



**Le système
électrique #4.0
au cœur des performances
de la «France 2040»**





SOMMAIRE

PARTIE 1

**Une économie
dynamique et
bas carbone**

p. 8 Une industrie innovante, moteur de croissance

p. 11 Des consommateurs acteurs et responsables

p. 13 Des transports optimisés et décarbonés

p. 15 Des territoires durables et connectés

PARTIE 2

**Le système
électrique #4.0
au coeur du mix
énergétique**

p. 20 La mutation du système énergétique et la place centrale de l'électricité

p. 23 Les mutations du système électrique de 2040

p. 27 Vers le Système électrique #4.0

PARTIE 3

**Une filière
électrique
d'excellence**

p. 33 Le développement de l'économie numérique, au cœur d'une profonde transformation de la filière électrique

p. 34 Une filière électrique dynamique et en pleine expansion

p. 36 Une filière attractive et créatrice d'emplois

p. 38 Une filière citoyenne : la Responsabilité Sociétale des Entreprises au cœur des transformations



Introduction

LE SYSTEME ELECTRIQUE #4.0 AU CŒUR DE LA PERFORMANCE DE LA « FRANCE 2040 »

Dans cet exercice de prospective, l'UFE présente sa vision du paysage énergétique de la France en 2040 tel qu'il pourrait résulter des grandes transformations de la société, de l'économie et du système énergétique intervenues entre 2015 et 2040.

Les travaux de l'UFE montrent que **croissance économique, ré-industrialisation et réduction des émissions de gaz à effet de serre peuvent se conjuguer positivement grâce au concours majeur d'un système électrique #4.0 ultra-numérisé, performant et décarboné.**

Cet exercice prospectif est volontariste, à la hauteur des ambitions de décarbonation de l'économie nationale. Il s'appuie sur une croissance économique de 1.5%/an sur la période, conformément aux prévisions établies par France Stratégie. Il peut ouvrir des voies réalistes de progrès économique, environnemental, social et industriel. En effet, le progrès et l'innovation technologique accélèrent le passage vers une société bas-carbone.

Les conditions de réussite d'une telle vision sont à portée. Elles sont fondées sur des politiques énergétiques et industrielles nationales et européennes qui sont en partie engagées, sur une régulation économique et énergétique efficace (prix du carbone...) déjà expérimentée avec succès dans certains pays ; elles passent enfin par des innovations technologiques et sociétales accessibles et à amplifier.

Cette vision d'un paysage énergétique 2040 bas carbone permet de mieux appréhender comment un système électrique #4.0 peut contribuer à une France qui retrouve le chemin de la croissance et son rang de grande nation industrielle tout en étant exemplaire sur la lutte contre le changement climatique.

Des transitions énergétique et numérique

En particulier, cette vision 2040 est le fruit de transformations engagées et conduites avec succès par l'économie française :

- Des évolutions profondes de la société et de l'économie tirant parti des initiatives dans tous les secteurs : industrie, transports, ville, territoires
- Une croissance économique et une préservation du climat rendues compatibles grâce aux nombreux fruits de l'innovation et à une mutation profonde des comportements et du système énergétique
- Un système électrique #4.0 au cœur de la modernisation du mix énergétique, qui soutient la numérisation de l'économie et permet de répondre aux enjeux essentiels : sécurité d'approvisionnement, performance carbone, compétitivité économique de l'Europe et accès pour tous à l'énergie
- Des Etats qui affirment leur dimension de stratège en définissant et en pilotant efficacement les objectifs et les instruments de régulation en matière de lutte contre le changement climatique (notamment s'agissant du CO2), les politiques énergétique et industrielles aux niveaux européen et nationaux

- Un cadre réglementaire qui favorise la mobilisation des acteurs économiques en faisant confiance à la concurrence, aux mécanismes de marché et en organisant efficacement l'utilisation et la mutualisation des ressources au sein de l'Europe interconnectée
- Enfin, une France qui a poursuivi résolument et avec succès son vaste chantier de simplification administrative.

L'électricité décarbonée au cœur d'une société de 2040 plus sobre en énergie

La vision prospective de l'UFE pour la France en 2040 est fondée sur une **maîtrise de la demande en énergie** (la demande en énergie finale passe de 2,4 Mtep par Français en 2015 à 1,8 Mtep par Français en 2040) **et une décarbonation volontariste de l'économie** (et notamment du transport) **afin de contribuer aux efforts en matière de lutte contre le changement climatique**, et de limiter au maximum la dépendance du pays aux ressources externes.

En 2040, la production d'électricité émet très peu de CO2 grâce à une part accrue de production d'origine renouvelable et au parc nucléaire. Elle contribue à la croissance décarbonée de l'économie en occupant une place centrale dans le système énergétique. Elle est l'énergie des smart-cities, des territoires durables, des nouveaux usages et de la numérisation : elle constitue une alternative durable aux énergies fossiles et en particulier au charbon et au pétrole.



Une économie dynamique et bas carbone

Dans la vision prospective de l'UFE, la France de 2040 a réussi à maintenir sa croissance économique dans un environnement international de plus en plus concurrentiel (le PIB du pays a cru de 1,5 %¹ par an sur la période 2015/2040). Elle a su adapter des pans importants de son économie en développant ses atouts industriels, et tirer profit des apports des technologies numériques innovantes. Le maintien d'un niveau de richesse conséquent a permis de diminuer significativement les émissions de gaz à effet de serre² et d'améliorer l'intensité énergétique qui est passée de 74 tep/M€PIB à 41 tep/M€PIB, soit un gain de 45 % sur la période.

Le mix énergétique a été transformé, avec un recours limité aux énergies fossiles - en particulier une réduction significative de l'utilisation de produits pétroliers, et avec une place centrale de l'électricité qui constitue le vecteur énergétique des transformations du XXI^e siècle aussi bien pour les applications dans le numérique, que dans les transports ou le quotidien des territoires.

1. La valeur de croissance de 1,5%/an correspond à la valeur retenue par France Stratégie dans le cadre de ses études de prospective à long terme.
2. Source : estimation UFE. Dans la vision de l'UFE, les émissions de GES ont donc diminué de 60 % en 2040 par rapport à 1990 essentiellement sur le secteur de l'énergie. Les émissions de gaz à effet de serre du pays sont maintenant à 233 MtCO₂eq en 2040.

En 2040

la France aura évolué vers une économie dynamique et bas carbone...

Une industrie innovante, moteur de croissance

- La part de l'industrie dans le PIB est de 14 % en 2040, contre 12,5 % en 2015. La valeur ajoutée de l'industrie a augmenté de 70 %
- L'industrie dispose d'un approvisionnement en énergie compétitif
- La croissance économique a nettement favorisé le développement des technologies bas carbone
- Les émissions de CO2 de l'industrie ont diminué de 70 % grâce au progrès technique

Des consommateurs acteurs et responsables

- La richesse par habitant augmente de 35 %, ce qui représente environ 10.000 €₂₀₁₅/habitant supplémentaires comparé à 2015
- La consommation d'énergie par équipement est réduite de 20 % à 30 % en moyenne
- Le numérique est présent dans toutes les strates de la société : objets connectés, achats en ligne, optimisation des process industriels

Des transports optimisés et décarbonés

- Les déplacements de personnes ont augmenté de 30%
- La consommation finale d'énergie du secteur des transports a baissé de 40 %
- Les émissions de gaz à effet de serre liées au transport de voyageurs ont diminué de 65 %
- 15 millions de véhicules électriques ou hybrides sont en circulation

Des territoires durables et connectés

- La France compte 71 Millions d'habitants (65 Millions en 2015)
- La consommation d'énergie finale des bâtiments est améliorée de 30 à 40 % et l'usage du fioul pour le chauffage des logements a quasiment disparu
- Eco-quartiers, smart-cities, bâtiments durables structurent les territoires et leurs besoins énergétiques
- La satisfaction des besoins en énergie des territoires tient compte de l'optimisation de l'ensemble du système énergétique

...à condition que

**dès à présent,
la France...**

Favorise l'innovation

- La France doit augmenter les financements dédiés à la R&D pour innover encore plus et prétendre à l'excellence de son industrie.
- Les filières de formation doivent être adaptées aux exigences d'une économie décarbonée et aux besoins de son industrie.

Améliore l'intensité énergétique et carbone de l'ensemble de l'économie

- La France doit réduire les usages des combustibles fossiles, notamment du pétrole et du charbon, au profit des énergies les moins carbonées, comme l'électricité
- Cela requiert la mise en place d'une stratégie bas carbone au travers d'un signal prix du CO2 élevé, présent dans l'ensemble de l'économie
- Les projets compétitifs de captage du carbone (CCS) qui permettent de réduire les émissions de CO2 doivent être encouragés

Relève, pour le secteur du transport, les défis économiques, technologiques et sociaux du XXIème siècle

- La France doit se positionner comme pionnière de la mobilité bas-carbone au niveau international
- La mobilité bas carbone nécessite des investissements dans les infrastructures de recharge et d'approvisionnement des véhicules pas ou peu carbonés (électriques et gaz)
- Le secteur automobile doit innover dans le développement des batteries pour véhicules électriques

Mette en place un cadre stable

- Les pouvoirs publics doivent offrir aux entreprises une visibilité réglementaire et fiscale à moyen et long termes favorisant les plans d'investissements nécessaires

Adapte le système énergétique aux défis de la ville et des territoires durables

- L'industrie énergétique doit développer une offre diversifiée pour répondre aux attentes des clients, des entreprises et des collectivités et de l'ensemble de la société: solutions et services d'efficacité énergétique, compétitivité, sécurité d'alimentation, production décarbonée
- La répartition des responsabilités énergétiques entre villes et territoires doit être adaptée aux défis de la stratégie bas carbone
- La gouvernance en matière de données doit être clarifiée

Développe des filières d'excellence

- L'industrie doit être orientée vers les filières d'excellence pour renforcer les atouts de la France au niveau mondial : énergie, équipements électriques et électroniques, chimie fine, textile intelligent, automobile électrique et hybride...
- Les outils du numérique doivent être systématiquement intégrés aux améliorations des chaînes de production
- La France doit miser sur l'agilité, le savoir-faire et la créativité des start-up françaises spécialisées dans le numérique et la conception de logiciels afin de réussir le défi de la numérisation des usines pour l'émergence et la généralisation de l'industrie 4.0

Partie I

Une industrie innovante, moteur de croissance

Une industrie prospère qui investit fortement en R&D

L'industrie française s'est organisée pour améliorer sa compétitivité et pour limiter les émissions de gaz à effet de serre :

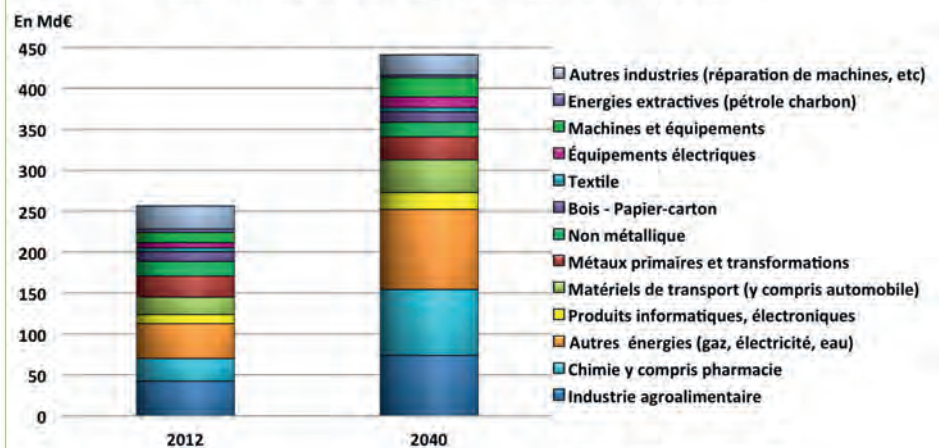
- elle a intégré la généralisation du numérique,
- elle a réalisé d'importants efforts pour réduire son intensité énergétique,
- elle s'est orientée vers des filières de pointe utilisant peu d'énergies carbonées,
- elle a favorisé l'usage d'une électricité décarbonée par rapport aux autres énergies.

