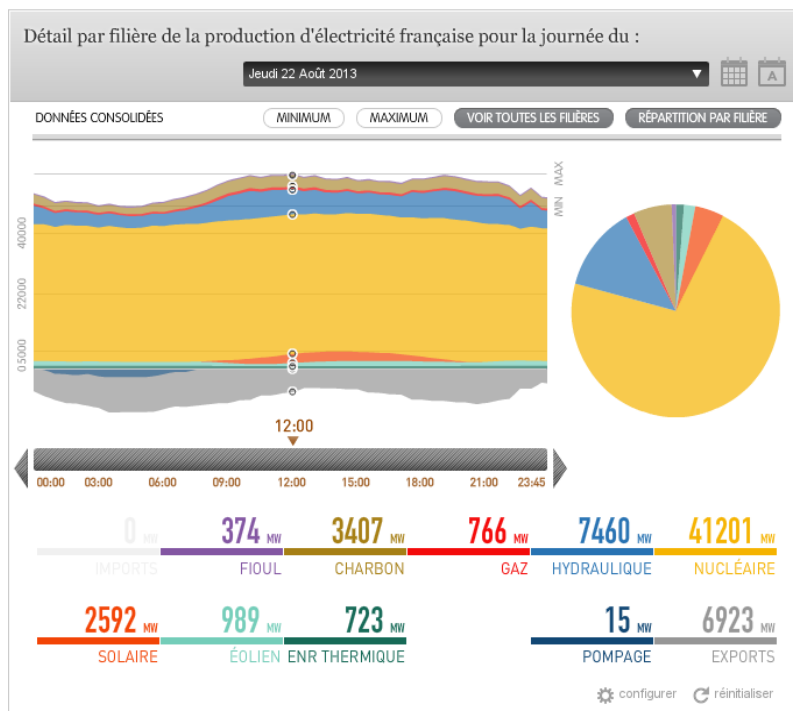
On voit sur le graphique ci-dessus la journée du 10 mars 2014. Pour l'instant, la part du nucléaire est la plus importante tout au long de la journée, mais on peut voir les variations d'autres énergies, en particulier les renouvelables.

On observe que la production en solaire (panneaux photovoltaïques) est significative de 9h à 18h environ, ce que l'on peut prévoir. Par contre, la production d'éolien peut être très variable, ici de midi à minuit environ. On imagine aisément que si ces énergies étaient plus développées, ces variations pourraient être très difficiles à gérer.

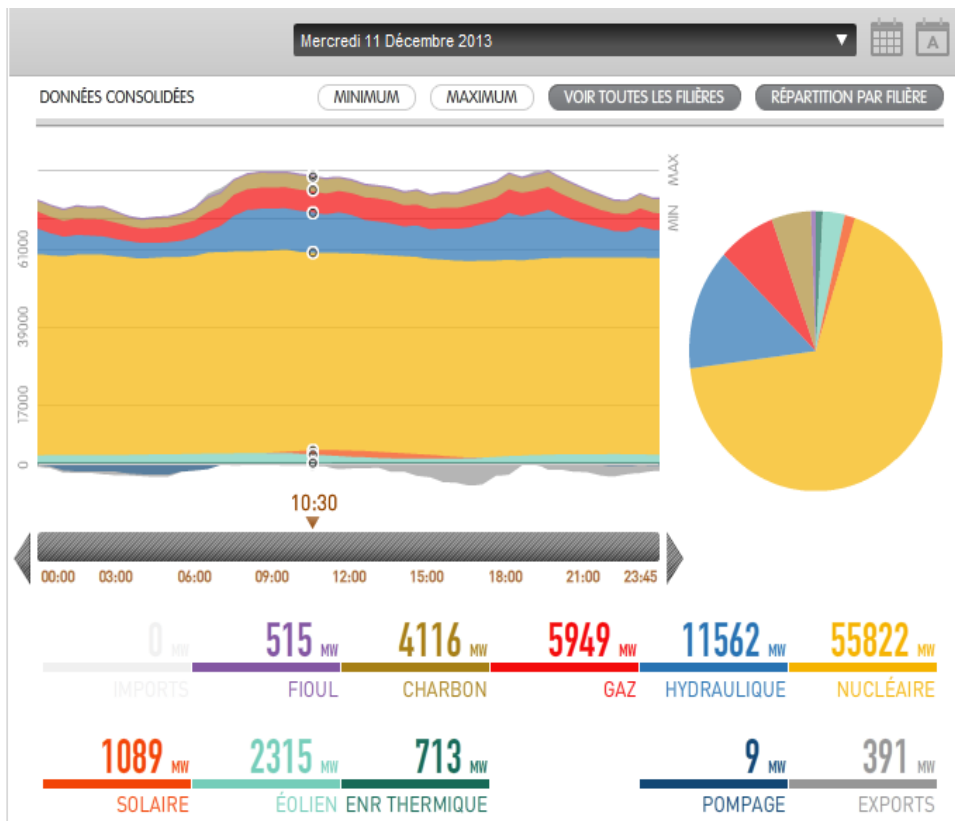
La gestion est aussi ajustée grâce à du pompage (en bleu foncé), qui est ensuite reconverti en électricité lors des heures de pointe. Le reste de l'énergie hydraulique (en bleu), sert également à suivre la consommation : sa production suit les pics.

La part d'énergie produite par le gaz représente principalement du chauffage : on peut voir sur les deux graphiques ci-dessous que la part de gaz dans la production d'énergie est minimale en été et maximale en hiver.

Enfin, la production d'électricité grâce à du charbon ou du fioul est utilisée pour compléter les autres productions.



Par exemple, on peut voir sur le graphique ci-dessous qu'en été, les productions grâce au charbon et fioul sont augmentées pour compléter une énergie hydroélectrique beaucoup moins importante, alors qu'en hiver, cela permet de couvrir la consommation d'énergie due au chauffage.



Les exports sont également gérés selon la quantité d'énergie disponible, et on a parfois recours à une importation d'électricité, notamment en hiver.

Le mix énergétique est organisé pour gérer les variations de consommation tout en réduisant le poids des énergies carbonées et la part du nucléaire. La production est ainsi adaptée aux normes européennes, et gérée de façon à minimiser les émissions de CO₂.

La présence accrue de charbon dans le mix énergétique français cette année est due à l'importation de charbon américain, peu onéreux grâce à la concurrence du gaz de schiste. Les centrales à fioul, par contre, sont fermées les unes après les autres pour respecter les normes environnementales européennes. Le pompage (STEP) est vu quant à lui comme une méthode efficace de stockage (le rendement d'un cycle est de 70 à 85%) et de plus en plus développé.

En parlant de stockage : Le Stockage de l'énergie électrique :

L'électricité est un très bon vecteur énergétique car elle peut se convertir sous d'autres formes d'énergie avec des rendements plus ou moins significatifs. Cependant elle est difficilement stockable. Idéalement ce stockage pourrait participer à maintenir un équilibre entre l'offre et la demande d'électricité, par exemple si on stockait l'électricité en période de faible demande ou alors durant les fortes productions des énergies intermittentes, on pourrait ensuite la restituer lors des pics de consommation.

Malheureusement l'énergie ne se stocke que de façon indirecte, on stocke l'énergie mécanique, thermique, chimique mais non électrique. Diverses solutions de stockage existent mais aucune solution n'est pleinement satisfaisante soit parce qu'elle n'offre pas la possibilité de stocker une quantité assez importante ou alors à cause de l'inadéquation du terrain naturel. Il existe deux sortes de stockage :

-Le stockage centralisé : Il est utilisé pour la gestion du réseau de transport afin d'obtenir un équilibre entre l'offre et la demande.

-Le stockage décentralisé : de dimension plus modeste, ce stockage est un appui pour pallier localement l'intermittence d'une source d'énergie renouvelable, ou alors répond aux exigences des applications mobiles dans les transports.

Nous allons maintenant faire un rapide état des lieux des différents moyens de stockage utilisés actuellement.

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Ces stations de pompage utilisent le stockage par gravitation. Elles sont constituées de deux bassins d'eau à deux hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Pendant les heures creuses, on remonte l'eau par pompage et ensuite on la turbine aux heures de pointes (fonctionnement d'une centrale hydroélectrique classique). Les STEP conviennent mieux aux régions montagneuses ayant des lacs en altitude ou alors des régions accidentées permettant de creuser des bassins surélevés au-dessus d'un ruisseau.