Dans un contexte économique favorable, la valeur ajoutée des industries françaises a progressé de plus de 70 % en 2040 par rapport à 2015

Le procédé « M to M »

le système de communication directe entre machines (dit procédé « M to M », pour « *machine to machine* ») permet d'optimiser la chaîne de production, les machines envoyant des signaux entre elles pour s'auto-informer de l'avancée des produits sur la chaîne de production, mais aussi s'auto-avertir en cas de détection d'une anomalie dans le processus de production. Cela permet également d'intégrer des maillons plus éloignés de la chaîne de valeur de l'industrie traditionnelle, comme les services de logistique et de distribution des marchandises, informés en temps réel de l'avancée de la production des biens.

Evolution de la valeur ajoutée de l'industrie



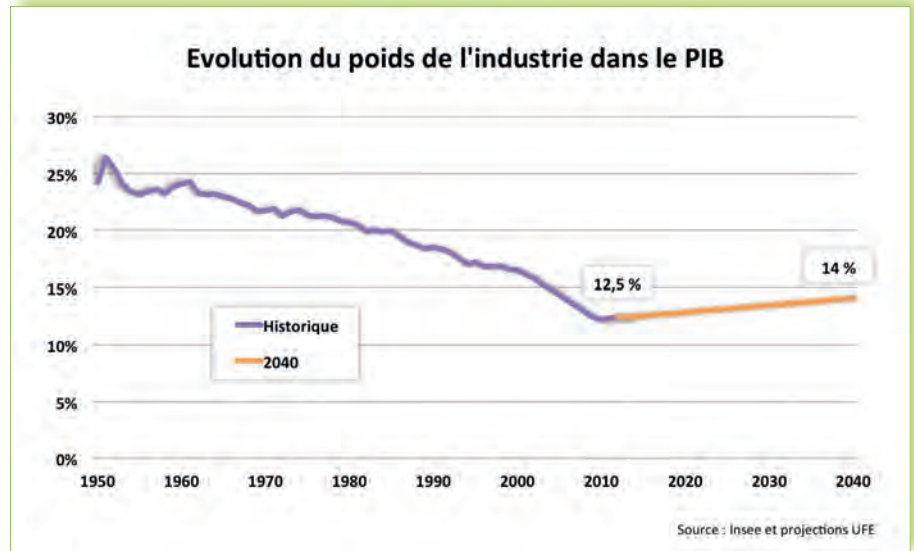
Sources : Insee et projections UFE

La numérisation restructure de fait l'ensemble des processus économiques. Les interactions entre les différentes étapes de conception, de production et de distribution d'un produit sont plus fréquentes du fait de la standardisation de l'information et de sa fluidité. Le modèle historique de l'industrie, qui reposait sur l'existence d'intermédiaires entre le producteur et le consommateur, a été progressivement abandonné **au profit d'un modèle mettant en lien direct le producteur et le consommateur : on parle désormais d'« industrie 4.0 »**. De ce fait, certaines étapes, comme la logistique et la distribution des produits, sont désormais intégrées à l'industrie. Chaque processus économique a été modifié au fur et à mesure de l'intégration des possibilités offertes par le numérique.

La généralisation de la numérisation a permis d'augmenter la productivité, de baisser les coûts opérationnels, et d'augmenter la sécurité au travail. Ces améliorations ont redonné à la France une place de choix dans la compétition économique internationale et permettent de soutenir la croissance économique du pays.

L'industrie a accru son poids dans la création de richesses du pays (14 % du PIB) en 2040, contre 12,5 % en 2015.

Avec une hypothèse de croissance économique régulière sur la période 2015-2040 (+1,5 % PIB/an), le poids de l'industrie atteint 14 % du PIB en 2040



Au-delà même du volume d'énergie consommé, ce sont les types d'énergie utilisés qui ont évolué

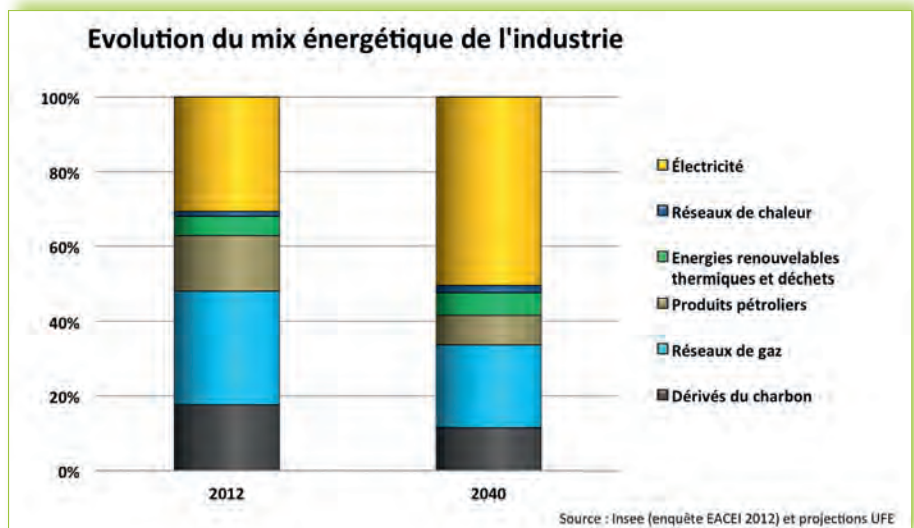
En outre, les innovations technologiques généralisées dans le secteur industriel permettent **une amélioration notable de l'intensité énergétique de la production industrielle³** : elle a baissé de 1,4 % par an en moyenne sur la période 2015-2040, contre 1,1 % par an observé sur la période 2001-2012⁴.

D'une part, les secteurs de pointe utilisent très peu d'énergies carbonées (en particulier issues du pétrole et du charbon) et mobilisent une quantité importante d'électricité (chimie fine, textile intelligent, matériaux du futur, ...).

D'autre part, **des transferts d'usages ont été réalisés des énergies les plus carbonées vers les énergies décarbonées, en particulier l'électricité**, permettant une meilleure précision dans les process et en améliorant leur efficacité énergétique (par exemple, des pompes à chaleur récupèrent la chaleur des effluents thermiques dans les sites industriels et évitent du chauffage à partir de combustibles fossiles). L'industrie française est maintenant déployée sur des filières faiblement carbonées et de pointe, profitant en outre des apports du numérique.

Des avancées technologiques ont permis la mise en place de dispositifs de capture du dioxyde de carbone (équipement CCS). Le secteur industriel utilise ces dispositifs. Cela permet d'améliorer davantage le bilan carbone du secteur industriel : celui-ci s'établit à 37 MtCO₂éq en 2040 (23 Mt avec prise en compte du CCS), contre 75 MtCO₂éq en 2015 (baisse de 50% des émissions de CO₂ liées à l'industrie ou de 70% avec installation d'un CCS).

Les nouvelles technologies ont permis de réduire fortement le recours aux énergies les plus carbonées (pétrole et charbon). L'électricité est devenue l'énergie la plus consommée dans l'industrie en 2040

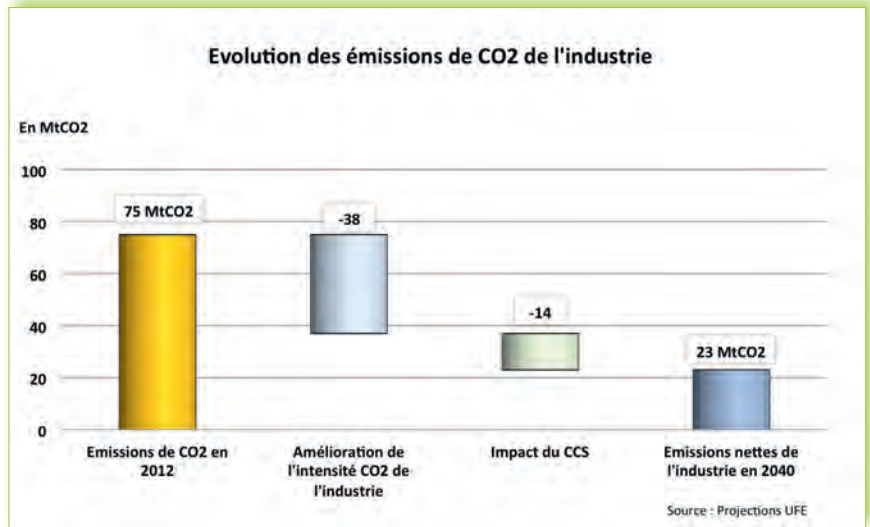


3. L'intensité énergétique est un indicateur désignant le rapport entre la consommation énergétique d'un pays et son produit intérieur brut (PIB). Elle mesure le degré d'«efficacité énergétique» d'une économie. Cet indicateur peut aussi être appliqué par secteur : transports, industrie, etc.

4. Source : étude du SoeS (CGDD) « L'intensité énergétique a baissé dans l'industrie entre 2001 et 2012 », juillet 2014.

En 2040, l'électricité est l'énergie la plus utilisée par l'industrie, suivie par le gaz. Largement décarbonée en France, l'électricité permet de réduire significativement l'intensité carbone de la production industrielle française.

Les ruptures technologiques dans le secteur industriel, accompagnées d'un transfert des énergies les plus carbonées vers l'électricité, permettent de réduire de plus de la moitié les émissions de CO₂ du secteur industriel



SYNTHESE EN CHIFFRES En 2040, dans l'industrie



+70%
de valeur ajoutée créée



-1,4 %/an
d'intensité énergétique



1^{ère} énergie :
l'électricité



-70 %
d'émissions de CO₂



Des consommateurs acteurs et responsables

De manière générale, la numérisation concourt à plus de rationalisation, une meilleure optimisation des achats et livraisons, et est source d'innovations technologiques et d'amélioration du quotidien

■ Des achats plus responsables et moins énergivores

La richesse par habitant de la France s'est accrue dans le contexte de croissance économique continue de 2015 à 2040. En parallèle, la manière de consommer - aussi bien celle des ménages que celle des entreprises - s'est modifiée. **Tous cherchent à consommer mieux pour réduire la pollution et préserver le climat. Les produits locaux** sont désormais majoritaires dans l'alimentation et les **produits européens** sont privilégiés pour les biens d'équipement ou de consommation courante. Les circuits de distribution sont optimisés au maximum, notamment en ce qui concerne la logistique du dernier kilomètre.

La numérisation a changé la manière de consommer des ménages. À l'ère du « tout numérique », de nouveaux comportements d'achat sont en place, **comme la généralisation des commandes via internet qui permet d'optimiser la livraison des produits et de réduire leur coût d'achat**. Ils font partie en 2040 des modes de consommation quotidiens.

La **performance énergétique des produits** en eux-mêmes s'est largement améliorée par rapport à 2015 : les innovations technologiques, encouragées par les normes européennes et poussées par la concurrence internationale, ont conduit à une forte amélioration de l'efficacité énergétique d'un grand nombre de produits électriques (électroménager, équipements informatiques...), avec une réduction de la consommation unitaire d'énergie de l'ordre de 20 à 30 % en moyenne⁵.

■ L'émergence de nouveaux usages liés aux technologies de l'information et de la communication

En 2040, les technologies de l'information et de la communication sont faciles d'accès et sont utilisées quotidiennement par l'ensemble de la population. Ces moyens technologiques, accompagnés de la généralisation d'un ultra haut-débit, permettent de nouveaux usages de produits électroniques et informatiques. Ils nécessitent l'implantation de larges centres de stockage de données (data centers) au vu du volume important d'informations collectées et devant être stockées.

Dans les services, de nouvelles prestations dématérialisées sont fréquemment utilisées, limitant les déplacements : consultation de médecins à distance (le médecin reçoit en temps réel les principales informations physiologiques grâce à des capteurs corporels connectés), commande et livraison automatiques de courses alimentaires au supermarché (grâce aux signaux envoyés par le réfrigérateur), etc. Une part devenue non négligeable de robots assiste également les ménages au quotidien (réception et accueil dans les hôtels, aide-ménagère à domicile, etc).



SYNTHESE EN CHIFFRES En 2040



+ 35 %
richesse des ménages



-20 %
consommation d'énergie
par équipement



+ 50 TWh
d'électricité liés au
numérique

Et si la croissance n'était pas au rendez-vous ?

Dans le cas d'une croissance atone sur une longue période, les ménages s'appauvrissent et tendent à restreindre leurs dépenses.

Néanmoins, compte tenu de l'accroissement de la population à horizon 2040 (+6 millions de personnes en France métropolitaine) et du développement rapide du numérique dans nombre de secteurs d'activités, l'équipement et les usages d'appareils électroniques et informatiques a significativement augmenté par rapport à 2015.

Dans ce contexte, **même en cas de croissance économique très faible sur la période 2015-2040, l'électricité reste toutefois l'énergie centrale au cœur des usages de 2040, étant donnée la place prépondérante prise par le numérique dans la société.**

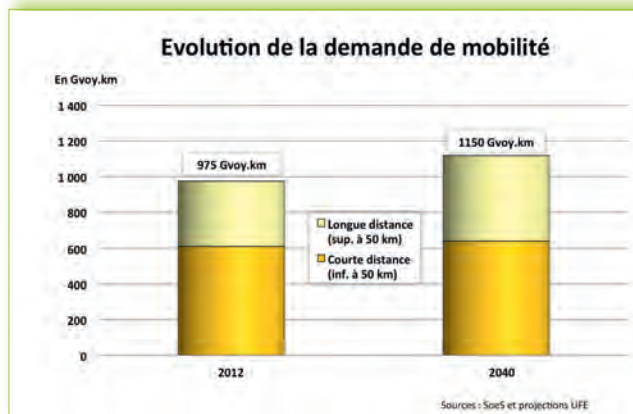
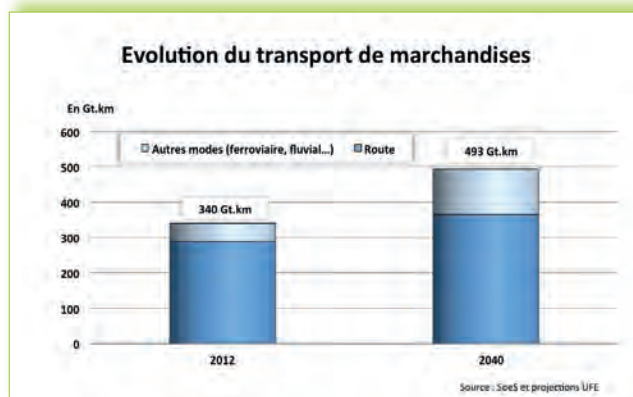


Des transports optimisés et décarbonés

L'évolution du besoin de transport

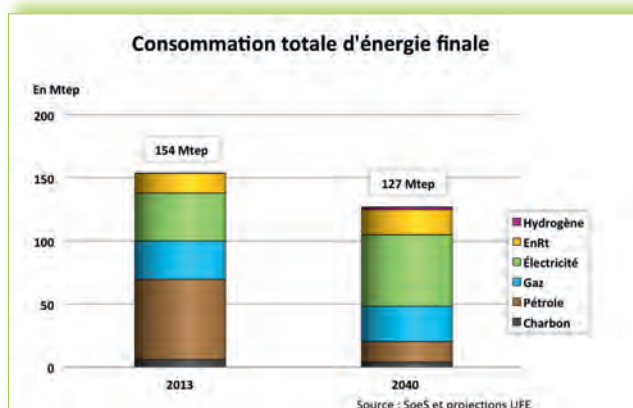
Dans un contexte de dynamisme économique et démographique, l'activité de transport de marchandises (exprimée en Gtonnes.km) et de passagers (exprimée en Gvoyageurs.km) a augmenté par rapport à 2012, malgré la rationalisation des déplacements.

La croissance économique, combinée à l'évolution démographique, a entraîné une augmentation des déplacements, que ce soit pour le transport de marchandises ou pour les voyageurs



Grâce aux nouvelles technologies de transport, la place du pétrole dans le transport a reculé fortement, au profit de l'électricité (en particulier pour les véhicules individuels ou légers et pour les transports en commun) et du gaz (en particulier pour les véhicules de transport de marchandises sur longue distance).

Grâce aux nouvelles technologies de transport, la place du pétrole dans le transport a reculé fortement, au profit de l'électricité et du gaz



Les transports de voyageurs

La mobilité courte distance – inférieure à 50 km, ou urbaine – de voyageurs s’appuie sur les réseaux de transport en commun (métro, tramway, bus électriques voire gaz), des véhicules électriques (15 millions de véhicules électriques ou hybrides rechargeables en circulation), et des modes de transport doux (vélo, marche à pied) de plus en plus plébiscités. Les services d’auto partage se sont développés comme une alternative à la possession d’un véhicule, notamment grâce à l’essor du véhicule électrique autonome qui améliore la disponibilité des véhicules là où sont les besoins. L’optimisation des déplacements et des recherches de places de stationnement a conduit à réduire les émissions de CO₂⁶.

Enfin, le transport aérien amorce sa mutation vers une diminution sensible de la consommation en carburants fossiles (généralisation, sur les nouveaux modèles d’avions, de moteurs plus économes en carburant, avec une baisse de l’ordre de 20 % de la consommation de kérosène ; mise en place du roulage électrique dans les aéroports ; développement du green taxiing pour éviter la combustion de kérosène lors du déplacement des avions au sol).

En 2040, la consommation totale d’énergie finale requise pour le transport de voyageurs est diminuée de moitié par rapport à 2015 (12 Mtep contre 28 en 2014), alors que, dans le même temps, les déplacements effectués ont augmenté.

Le transport longue distance de voyageurs s’appuie sur un parc de véhicules consommant en moyenne 2 litres de carburant pour 100 kilomètres et sur de nouvelles lignes de train à grande vitesse

La digitalisation a permis une rationalisation de la logistique du dernier kilomètre en profitant de la centralisation de l’information associée aux commandes passée via le e-commerce

Le transport de marchandises

Le transport de marchandises a achevé sa mutation. Sur les courtes et moyennes distances, le recours à des véhicules utilitaires électriques s’est généralisé. Sur les longues distances, l’usage du gaz naturel et du biogaz (qui peut comprendre une part d’hydrogène) est privilégié pour les camions et pour le transport fluvial ; le fret ferroviaire est également en croissance, en coopération avec les pays européens voisins.

En outre, la numérisation a permis une rationalisation de la logistique du dernier kilomètre en profitant de la centralisation de l’information associée aux commandes passées via le e-commerce.

SYNTHESE EN CHIFFRES En 2040



+30 %
déplacements
des personnes
en France



40 %
de baisse de la
consommation d’énergie
finale du transport



15 millions
de véhicules
électriques et hybrides
en circulation



- 65 %
d’émissions de gaz à
effet de serre liées au
transport de voyageurs

6. Chaque place de stationnement représente 1 tonne d’émissions de CO₂ par an en 2015 du fait du manque d’optimisation des déplacements (étude PARKEON 2014).



Des territoires durables et connectés

Exemple concret d'un éco-quartier : la commune de Roquebrune-Cap-Martin

L'éco-quartier « Cap Azur » est né de l'initiative de la commune de Roquebrune-Cap-Martin de transformer un terrain industriel désaffecté de 7 hectares en espace de vie et de travail répondant aux objectifs de mixité sociale et d'exemplarité environnementale. 7 Bâtiments Basse Consommations (BBC) abritant 200 logements (dont plus de la moitié de logements sociaux), une crèche, une résidence de tourisme avec piscine et des espaces de bureaux ont été construits. Ils utilisent une production de chaleur économe et éco-responsable. Son principe repose sur la récupération d'énergie issue des eaux épurées de la nouvelle station d'épuration HQE (Haute Qualité Environnementale) à une température d'environ 15°C à 20°C et située à environ 500 m du quartier. Cela est possible grâce à des pompes à chaleur situées dans chacun des bâtiments, capables de pomper les calories et de produire aussi bien du chaud que du froid. Ainsi, pour 1 kWh d'énergie électrique consommé pour la valorisation des calories prélevées sur la boucle d'eau tempérée des eaux épurées, les pompes à chaleur produisent 4 kWh de chaud et/ou 4,5 kWh de froid. Par ailleurs, le système mis en place permet de satisfaire 100% des besoins de l'éco-quartier en chauffage, eau chaude sanitaire et rafraîchissement.

Le bâtiment durable

En 2040, le nombre de logements mal isolés a fortement diminué, grâce aux nombreuses rénovations réalisées entre 2015 et 2040⁷. Le recours au fioul domestique pour le chauffage a quasiment disparu, au profit de modes de chauffage beaucoup plus performants et moins émetteurs de CO₂ : pompes à chaleur, chauffages électriques performants, chauffages au gaz performants, poêles ou chaudières à bois, chauffages à partir des réseaux de chaleur alimentés par des ressources énergétiques non émettrices de CO₂ (biomasse ou pompes à chaleur).