Le stockage d'énergie sous forme comprimée (CAES)

De l'air est comprimé aux heures creuses par un compresseur accouplé à une turbine à gaz et est stocké dans des cavités souterraines. Aux heures de pointe, l'air comprimé peut être utilisé pour mettre en mouvement une turbine produisant de l'électricité. Il est également possible de récupérer la chaleur dégagée lors de la compression de l'air et de la stocker (stockage de chaleur sous haute pression) pour la restituer lors de la détente de l'air. Ces installations exigent une consommation d'énergie pour la compression, et également une consommation de gaz dans la turbine avec émission de gaz à effet de serre. Une surveillance permanente est aussi nécessaire. Ce type de stockage possède un rendement global de l'ordre de 55% qui pourrait ultérieurement dépasser les 70%.

Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

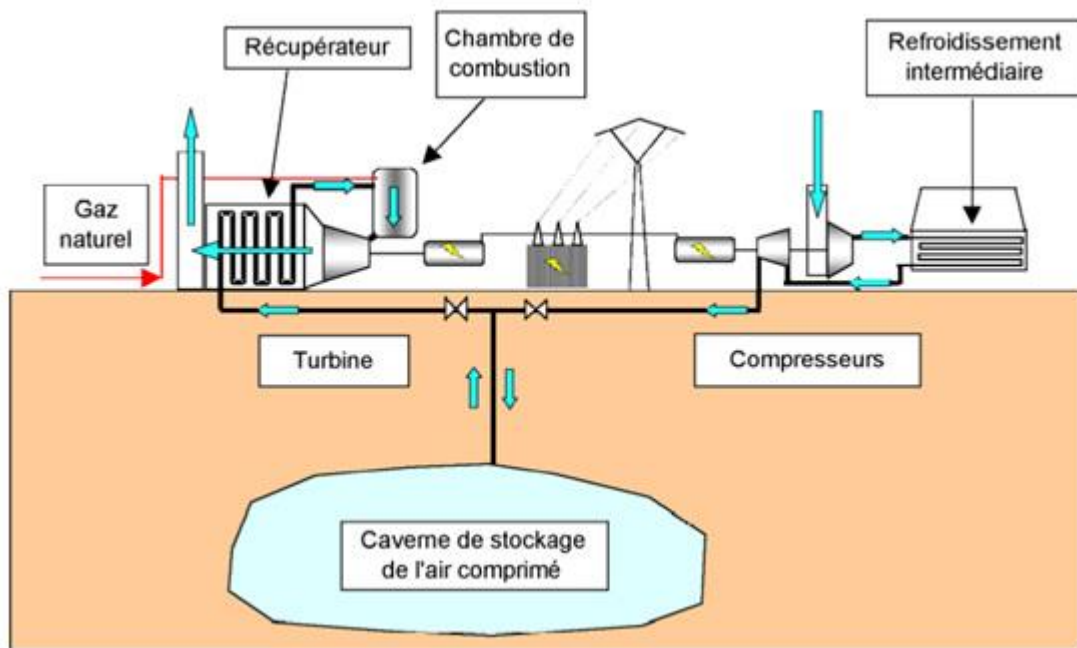


Image 24 : Le stockage d'énergie sous forme comprimé (CAES)

Le Stockage inertiel

Un volant d'inertie stocke l'énergie sous forme d'énergie cinétique à l'aide d'un rotor qui tourne à des vitesses très élevées. Sans aucun apport de courant, le rotor continue à tourner et c'est ainsi que l'énergie est stockée. Pour utiliser l'énergie, on freine la masse qui en ralentissant libère l'énergie.

Stockage par batteries électrochimiques

L'énergie électrique peut également être stockée par voie électrochimique. Il y a deux sortes de systèmes : les piles qui ne possèdent pas un usage réversible et les accumulateurs qui eux peuvent être rechargés à l'aide de réactions électrochimiques inverses. Les batteries sont pour l'essentiel utilisées dans les transports terrestres, notamment dans l'automobile comme batteries de démarrage. Une batterie est conçue par empilement de disques composés de différents éléments chimiques qui sont reliés à un système d'électronique. L'utilisation des batteries dans les réseaux a fait l'objet d'expériences à grande échelle (comme en Allemagne), pour soutenir le réseau local. Il existe plusieurs types de batteries : Batteries au plomb, Batteries lithium-ion, batteries sodium-souffre,... Il existe aussi des systèmes de stockage par batteries à circulation, qui se produit par un échange de charge entre deux électrolytes liquides.

Il existe également le stockage thermique, électromagnétique et le stockage d'énergie grâce à l'hydrogène. Mais décrire tous ces moyens de stockage nous éloigne un peu de notre sujet principal, en effet ceux-ci ne sont pas une solution rentable pour améliorer le réseau actuel pour le moment. Dans l'avenir, avec des progrès sur leur rendement par exemple, il sera envisageable d'intégrer ces moyens de stockage au réseau pour le rendre plus intelligent.

III. Limites et alternatives

1) Limites

L'envergure du projet est telle qu'un dispositif de collaboration et de concertation ayant pour objectif le développement et la valorisation de la filière Smart-Grids française a été créé. Il regroupe neuf pôles de compétitivité français spécialisés dans le domaine de l'énergie et des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication). Ce groupe a déjà investi plus de 1,2 milliards dans plus de 200 projets Smart-Grids financés ou à venir. (*smartgridsfrance.fr*)

D'après le cabinet PriceWaterHouseCoopers (missions d'audit, d'expertise comptable et de conseil), qui se base sur le retour d'expérience de projets dans 33 états où plus de 1000 compteurs intelligents sont installés chaque jour, **le coût de déploiement d'un tel réseau est non maîtrisé sur de grandes échelles**, car difficilement estimable pour l'instant. Cela pourrait impliquer un surcoût qui ne va pas de pair avec **une implication des consommateurs obligatoire**, car ce sont eux qui vont financer le projet en grande partie. Ainsi, il faut que le consommateur soit sensibilisé à la technologie des smart-grids (avantages, retour sur investissement, compatibilité avec les énergies renouvelables,...)

Le deuxième facteur est lié à la **prévision des gains**. Le coût du matériel est notamment mis en cause car il pourrait fluctuer en fonction du projet retenu. Entre aussi dans l'incertitude vis-à-vis du coût final la **difficulté du déploiement**. D'ailleurs, il est dit sur le site* que peu de projets pilotes de smart-grids ont su pour l'instant atteindre les rendements estimés.

Un autre facteur est la **gestion complexe des nouveaux acteurs** qui rejoindraient les seuls fournisseurs d'électricité. En effet, il faudrait créer des partenariats avec les centres informatiques de gestion de l'information, les producteurs locaux comme les fermes d'éoliennes, etc. Une multiplicité des intervenants dont les intérêts économiques diffèrent (entre autres) rendrait ces partenariats compliqués. (*greenit.fr*)*

Enfin, il ne faut pas oublier les risques liés au **piratage des données personnelles**. Ainsi, dans un article de *l'Expansion.com*, on apprend qu'il y a un débat sur le compteur d'ERDF « Linky » vis-à-vis de la possibilité d'intercepter les données personnelles qui traduisent les comportements habituels de façon instantanée. Car il ne faut pas oublier que le réseau sur lequel transiteraient ces données est lié à l'Internet. Cela constitue un autre problème concernant la confiance des consommateurs. Ainsi, le système devra respecter les règles imposées par la CNIL (**Commission nationale de l'informatique et des libertés**).

Sur *Smart Grids - Le Blog*, on comprend pourquoi ces informations peuvent être révélatrices de notre comportement privé. En effet, il est écrit que les fluctuations de la consommation

instantanée sont telles qu'on serait tout à fait capable de déterminer la marque d'un appareil électroménager qui vient d'être mis en marche.

En conséquence, le développement des smart-grids devrait s'accompagner du développement d'un **programme de protection des données** qui transitent.

Avec l'installation des compteurs intelligents, une certaine quantité d'informations pourront être récupérées comme cela a été expliqué précédemment. On peut donc se demander si le nombre d'informations à stocker n'est pas trop élevé par rapport aux moyens de stockage que nous possédons actuellement. Imaginons que les compteurs envoient 10 informations par seconde au data center. Admettons maintenant qu'une telle information soit le chiffre d'une consommation prenant 5 octets. Multiplions ce chiffre par le nombre de compteurs et le nombre de secondes dans une journée. Le compteur intelligent engendrerait alors le stockage de plus de 151 Téra octets de données par jour soit 55115 To de données par an, ce qui n'est pas négligeable. Nous allons donc parler du problème du stockage de données.