Les **bâtiments durables**, qu'ils soient de type résidentiel, tertiaire privé ou public sont quasiment généralisés. Ils sont isolés avec des matériaux performants et sont équipés de technologies de pilotage des appareils consommateurs d'énergie.

Du fait du dérèglement climatique, les périodes de forte chaleur sont devenues plus fréquentes et la climatisation dans les logements fait partie du confort de base. Les systèmes de climatisation reposent sur des technologies individuelles à faible consommation énergétique, ou sur des réseaux urbains de froid.

La numérisation s'est étendue, aussi bien aux logements qu'aux bureaux et bâtiments tertiaires. Tous les usages électriques (électroménager, électronique, chauffages électriques, éclairage, etc) et non électriques (autres modes de chauffage), sont pilotables à distance. L'utilisateur peut les programmer selon ses besoins et en toute simplicité, ce qui permet d'optimiser l'usage des équipements et ainsi de réduire la consommation d'énergie.

Au final, le bâtiment de 2040 consomme très peu d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou pour les usages spécifiques d'électricité. Il peut même être auto-suffisant en énergie – voire producteur d'électricité - s'il est équipé de moyens de production d'électricité (photovoltaïque par exemple) et de moyens de stockage d'énergie lui permettant de répondre à tout moment à ses propres besoins de consommation.

Dans le secteur tertiaire, les mesures d'efficacité énergétique sur les équipements informatiques ont réduit considérablement la consommation d'énergie. La chaleur dégagée par les centres de stockage des données (data centers), très répandus du fait de la croissance importante des utilisations numériques, est récupérée autant que possible pour alimenter les réseaux de chaleur. Le secteur a également investi dans des outils de pilotage actif de la demande, rationalisant sa consommation énergétique.

Au total, en 2040, **les innovations dans les matériaux pour la construction (matériaux à changement de phase, vitrages isolants et chauffants, matériaux traditionnels enrichis de capteurs, peintures chauffantes ...)** et **les innovations technologiques sur les équipements ont permis de réduire de 30 % à 40 % la consommation d'énergie du bâtiment résidentiel par rapport à 2015**. Ces innovations s'ajoutent aux technologies solaires intégrées au bâtiment lorsqu'elles sont compétitives. Pour le secteur tertiaire, la consommation unitaire d'énergie a diminué de l'ordre de 30 %/m² par rapport à 2015.

7. Source UFE à partir de l'analyse de Carbone 4. Les hypothèses retenues sont un rythme de rénovations lourdes de 450 000 logements par an, 1,5 million de rénovations légères par an, et un taux de destruction du parc ancien de 0,2 % par an.

L'implication des territoires

Les territoires jouent un rôle important dans un système énergétique plus sobre.

Les plateformes territoriales sont en place et accompagnent les ménages dans de nouvelles démarches d'efficacité énergétique en assurant une mission d'accueil, d'information et de conseil intégrant les dimensions techniques, financières et fiscales.

Dans l'espace public, les usages énergétiques sont optimisés, notamment en ce qui concerne l'éclairage public (la consommation unitaire a été réduite de moitié par rapport à 2015). En particulier, les dispositifs d'éclairage public modifient leur intensité en fonction de l'activité.

Les réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur constituent en 2040 une part croissante du système énergétique⁸. Ils sont alimentés via des sources non carbonées (biomasse pour une large part, qui est ainsi majoritairement utilisée pour son usage le plus efficace - l'usage chaleur - dans un contexte de contraintes sur la ressource). Ils sont couplés aux réseaux de distribution d'électricité. En effet, les réseaux de chaleur profitent du surplus de production électrique en provenance des EnR intermittentes (éolien, photovoltaïque), en stockant l'énergie, de manière mutualisée à un quartier/plusieurs bâtiments, en prévision des pointes de consommation journalières. De même, le potentiel calorifique des grands ensembles immobiliers (gares, hôpitaux, bâtiments publics, centres de retraitement des eaux usées, ...) fait l'objet d'une récupération systématique afin d'alimenter les réseaux de chaleur. De surcroît, les réseaux de gaz bénéficient aussi des surplus de production intermittente pour la génération d'hydrogène injecté dans le réseau, lorsque le procédé est compétitif. Ainsi, la gestion complémentaire coordonnée à distance des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur permet d'optimiser l'approvisionnement énergétique des quartiers et des villes.

Les réseaux de chaleur constituent en 2040 une part croissante du système énergétique

SYNTHESE EN CHIFFRES En 2040



71 millions
de personnes
(65 Millions en 2015)



- 30 à 40 %
consommation d'énergie
finale des bâtiments

Et si la croissance n'était pas au rendez-vous ?

Le développement de grandes métropoles françaises réparties de manière équilibrée sur l'ensemble du territoire repose sur l'hypothèse d'une croissance économique de +1,5%/an sur la période 2015-2040.

Dans le cas d'une croissance atone sur une longue période, beaucoup de projets d'envergure ne pourraient pas voir le jour, faute de moyens publics et privés. Le développement de la ville durable serait retardé ; les innovations technologiques permettant de réduire fortement la consommation d'énergie dans le bâtiment ne seraient que peu appliquées, en raison de leur coût et du manque de ressources. Le développement des réseaux de chaleur et des énergies renouvelables serait également sensiblement moindre.

8. On suppose un doublement de leur production d'énergie en 2040 par rapport à aujourd'hui, soit une production de 6,5 Mtep (77 TWh) en 2040 contre 3 Mtep (35 TWh) en 2013.



Le système électrique #4.0 au coeur du mix énergétique

Dans
la France de 2040,
l'électricité joue un rôle
renforcé par rapport à 2015.
Les nouveaux produits
fonctionnent grâce à l'électricité
(comme force motrice, ou pour transporter ou
stocker de l'information).
Etant très peu émettrice de gaz à effet de
serre (GES), cette électricité permet ainsi de
décarboner plus largement encore la société
française.

En 2040

le système énergétique aura muté vers plus d'électricité...

L'électricité au cœur du système énergétique

- La part élevée de l'électricité décarbonée dans la consommation d'énergie est un atout pour le dynamisme de l'économie française
- Les transferts d'usage des énergies fossiles vers l'électricité décarbonée contribuent à la diminution de 75 % de la consommation de produits pétroliers en France
- Les émissions de CO2 liées à l'énergie sont réduites de 75 %
- Les efforts d'efficacité énergétique permettent de réduire la consommation finale d'électricité d'environ 160 TWh, hors transferts d'usages
- Au total, la consommation finale d'électricité se situe autour de 650 TWh, soit 45 % de la consommation d'énergie finale (contre 25 % en 2015)

Les innovations du système électrique de 2040

- La numérisation permet de piloter très finement la demande d'électricité et de diminuer les coûts au bénéfice des clients
- Les coûts moyens d'approvisionnement à partir des différentes filières convergent vers 70 à 100 €/MWh
- Le stockage se développe pour faire face à la variabilité de la production intermittente

Vers le Système électrique #4.0

- Un mix électrique décarboné : en complément d'un socle de production nucléaire, le potentiel hydraulique est utilisé à plein, les capacités éoliennes et photovoltaïques ont été fortement développées
- Les réseaux de transport et de distribution jouent un rôle de plateforme facilitatrice de la mise en œuvre du système électrique #4.0
- L'architecture du marché intérieur européen est efficace : elle est pleinement concurrentielle, permet une mutualisation optimisée des ressources et garantit la sécurité d'approvisionnement

...à condition que

**dès à présent,
la France...**

Développe les technologies basse consommation et peu émettrices de CO2

- La puissance publique doit inciter les transferts d'usages du pétrole vers l'électricité décarbonée, en particulier dans les secteurs du transport et du bâtiment
- La puissance publique doit encourager les innovations technologiques et numériques dans les équipements électriques et les appareils de chauffage
- Un signal prix du CO2 fort doit être instauré afin d'inciter l'ensemble des consommateurs à investir dans les technologies les moins émettrices

Anticipe l'évolution croissante de la demande d'électricité liée à l'essor des outils numériques, informatiques et robotiques

- La puissance publique doit veiller au développement d'un mix de production électrique équilibré, capable d'assurer une qualité et une fourniture d'alimentation constante à un coût compétitif
- L'industrie doit miser sur l'opportunité du numérique pour renforcer l'attractivité de la France en matière d'électricité : production bas carbone compétitive, réseaux intelligents, solutions énergétiques innovantes

Cible les mesures d'efficacité énergétique

- Il est essentiel de hiérarchiser l'ensemble des actions d'efficacité et privilégier prioritairement les actions d'économie d'énergie présentant le meilleur rapport « coût/efficacité » avec un temps de retour sur investissement raisonnable
- L'indicateur le plus approprié d'une politique bas carbone est le coût de la tonne de CO2 évitée

Complète l'organisation du marché de l'électricité européen

- Le marché intérieur européen doit permettre de sécuriser l'approvisionnement en électricité à moyen et long terme en encourageant la mise en place de mécanismes de capacité complémentaires au marché de l'énergie

Organise la gestion du big data

- La gouvernance de la data doit intégrer la sécurité des données dans ses dimensions protection de la vie privée et cyber-sécurité comme corollaires essentiels du développement du numérique



Partie II

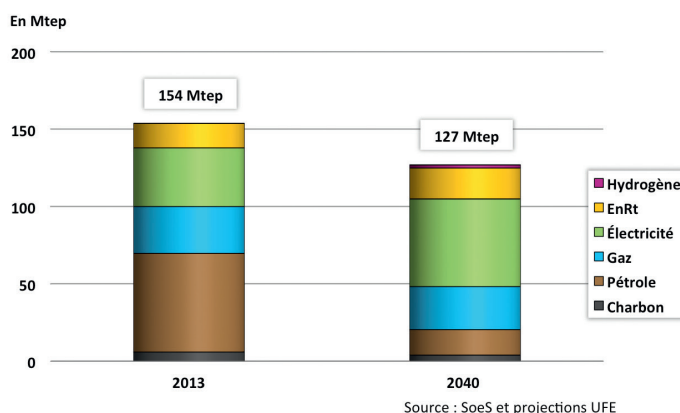
La mutation du système énergétique et la place centrale de l'électricité

Le progrès technique et les signaux de prix (notamment le signal-prix du carbone, cf. infra) favorisant de nouvelles manières de consommer et de produire, ils permettent de combiner progressivement croissance économique et baisse des émissions de gaz à effet de serre en provoquant une réduction de la consommation d'énergies fossiles. Les innovations technologiques et l'extension de la numérisation à tous les secteurs économiques, associées à une modification progressive des usages, ont permis de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'intensité énergétique d'une économie nationale plus dynamique. L'énergie consommée en 2040 est désormais fortement décarbonée et repose largement sur une électricité produite en France.