Le choix de la bonne méthode de stockage est régi par trois critères. Le premier critère est la taille nécessaire pour le stockage. C'est-à-dire que si nous devons stocker une information de 3 Mo, comme une musique, il n'est pas nécessaire d'acheter un serveur pour la stocker. En revanche pour stocker des quantités d'information comme dans notre cas, les serveurs vont être obligatoires pour des raisons de praticité. Le coût ainsi que la sécurité sont notre deuxième facteur à prendre en compte dans le choix du mode de stockage. Le dernier critère est la fréquence d'utilisation de notre information. Si l'information est vouée à être utilisée chaque seconde ou à rester stockée pendant des années sans qu'elle soit consultée, la fiabilité du système de stockage fait que ce critère a son importance. Depuis la révolution de l'informatique, les modes de stockage n'ont cessé d'évoluer, nous avons eu les disquettes, le CD-ROM, les clés USB et aujourd'hui ce sont les disques durs qui nous permettent de stocker le maximum de données. Ces disques durs sont regroupés pour former des baies de stockage qui sont ensuite placées dans des Datacenters. Les Datacenters correspondent à des sites physiques où se trouvent l'ensemble des éléments d'un système d'information d'une entreprise. Afin d'en savoir plus sur le coût de la société de l'information il est possible de consulter le dossier de nos collègues qui traite de ce sujet.

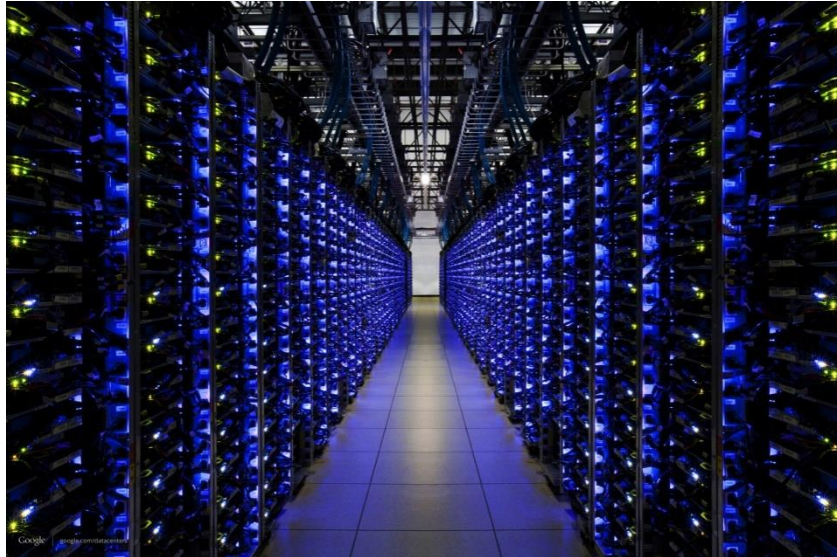


Image 25: Data Center de Google

Il est évident que le stockage des données émises par les 35 millions de compteurs nouvelle génération Linky aura un coût qui est non négligeable, que ce soit pour la mise en place d'un nouveau data center ou bien pour l'achat du matériel de stockage.

2) Alternatives

Une autre option pour rendre les réseaux intelligents ?

Nous avons vu précédemment que le stockage de l'énergie électrique est une technologie qui fait face à de nombreuses contraintes comme des contraintes géographiques, économiques, mais aussi d'efficacité. Cependant dans le domaine du stockage stationnaire d'électricité, l'utilisation des volants d'inertie semble une solution prometteuse. La société Levisys créée en 2004 porte le projet Flyprod destiné à mettre en place une ligne pilote de production de volants d'inertie d'ici 2016.

Les volants d'inertie permettent donc de convertir l'énergie électrique en énergie cinétique puis de la restituer quand nécessaire. La particularité des volants d'inertie de la société Levisys, est que ceux-ci utilisent une technologie de rupture : la lévitation magnétique passive. Cette technologie consomme très peu, quelques milliwatts, et évite les frottements lors de la rotation du rotor ce qui permet de limiter les pertes d'énergie.

Quels sont les avantages ?

Les volants d'inertie de cette société possèdent un haut rendement énergétique mais également un haut degré de sécurité, une fabrication plus simple et un faible coût d'utilisation. Un volant de ce type permettrait de délivrer 40kW en un quart d'heure. Sa

durée de vie est d'environ 20 ans et il est très facile à recycler (utilisation de fibre de carbone, d'acier, d'aimants,..)