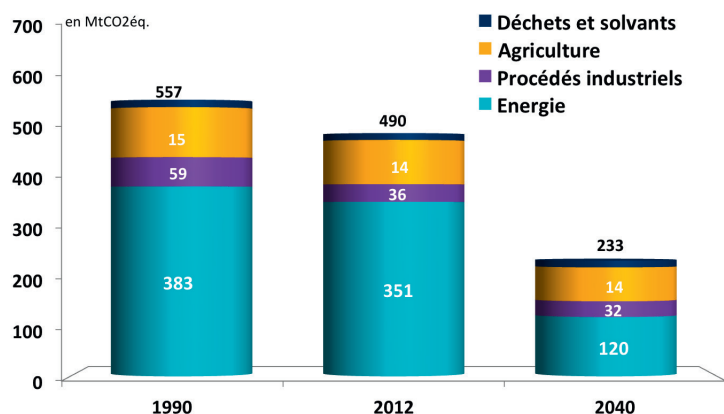
En 2040, les ruptures technologiques générées par la croissance économique ont permis de réduire de 28 Mtep la consommation d'énergie totale, soit -20 % environ par rapport à 2012.

Cela se répercute directement sur les émissions de gaz à effet de serre générées par la combustion d'énergie, qui ont reculé de 66 % en 2040 par rapport à 2012

Consommation totale d'énergie finale



Émissions de GES totales de la France*



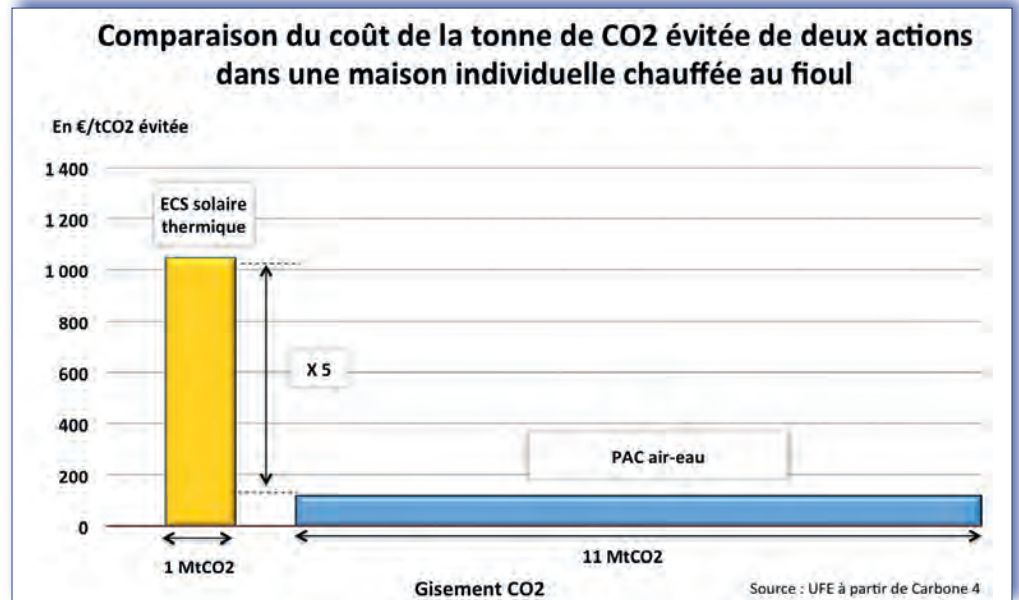
* comptabilisation hors UTCF

Source : SoeS 2015 et projections UFE

La France investit dans les technologies bas-carbone

Le signal-prix du CO₂, transmis à l'ensemble des consommateurs finaux via le prix de marché du CO₂ ou via la fiscalité⁹, est devenu le véritable élément déclencheur des décisions d'investissements permettant la transition vers une économie sobre en carbone (actions d'efficacité énergétique, énergies renouvelables, procédés industriels propres et innovants, etc.). Certains équipements devenus compétitifs du fait du prix du CO₂ ont été largement diffusés¹⁰.

Le coût de la tonne de CO₂ évitée de l'ECS solaire thermique est 5 fois plus élevé que celui de la PAC air/eau. Autrement dit, avec le même montant investi, l'installation de PAC air/eau procure une réduction des émissions de CO₂, 5 fois plus importante que l'installation d'ECS solaire thermique



L'électricité occupe une place centrale

L'électricité est la principale énergie de la France de 2040 car elle est :

- **l'énergie du territoire** : la ville durable s'est déployée, des moyens de production d'électricité d'origine renouvelable (éolien, photovoltaïque) sont installés aux périphéries ou au cœur des villes avec, notamment, l'installation de panneaux solaires en toiture. La gestion de l'intermittence de la production électrique renouvelable est facilitée par le développement du stockage et par la numérisation des usages (qui permet un pilotage plus fin des consommations).
- **l'énergie des transferts d'usages** : dans les transports et dans l'industrie, le basculement de l'utilisation du pétrole vers des sources d'énergie non carbonées a conduit également à accroître la place de l'électricité dans la demande d'énergie.
- **l'énergie des nouveaux usages et de la numérisation** : si les innovations technologiques réalisées par les équipements électriques destinés à l'industrie (moteurs, robots, fours...) ou aux ménages (appareils électroménagers, équipements informatiques et audio-visuels...) ont permis la réalisation d'économies d'énergie grâce à l'efficacité énergétique, en 2040, la consommation d'électricité chez les utilisateurs finaux est augmentée par rapport à 2015, du fait du déploiement de la numérisation, des transferts d'usages (transport, chauffage...) et des nouveaux usages électriques (domotique et robotique).

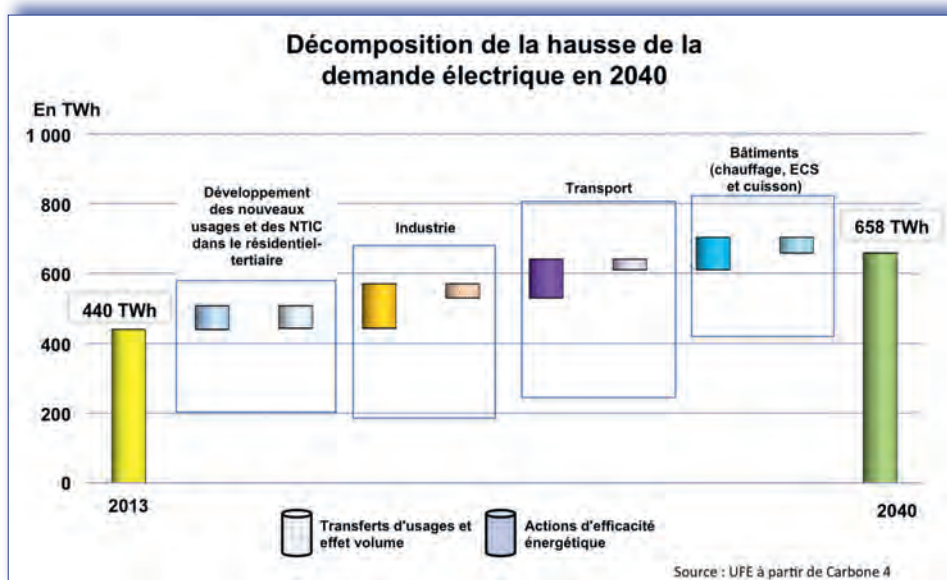
L'électricité représente 45 % de la consommation d'énergie finale (contre 25 % en 2015). Décarbonée, elle préserve le climat

9. La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte retient par exemple un objectif de composante carbone dans les taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques de 56 € en 2020 et 100 € en 2030.

10. Étude « Réussir la démarche d'efficacité énergétique en France », UFE 2014

Ainsi, l'augmentation de la demande d'électricité est liée aux facteurs suivants :

L'augmentation de la demande d'électricité est liée à la hausse structurelle des usages électriques (accroissement de la population, croissance économique), à l'émergence de nouveaux usages, en particulier liés aux outils numériques et aux NTIC, et aux transferts d'usages (chauffage et véhicules électriques notamment). Cette hausse est toutefois tempérée par les actions d'efficacité énergétique qui sont mises en œuvre



SYNTHESE EN CHIFFRES En 2040



1^{ère} place

de l'électricité dans la demande d'énergie



- 45 %

de consommation de produits pétroliers



+ 210 TWh

d'électricité consommée



80 %

d'énergie peu ou pas carbonée dans le mix énergétique



- 65 %

d'émissions de CO₂ liées à l'énergie

Et si la croissance n'était pas au rendez-vous ?

Même si l'on fait l'hypothèse que le taux de croissance de 1,5%/an n'est pas atteint et que la stagnation économique perdure jusqu'en 2040, la consommation d'énergie finale totale diminue néanmoins.

En effet, dans ce contexte morose, la désindustrialisation et les contraintes financières pesant sur les ménages et les entreprises conduisent à une limitation voire une restriction des usages énergétiques (moins de production industrielle, moins de déplacements, moins d'utilisation d'équipements électroniques, informatiques...), ce qui tend à réduire le volume global d'énergie consommée.

Pour autant, la place de l'électricité demeure centrale en 2040 même dans cette configuration : quel que soit le contexte économique, les usages liés au numérique, qui suivent une tendance mondiale, sont généralisés à de nombreux secteurs d'activité et font partie du quotidien des français. La dynamique de transfert d'usages vers l'électricité a également lieu, bien qu'à un rythme moins soutenu que dans un contexte économique plus favorable.



Les mutations du système électrique de 2040

Partie II

Depuis 2015, en offrant un cadre réglementaire stable et des mesures de soutien à l'investissement, la puissance publique a permis aux entreprises d'amplifier les efforts en matière de R&D. Cela a permis de développer les technologies les plus prometteuses. Ce soutien a été limité dans le temps pour éviter les distorsions du marché.

■ Des technologies disruptives au cœur du système électrique

Trois évolutions majeures ont bouleversé le fonctionnement du secteur électrique :

- La demande participe désormais pleinement à la gestion du système
- Les coûts des énergies renouvelables ont été significativement réduits
- Le stockage accompagne le développement des énergies renouvelables

Le rôle renforcé du pilotage de la demande

L'introduction des objets connectés dans tous les secteurs (résidentiel, tertiaire, industrie, transport) permet en 2040 de mieux prévoir les consommations d'énergie et de les piloter tout en améliorant le confort du consommateur. La maison connectée est un véritable « écosystème énergétique » : par exemple, le chauffage est déclenché pour l'arrivée de son occupant et les volets sont ouverts ou fermés en fonction de la luminosité et des prévisions météorologiques. Maintenant généralisés, les objets connectés permettent à la fois de révolutionner la gestion de l'habitat et de modérer la facture énergétique des ménages, tout en répondant à leurs besoins de confort et de vie.

Ces équipements connectés sont pilotés par une box qui est capable de réagir à des signaux de prix adressés par les fournisseurs, reflétant les coûts de leur approvisionnement. Ces box ont été généralisées à l'ensemble des foyers en 2040.

La demande industrielle est elle aussi pilotée en tenant compte des coûts, de deux façons. Par exemple, lorsque c'est possible, la production industrielle s'organise afin de bénéficier des prix de marché les plus bas possibles et s'adapte ainsi à la production d'électricité. Par ailleurs, tous les équipements industriels tels que les moteurs ou les fours peuvent être pilotés à distance. Les consommateurs industriels participent ainsi, dans la mesure des flexibilités potentielles de leur process respectifs et de leur intérêt économique, à la gestion de l'équilibre du système électrique.

La convergence des coûts d'approvisionnement

En 2040, la R&D, les économies d'échelle et les améliorations industrielles permises par le développement de nombreux projets (pour les projets de production électro-nucléaires à l'international comme pour la production renouvelable) ont permis de réduire les coûts d'approvisionnement à partir des technologies décarbonées, qui convergent vers une fourchette de 70 à 100 €/MWh en moyenne pour les nouveaux projets (incluant les « surcoûts système » : participation au maintien des caractéristiques de fréquence et de tension du réseau, nécessité de back up...)



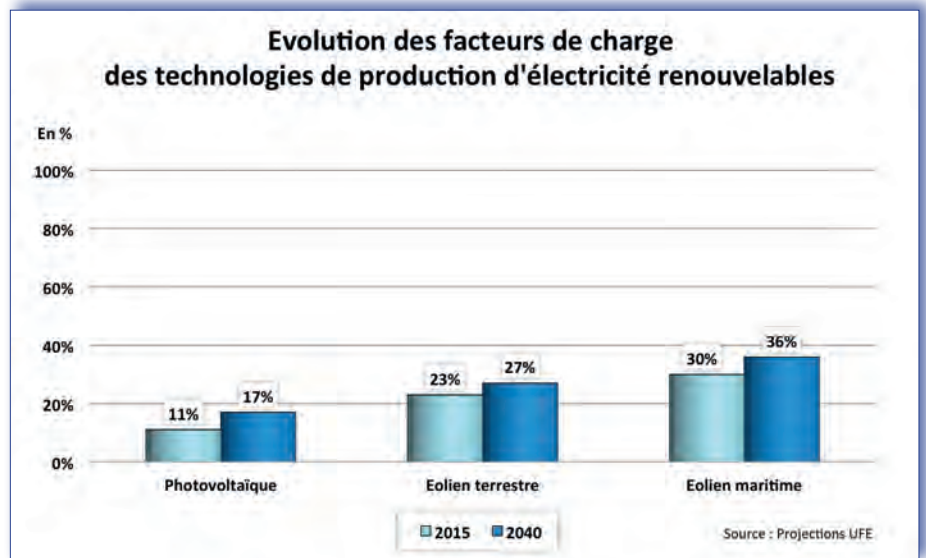
L'amélioration des facteurs de charge des technologies de production d'électricité renouvelables permet de réduire leurs coûts de production et d'améliorer leur compétitivité

2040

Un exemple d'innovation sur le photovoltaïque

En 2040, les coûts de production du panneau photovoltaïque à base de silicium multicristallin sont divisés par trois par rapport à 2015 grâce à la maîtrise de nouveaux procédés de purification du matériau et de cristallisation en lingots ou en lame mince. Avec moins de matière première, la technologie photovoltaïque réalise de meilleures performances. La production des cellules sur le sol français, à partir d'une énergie décarbonée, améliore le bilan environnemental de la technologie photovoltaïque. La maîtrise de cette dernière par la filière industrielle française est synonyme d'exportations, de créations d'emplois sur le territoire et d'une amélioration de la performance environnementale.

Dans le même temps, le coût des technologies carbonées a augmenté suite à la hausse du prix du CO₂ sur le marché ETS. La production d'électricité à partir de gaz est devenue économiquement plus intéressante que celle à partir de charbon.



Un certain nombre de technologies, notamment renouvelables, bénéficient désormais d'opportunités économiques (du fait de la convergence des coûts), favorisant de ce fait leur croissance dans le système électrique.

Celui-ci doit désormais répondre à la variabilité et à l'imprévisibilité de la production éolienne et photovoltaïque, ce qui constitue un changement et un défi majeurs.

Le développement du stockage

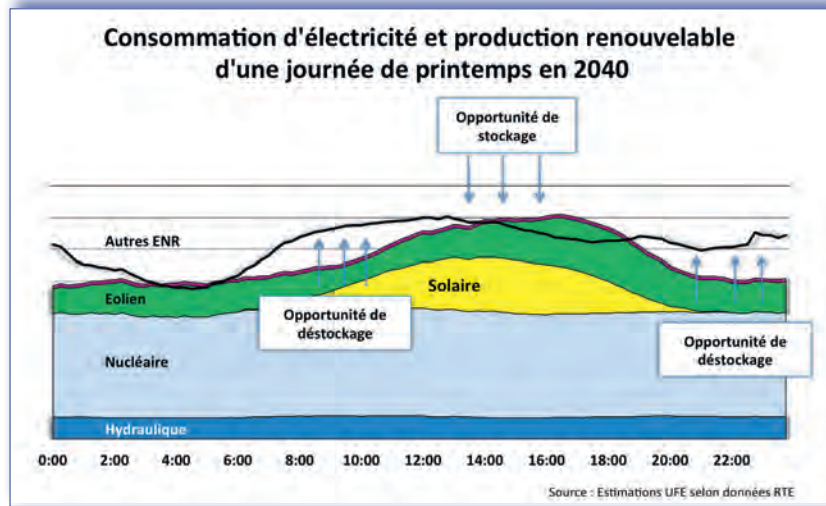
Le stockage s'est développé pour faire face à la variabilité de la production issue des technologies renouvelables. Des innovations technologiques ont permis d'améliorer sa performance économique et son développement a ainsi accompagné celui des EnR intermittentes dans les situations où l'ensemble des coûts (production + stockage/restitution de l'énergie) s'est montré compétitif.

En 2040, malgré les efforts effectués sur le pilotage de la demande, la consommation d'électricité reste structurellement plus élevée le jour que la nuit, la semaine que le week-end, en hiver qu'en été - saison de forte production photovoltaïque. Et une vague de froid reste le fruit d'un anticyclone, synonyme de manque de vent pour les éoliennes.

Il existe ainsi des moments pendant lesquels la production est supérieure à la demande. Il est donc apparu utile de disposer de solutions de stockage permettant de transférer à moindre coût l'énergie produite à un moment pour la consommer ultérieurement.

Par ailleurs, les défis liés à l'intégration de l'autoproduction dans le système électrique ont été surmontés : les schémas de régulation et les dispositions fiscales ont été adaptés afin d'assurer que les bons signaux économiques soient envoyés à tous les utilisateurs des réseaux et que le cadre d'investissement dans l'autoproduction comme dans les réseaux soit stable et économiquement efficace. Une réglementation solide a permis un développement de l'autoproduction là où elle apparaît comme économiquement pertinente pour la collectivité, en l'associant éventuellement à des installations individuelles de stockage.

En 2040, l'excès d'énergie est le plus souvent stocké lorsque la production renouvelable est importante, pour être ensuite déstocké au moment le plus opportun



En 2040, le niveau de production issue de sources renouvelables intermittentes (en particulier le photovoltaïque et l'éolien) peut être supérieur à la demande des clients finals, notamment entre 12h et 15h quand la production photovoltaïque est à son maximum. Le reliquat peut être exporté (si les conditions économiques le permettent), stocké ou perdu (mis à la terre), faute de quoi le système électrique serait instable et risquerait le *black out*. Dans ce contexte, le stockage de l'électricité répond au caractère fatal de la production issue de sources renouvelables. En 2040, l'excès d'énergie est le plus souvent stocké lorsque la production renouvelable est importante, pour être ensuite déstocké au moment le plus opportun.

L'électricité stockée est restituée soit sous forme d'énergie utile (sous forme de chaleur) soit sous forme d'électricité. Les technologies disponibles (STEP, batteries électrochimiques, volants d'inertie, ballons d'eau chaude, appareils de chauffage à accumulation, etc.) ont des caractéristiques différentes, notamment en matière de puissance et de réactivité, et répondent donc à des besoins différents (par exemple, les batteries chimiques restituent l'énergie stockée sous forme d'électricité, tandis que les ballons d'eau chaude et les appareils de chauffage à accumulation restituent directement de l'énergie utile).

Le stockage se développe également dans le transport, avec le développement du véhicule électrique. Les travaux menés pour répondre aux besoins de l'industrie des véhicules électriques ont permis d'introduire une rupture technologique : les batteries zinc-air. Ces dernières sont caractérisées par une énergie massique importante ; elles sont par ailleurs sûres, recyclables et peu onéreuses. En 2040, la batterie zinc-air¹¹ est la technologie privilégiée des constructeurs automobiles.

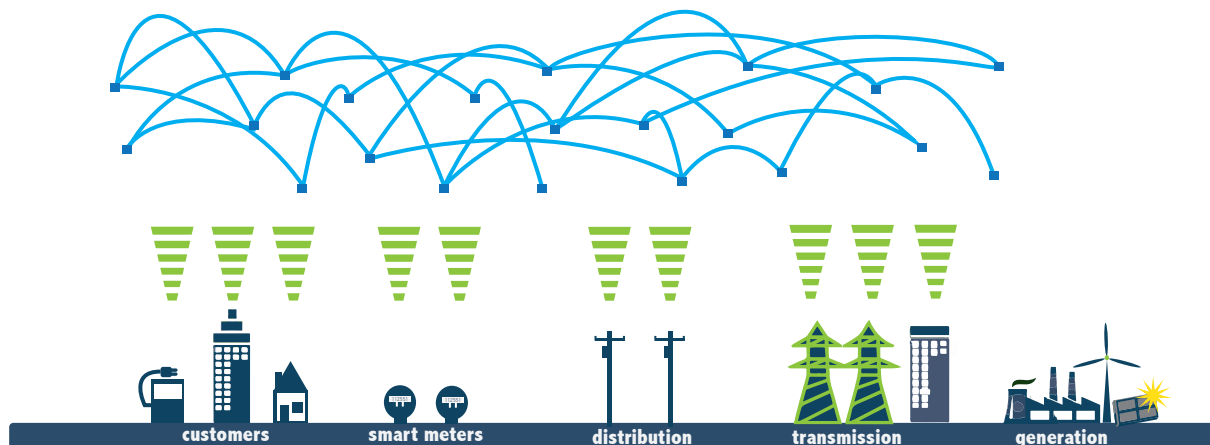
Le développement des véhicules électriques nécessite des batteries à faible coût et composées de matières premières abondantes

La révolution digitale optimisera le pilotage de l'électricité

Le numérique dans le système électrique en 2040

Les technologies numériques ne pénètrent pas uniquement dans le quotidien du consommateur final (cf. supra) mais également dans l'optimisation de la gestion du système électrique. Les incitations économiques (signaux de prix) conduisent à activer à chaque instant la solution la plus performante pour l'équilibrage du système électrique : la modulation d'une centrale de production, le report de la consommation ou le déstockage de l'énergie par exemple, tout cela en tenant compte des contraintes physiques des différents acteurs (producteurs, réseaux, consommateurs). Ces signaux de prix reflètent notamment le coût des émissions de CO₂, et les services de pilotage de la demande peuvent se substituer en partie au développement et à l'utilisation de moyens de production de pointe pour contribuer à l'équilibre du système électrique. Ils contribuent ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique.