Dans quel but ?

Ce projet doit permettre d'atteindre une stabilité maximale du réseau de distribution d'électricité, en injectant la puissance nécessaire pour que la fréquence du réseau reste la plus proche de 50 Hz.

La société envisage également de faire de la recharge rapide de véhicules électriques en un quart d'heure ou une heure sans perturber le réseau ce qui permettrait de démocratiser ce moyen de transport c'est-à-dire que ce serait un moyen de stockage flexible qui permettrait de recharger les véhicules en fonction de leur capacité à accepter une recharge plus ou moins rapide.

Un des enjeux est aussi de permettre à une zone d'activité économique de mieux gérer son énergie à base d'énergies renouvelables par l'utilisation de volants d'inertie pour gérer l'équilibre du réseau électrique.

Levisys profite des moments où la consommation d'énergie n'est pas trop importante pour stocker le surplus de production et ce surplus peut ensuite être utilisé lors des pics de consommation.

Conclusion

En France, l'électricité est l'énergie primaire la plus consommée, devant le pétrole. En effet, elle est omniprésente dans les foyers mais aussi dans l'Industrie. Pour faire face à cette demande, les moyens de production sont nombreux et variés sur le territoire. Globalement, on peut dire que la France a depuis les années 70 parié sur le nucléaire. Ainsi, le nucléaire, qui représente aujourd'hui 75% de la production totale d'électricité, constitue une base fiable. En complément, interagissent dans l'ordre, l'hydroélectricité, nettement exploitée, la production thermique à flamme, qui induit une empreinte carbonée, enfin, les énergies renouvelables de second plan, comme l'éolien et le solaire, qui se caractérisent par leur intermittence. Les centrales délivrent un régime triphasé avec une fréquence de 50Hz. Voilà ce qu'on peut dire de la production. Maintenant, en ce qui concerne le transport de l'électricité, pris en charge par RTE (réseau de transport d'électricité), la France a opté pour un système de mailles, plus sécurisant qu'une arborescence. Par contre, la distribution, encadrée par ERDF (électricité réseau distribution France), se fait via des réseaux locaux arborescents.

Aujourd'hui, le système de transport et de distribution ne semble plus concorder avec une société en pleine évolution. En effet, la population et donc la consommation en électricité augmente. De plus, notre société devient de plus en plus sensible à l'impact écologique industriel. En résultent des directives qui tendent à réduire la production issue d'énergies non-respectueuses de l'environnement. L'UE s'est par exemple engagée à atteindre une part des énergies renouvelables de 20% d'ici 2020. Enfin, on observe un essor des sources d'énergie décentralisées (GED), comme la production domestique à partir de panneaux photovoltaïques, qui pose problème à cause du caractère unidirectionnel du réseau de distribution actuel.

Face à ces changements, la solution qui semble la plus adaptée est la technologie des smart-grids (grilles intelligentes). Celle-ci repose sur les TIC (Technologies de l'Information de la Communication). Le principe est d'analyser puis de répondre d'une manière instantanée aux fluctuations localisées de la demande. Cela permet d'avoir une meilleure gestion du caractère de « non-stockabilité » de l'électricité, et de l'emploi des moyens de production intermittents. Les TIC employées seraient dans un premier cas de figure le CPL (Courant Porteur en Ligne), depuis le particulier jusqu'aux concentrateurs (data-centers), puis les informations seraient transportées numériquement par le biais de réseaux téléphoniques. Dans un deuxième cas de figure, un compteur intelligent serait installé dans chaque foyer. Il pourrait communiquer directement avec le gestionnaire du réseau. En France, on a mis à l'épreuve le compteur intelligent d'ERDF (« Linky ») à Lyon, et les résultats ont été satisfai-

sants. D'ailleurs, ils ont débouché sur un appel d'offre du gouvernement Ayrault, pour en installer 3 millions avec un objectif d'ici 2020 de 35 millions.

Mais comme tout projet, celui-ci comprend des inconvénients. A l'heure actuelle, il est difficile de prévoir l'approbation des Français ainsi que les rendements envisageables. S'ajoute à ça la difficulté de déploiement sur tout le territoire et d'autres points à étudier comme le risque de piratage des données liées à la consommation du particulier.

Au final, s'il paraît clair que les smart-grids constituent une solution capable de gérer l'évolution de la production et de la consommation, il en reste que cette technologie présente encore aujourd'hui des inconnues qu'il faudra déterminer, et ceci dans l'approche des échéances politiques concernant la transition énergétique.

Avis sur le Projet

Emilie :

Lors de la lecture des différents projets de P6, plusieurs sujets portant sur l'énergie m'ont tout d'abord intéressée. Mais c'est celui-ci, ayant pour intitulé « Réseaux électriques et énergies renouvelables : Production et transport », qui a éveillé le plus ma curiosité. Je ne savais pas encore le véritable enjeu du sujet, mais voulant intégrer le département « Energie et propulsion » l'année prochaine, il m'a semblé intéressant d'en apprendre davantage sur ces thématiques. Dès la première séance M. Vandromme nous a expliqué sur quoi portait réellement le sujet : Les smart grids. Ce projet nous a demandé une certaine rigueur, car n'ayant pas d'expériences à réaliser ou bien d'équations à résoudre, nous n'avions pas de « but » à proprement parler. La difficulté était, selon moi, de sélectionner les informations afin de ne pas se perdre dans des détails pas nécessairement intéressants pour notre sujet mais également de vérifier la fiabilité de nos sources comme celles-ci provenaient principalement d'internet.

Le sujet s'est avéré très intéressant, j'ai acquis de nombreuses connaissances qui me seront sûrement utiles dans l'avenir comme par exemple le fonctionnement du réseau électrique français ou alors les problèmes engendrés aujourd'hui par l'évolution de la consommation d'électricité. Mon seul regret vient du peu de place laissée à la créativité dans le projet.

J'ai également vraiment apprécié de travailler avec des personnes que je ne côtoyais pas avant ce projet, j'ai découvert leur façon de s'organiser et d'appréhender le sujet. Ce projet fut donc une expérience positive et constructive pour moi.

Quentin :

Pour le projet physique, j'ai choisi le sujet concernant le transport et les énergies renouvelables en raison de ma thématique qui comprend la filière Énergétique et propulsion. Cependant, je souhaite me tourner vers le département ASI, c'est pourquoi ce sujet correspondait à mon cinquième choix derrière les sujets de robotique. Évidemment, cela ne m'empêche pas d'avoir trouvé le sujet intéressant. En effet, le fait d'aborder la façon d'apporter le courant électrique à notre domicile ne m'était pas familier, ça m'a donc permis de comprendre que lorsqu'on appuie sur l'interrupteur, il y a tout une organisation qui permet cela. De plus, ce sujet correspondait à ce à quoi je m'attendais, c'est-à-dire qu'il correspondait à ce qui m'intéresse le plus au niveau énergétique, à savoir l'amélioration de ce qui existe actuellement pour une évolution plus intelligente en vue des besoins à venir, et grâce aux évolutions technologiques.

Outre l'apport de connaissances que m'a permis ce projet, il aura aussi été une expérience humaine. Bien que notre projet se soit limité à l'écriture d'un dossier, j'ai eu l'occasion de faire la connaissance de nouvelles personnes et de travailler avec, ce qui est une situation à laquelle nous devons nous habituer en tant que futurs ingénieurs.

Mathilde :

J'attendais beaucoup du projet de physique, qui, je l'espérais, m'aurait permis de conforter mon inclination pour le département Energétique et Propulsion en troisième année. J'avais donc mis dans mes choix de projet exclusivement des projets avec de l'expérimentation et/ou de la modélisation, et ainsi éviter les projets de recherche bibliographique pure, qui sont certes très intéressants mais qui sont moins tournés vers la physique. Au final, il s'est avéré que ce projet était quelque peu tourné vers la recherche bibliographique, mais j'en ai néanmoins tiré une belle expérience. Tout d'abord, le fait de mener un projet à 5, ce qui commence à devenir relativement conséquent, et qui plus est avec des étudiants que je ne connaissais pas beaucoup au départ, a été une bonne expérience. En effet, je serai confrontée dans le futur au travail en équipe avec des personnes que je ne connaîtrai pas forcément à la base, et le fait que ce projet se soit bien passé, notamment au niveau de l'entente dans le groupe, me conforte dans mon choix de projet professionnel. De plus, la nouveauté apportée par ce projet par rapport aux précédents fut la quasi-totale autonomie que nous avons eue, et qui nous a permis de tester notre organisation, notamment au niveau du calendrier.