11. La batterie zinc-air est une batterie qui tire son énergie de l'oxydation du zinc à partir de l'air ambiant. Contrairement aux batteries Li-OH, elle ne nécessite ni l'utilisation de solvants ni de matériaux rares, et atteint des performances d'utilisation supérieures.



2040

En 2040, la question de l'accessibilité des données collectées par des tiers, et de leur sécurité, est un enjeu essentiel. À une plus grande échelle, la prise de contrôle d'infrastructures électriques à distance est une menace dont les conséquences seraient redoutables, telles que la paralysie du réseau électrique. Une cybersécurité élevée est un corollaire essentiel du développement du numérique, au point qu'en 2040 le sujet est désormais suivi par les autorités en charge de la sécurité du territoire national.

En 2040, la collecte et le traitement de nombreuses données permettent de révéler puis d'exploiter de façon coordonnée l'ensemble des solutions économiquement pertinentes (modulation de la demande, variation de la production et utilisation des ressources de réseaux), selon leurs caractéristiques techniques et leurs coûts respectifs. Une condition préalable à la participation des consommateurs à la gestion du système électrique est la remontée de leurs données : le système électrique ne s'arrête plus au compteur mais intègre, désormais, ce qui se passe dans les foyers et dans les entreprises.

La mise en œuvre de la gestion dynamique du système électrique requiert une puissance de calcul importante et des techniques innovantes offertes par le big data, qui permettent de traiter les grandes quantités de données de production décentralisées et intermittentes, ainsi que les données fournies par les très nombreux objets connectés. Son fonctionnement général se compose de plusieurs étapes :

- la récupération des données disponibles,
- l'agrégation de ces données via une architecture et une base standardisées,
- l'analyse de ces données en temps réel (les constats et les prévisions des déséquilibres, la recherche de la performance du système),
- l'optimisation du fonctionnement du système électrique (par exemple l'effacement de certains consommateurs à la pointe de consommation nationale ou pour soulager des contraintes locales sur le réseau).

La circulation de l'information est une condition pour une bonne efficacité économique et un bon pilotage du système électrique. **Des règles et des standards européens sont définis (sous forme de labels et de normes)**. Si la multiplicité des standards dans la domotique avait pu, à ses débuts, enfermer le consommateur dans une gamme de produits, la standardisation de la connectivité au niveau européen a permis de mettre en place un marché efficace et ainsi d'aboutir à une réduction des coûts.





Vers le Système électrique #4.0

Un mix électrique décarboné et performant en 2040

Les impératifs climatiques et les enjeux stratégiques du secteur électrique ont conduit le mix électrique à évoluer. L'offre électrique nécessaire pour répondre à l'accroissement des besoins¹² a reposé principalement sur l'installation de capacités éoliennes et photovoltaïques¹³. Le potentiel hydraulique supplémentaire identifié en 2015 (une dizaine de TWh) est pleinement exploité. Cette capacité de production renouvelable associée à celle du parc électro-nucléaire constitue l'assise d'une production d'électricité décarbonée. Elle est complétée par des capacités thermiques programmables et des capacités d'effacement les plus efficaces pour assurer la sécurité d'alimentation.

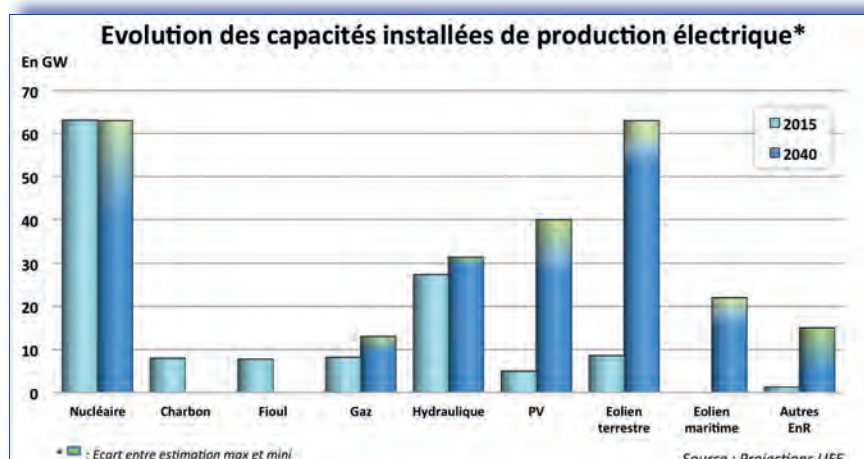
La diversité du mix électrique permet de répondre à la multiplicité des objectifs qui lui sont assignés (sécurité d'approvisionnement, minimisation des coûts et des émissions de CO₂) ; elle reflète la multiplication des technologies disponibles, et les différences caractéristiques des technologies (sensibilité de la production aux conditions météorologiques, gisement disponible, poids relatifs des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation).

En particulier, le développement des renouvelables s'est accompagné du développement de solutions adaptées de réglage de la fréquence, comme la fourniture d'inertie synthétique par les éoliennes ou les alternateurs des moyens hydrauliques ou nucléaires. Cela permet au système électrique de rester stable face à une brusque variation de la puissance appelée (en raison des effets induits par les dispositifs d'électronique de puissance, par exemple pour les installations photovoltaïques). La stabilité du système est par ailleurs renforcée par une demande conséquente et des interconnexions renforcées entre les pays européens.

La composition du mix électrique en 2040 dépend donc à la fois :

- des caractéristiques de la demande d'électricité à satisfaire (niveau et forme),
- du coût et des caractéristiques des technologies de production,
- du gisement disponible et de l'acceptabilité pour certaines technologies
- et des capacités de financement de l'industrie.

En 2040, le mix de production d'électricité est diversifié et il répond aux objectifs fondamentaux du système électrique (sécurité d'approvisionnement, minimisation des coûts, émissions de CO₂)



12. Augmentation de la population, développement des usages et transferts d'usages vers l'électricité.

13. D'autres filières d'EnR (Biomasse, nouvelles technologies EnR) sont supposées en émergence.

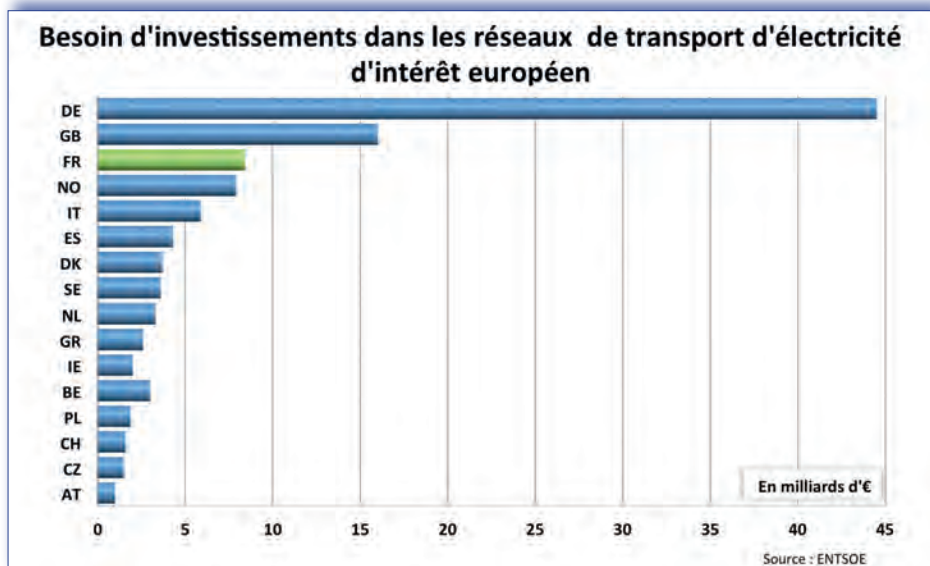
Le rôle des réseaux renforcé



Un autre enjeu majeur pour le développement optimal du mix électrique #4.0 est l'existence d'un réseau adapté, performant, et interconnecté à la maille européenne, qui permet d'augmenter les possibilités de mutualisation des ressources et de leur flexibilité.

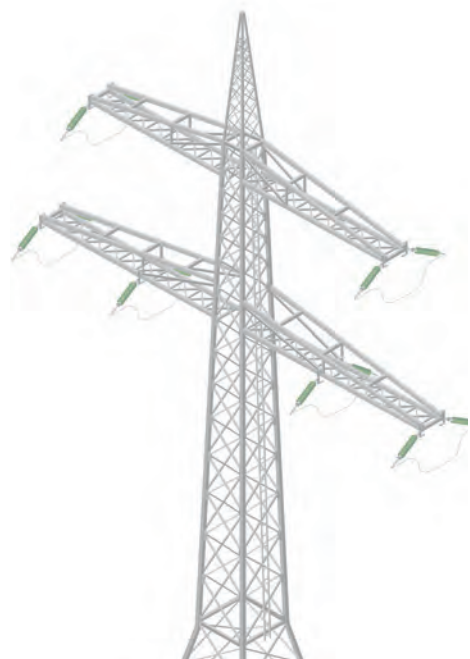
Alors qu'à son origine, la logique dominante du développement du réseau électrique a été de transporter l'électricité depuis des lieux de production éloignés vers les zones de consommation, puis de la distribuer, les besoins et l'utilisation des réseaux ont évolué. En effet, le développement des EnR a modifié la dynamique des flux d'énergie sur le territoire (au sein d'une même journée, certaines zones peuvent être tour à tour exportatrices puis importatrices)¹⁴. Le réseau conserve donc un rôle clé dans le système électrique #4.0. La coordination de cette fonction assurantielle, réalisée au niveau européen, est maintenant accrue pour optimiser les décisions d'investissements et la gestion des infrastructures. Au niveau local, le renforcement de la place des territoires (smart cities, smart territoires, développement des modes de production décentralisée) place aussi les réseaux de distribution intelligents au cœur du système électrique #4.0.

L'association des gestionnaires de réseaux de transport électriques européens ENTSO-E estime le besoin d'investissement dans les réseaux de transport paneuropéen à 150 Md€ d'ici à 2030



Le développement du réseau facilité et amélioré

Les gestionnaires ont renforcé les réseaux de transport et les interconnexions à chaque fois que ces développements étaient économiquement pertinents. En 2040, les nouvelles technologies pour les lignes à haute tension ont permis d'améliorer l'insertion paysagère des ouvrages, et la simplification des normes administratives a permis d'accompagner leur développement. Les règles de tarification des réseaux permettent aux gestionnaires de disposer des ressources nécessaires pour assurer le développement, l'entretien et l'exploitation des infrastructures dont ils ont la charge.



14. RTE a présenté ces phénomènes pour l'éolien lors de la Commission Perspective Réseau du 30 juin 2015

L'ultime enjeu, et non le moindre, était d'offrir une organisation de marché qui permette l'investissement dans les technologies indispensables au système électrique #4.0 et leur utilisation efficace. En 2040, les acteurs disposent d'un contexte réglementaire stable et de la visibilité nécessaire pour investir dans des technologies hautement capitalistiques et non carbonées



15. Voir étude UFE BDEW : « Energy transition and capacity mechanisms » (2015).

16. En effet, sur 50 années envisagées, seules 7 seraient très profitables alors que la grande majorité ne le serait pas.