Baptiste :

J'ai tout d'abord apprécié le caractère actuel de la problématique. En effet, étudier l'état actuel de la production et du transport de l'électricité a été enrichissant, a fortiori vis-à-vis des énergies renouvelables qui entrent dans le contexte écologique de notre époque. Ainsi, nous avons pu nous faire une idée et nous forger une opinion sur l'évolution potentielle du réseau dans un futur plus ou moins proche. D'autant plus que nous n'avons pas seulement étudié le plan technique des technologies qui seront, encore une fois, potentiellement mises en œuvre, mais aussi les domaines social, économique et politique. Mais au-delà du sujet, ce projet nous a aussi permis de vivre une nouvelle expérimentation d'organisation au sein d'un groupe. Il fallait donc gérer le temps imparti en définissant les objectifs à atteindre au cours des semaines, établir collectivement un plan, puis répartir individuellement les parties à traiter, enfin, tout mettre en commun. C'est un type de travail (collectif) qui est très commun en entreprise, et en particulier en bureau d'étude, d'où l'intérêt de l'intégrer dans la formation d'ingénieur.

Juliette :

Ce projet m'a fait prendre conscience qu'il n'était pas si simple d'intégrer les énergies renouvelables dans le mix énergétique français, et qu'il y avait encore beaucoup d'améliorations à faire avant d'y parvenir. Le remplacement du nucléaire par ces énergies est difficile à concevoir dans l'état actuel des choses : je pensais qu'elles seraient beaucoup plus simples à installer. J'ai découvert également des possibilités de stockage intéressantes, qui pourraient être une partie de la solution. Enfin, j'ai réalisé qu'avec les énergies renouvelables, il faudra aussi faire des économies d'énergie, sans quoi la transition ne pourra pas se faire correctement.

Bibliographie

[consulté le 22/02/2014] Commission de régulation de l'énergie. Réseaux publics d'électricité. <http://www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/description-generale>

[consulté le 22/02/2014] L'énergie solaire photovoltaïque : fonctionnement et raccordement des panneaux solaires. http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf

[consulté le 22/02/2014] Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur. Thèse de Boris Berseneff, de l'Institut polytechnique de Grenoble. 13/02/2010. http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/57/59/40/PDF/These_BERSENEFF_13_12_2010_v28022011.pdf

[consulté le 23/02/2014] Université de Liège. Transport et distribution de l'énergie électrique. <http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/tout.pdf>

[consulté le 25/03/2014] Union française de l'électricité. Rapport du GT « réseaux intelligents ». 2010. http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/1005_UFE_RapportGTReseauxintelligents.pdf

[Consulté le 20/03/2014] <http://www.youtube.com/watch?v=IP7e06i6Bu8>

[Consulté le 20/03/2014] http://fr.wikipedia.org/.../%C3%89nergie_hydro%C3...

[Consulté le 29/03/2014] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire#Chiffres

[Consulté le 20/03/2014] http://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges...

[Consulté le 03/04/2014] http://fr.ekopedia.org/%C3%89nergie_%C3%A9olienne

[Consulté le 03/04/2014] http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

www.cnrs.fr

www.andra.fr

www.cigéo.com

« le grand voyage de l'électricité » (c'est pas sorcier)

www.greenunivers.com

<http://energie.edf.com>

[en-direct-de-nos-centrales-45641.html](http://energie.edf.com/en-direct-de-nos-centrales-45641.html)

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php...>

article de "La Recherche, l'Actualité des sciences " (mensuel, Juin 2014, page 47) / Article de "Energie plus" Février 2014)

http://www.ufe-electricite.fr/.../brochure_synthese_ufe...

<http://www.smartgrids-cre.fr/>

<http://www.isolation-thermique.org/batiment-basse.../>

Site de la RTE

<http://www.usinenouvelle.com/.../la-france-consomme-plus...>

<http://www.franceinfo.fr/.../des-box-pour-gerer-le...>

<http://www.mag-maison-intelligente.fr>

(chaudière cogénératrice et chauffage intelligent)

<http://zoe.nouvelobs.com/.../la-voiture-electrique-sera...>

www.cnrs.fr

andra.fr

<http://www.cigéo.com>