■ Une architecture de marché électrique européen achevée et stabilisée

Un marché intérieur de l'énergie abouti :

Les interconnexions ont été renforcées sur toutes les frontières où elles étaient économiquement pertinentes et le couplage des marchés au jour le jour comme en infra-journalier permet une utilisation des ressources pleinement optimisée à l'échelle européenne. Le marché intérieur de l'énergie procure dans ces conditions un approvisionnement optimisé des consommateurs européens.

Des décisions d'investissements efficaces prises en tenant en compte de l'ensemble des coûts :

Pour évaluer la pertinence d'une décision d'investissement, la comparaison des coûts de production unitaires des différentes filières n'est pas suffisante. Lors de la construction d'un mix électrique diversifié de 2040, il s'est donc avéré impératif de compléter cette approche en évaluant les coûts des moyens nécessaires pour assurer la fiabilité d'un système électrique qui comporte une part significative de production intermittente. Ces coûts portent notamment sur le renforcement du réseau, la mise en place de capacités de production supplémentaires et l'activation de solutions de flexibilité (de la part de la production, du stockage ou des consommateurs). En 2040, les cadres de régulation ont été adaptés afin que les signaux de prix reflètent l'ensemble des coûts et des bénéfices qu'induit le développement de chaque technologie, de manière à ce que les décisions individuelles prises par les acteurs soient pleinement efficaces.

Par ailleurs, les signaux et engagements contractuels de long terme, sous différentes formes (par exemple co-investissement entre producteur(s) et/ou consommateur(s)) se développent, permettant de favoriser les investissements dans les technologies bas carbone particulièrement intensives en capital. Ces dispositifs contribuent ainsi aux enjeux de décarbonation et de sécurité d'approvisionnement de l'Europe.

Mise en œuvre d'une obligation pour assurer la sécurité d'approvisionnement :

Une architecture de marché qui offre des signaux de prix cohérents avec les besoins permet de réduire le risque porté par les investisseurs, et donc le coût du capital. Comme illustré dans une étude franco-allemande¹⁵, les revenus du marché *energy only*, en particulier pour les moyens de pointe et les outils de gestion de la demande (tels que l'effacement) sont très incertains : ils sont concentrés sur quelques années seulement¹⁶ et leur niveau reste hypothétique. Dans un tel environnement, très risqué pour les investisseurs, rien ne garantit que les capacités développées spontanément seront suffisantes pour que le critère de sécurité d'alimentation désiré par les États-membres soit respecté (dans le cas de la France, une durée moyenne de délestage tolérée de 3 heures par an) et on peut craindre une situation de sous-investissement chronique dans les capacités de production de pointe, de semi-base et d'effacement.

En 2040, le modèle européen a été complété pour répondre aux enjeux de sécurité d'alimentation : une obligation à disposer du niveau adéquat de capacité a été mise en place en complément du marché *energy only*. Des politiques coordonnées ont été mises en place au sein du marché intérieur, notamment pour l'évaluation des besoins de capacité nécessaires à la sécurité d'alimentation de l'Europe. Le mécanisme d'obligation révèle plusieurs années à l'avance la valeur de la capacité et améliore la visibilité de long terme des acteurs. Ainsi, l'alimentation en électricité est sécurisée pour un coût global réduit, au bénéfice du consommateur. **Un certain nombre d'avancées politiques et techniques ont eu lieu, visant la mise en œuvre d'un mécanisme européen efficacement coordonné :**

- l'adoption, au niveau régional, d'une méthode d'analyse commune de la sécurité d'approvisionnement et la mise en place d'indicateurs de mesure communs ;
- la conclusion d'accords interétatiques engageants pour encadrer la gestion des situations de pénuries simultanées d'énergie entre les États membres de la région ;
- une meilleure intégration de la gestion du système de transport d'électricité.



Partie III

Une filière électrique d'excellence



En
2040, la filière
électrique est un fleuron
de l'industrie française. Créatrice
d'emplois, à la pointe de l'innovation
et de la recherche, elle se caractérise par
la diversité de ses acteurs comme
de ses métiers.

Engagées pour la réussite de la transition
énergétique, les entreprises ont anticipé et
accompagné les mutations technologiques,
numériques et managériales. Le
consommateur a été au cœur de ces
transformations.

Une filière électrique d'excellence

Une double révolution réussie

- Les transitions énergétique et numérique ont été réussies grâce à une mobilisation de l'ensemble des acteurs de la filière

Une filière électrique dynamique et en pleine expansion

- Les technologies du numérique entraînent de nouvelles activités pour la filière électrique
- De nouveaux champs industriels nationaux émergent pour accompagner la mutation du mix électrique et le développement des services énergétiques

Une filière attractive et créatrice d'emplois

- Des métiers sont créés pour répondre aux nouveaux besoins de tous les segments de la filière électrique
- Des métiers à haute technicité et expertise qui permettent des parcours professionnels attractifs
- Formation et alternance participent pleinement au développement des compétences

Une filière citoyenne : la Responsabilité Sociétale des Entreprises au cœur des transformations

- Le dialogue avec les parties prenantes a été un facteur clef de succès dans l'évolution des entreprises
- Engagées sur les territoires, les entreprises du secteur participent d'un accès au monde du travail du plus grand nombre

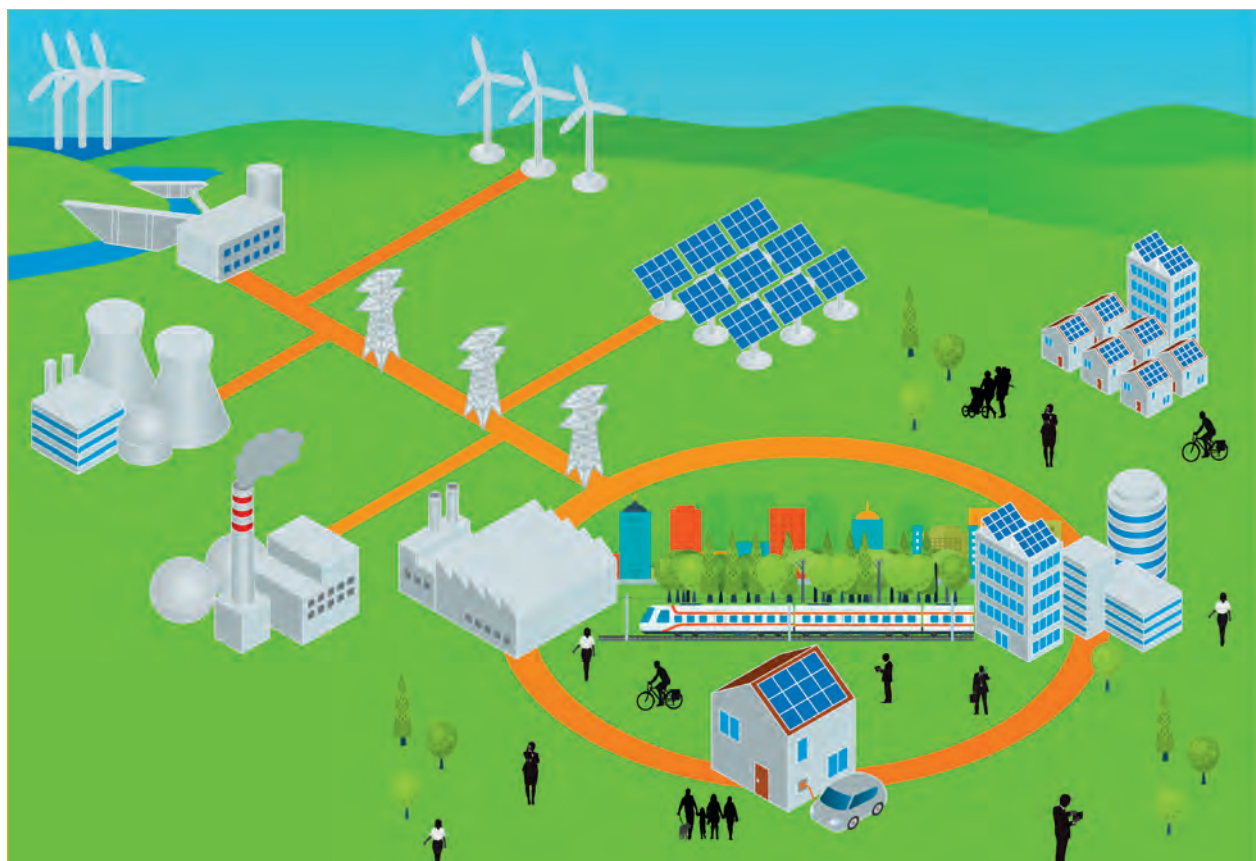


Le développement de l'économie numérique, au cœur d'une profonde transformation de la filière électrique

Le secteur électrique (activités de production, de transport, de distribution, de fourniture d'électricité et de services) **comme l'ensemble de la filière électrique à l'aval** (équipementiers, installateurs, génie civil...), **ont été mobilisés pour la réussite des transitions énergétique et numérique.**

En 2040, la filière électrique a réussi à accompagner ces évolutions. Elle est une **filière industrielle performante et dynamique**, créatrice d'emplois, dont l'excellence est reconnue en France comme à l'international.

Acteur majeur d'une société ultra connectée, la filière électrique participe, de par ses métiers et ses savoir-faire, à la **performance énergétique des villes et des territoires**, à la **qualité de vie de chacun** comme à la **réponse aux enjeux climatiques.**



Partie III

Une filière électrique dynamique et en pleine expansion

La mutation technologique des activités

En 2040, les transitions énergétique et numérique ont conduit à des **modifications d'organisation au sein de la filière**. Elles ont nécessité des synergies et la mise en œuvre d'une stratégie globale sur les process et les activités.

Les entreprises de la filière se sont adaptées. Elles ont noué les **alliances** nécessaires avec des acteurs innovants du monde numérique. Ces derniers ont eux-mêmes pénétré le secteur, y compris à travers des investissements dans le parc de production. La question des compétences et de leur développement a été au cœur des **enjeux de concurrence** entre les entreprises.

Grâce à la mise en place de services d'analyse de données, reposant sur des algorithmes de traitement performants, les **producteurs, transporteurs et distributeurs d'électricité anticipent rapidement les problèmes techniques** et leur temps de réaction a ainsi été considérablement réduit. La plupart des interventions se réalisent désormais à distance, avant même l'apparition de dysfonctionnements perçus par les consommateurs, grâce notamment aux systèmes de comptage évolués.

La gestion de l'exploitation des infrastructures et des unités de production (y compris dans le domaine de la sûreté) a été considérablement améliorée grâce à la récupération des données (objets connectés, drones, scan 3D,...) et à **l'échange d'informations en temps réel** (réalité augmentée, collaboratif virtuel, géolocalisation, *information hub*...).

Les acteurs historiques de la filière ont complété leur approche des problèmes à très long terme par une approche de « *test and learn* » afin de dynamiser et de rendre encore plus agiles les entreprises.

L'hydroélectricité, une EnR essentielle



L'hydroélectricité favorise le développement des territoires situés en zone montagneuse ou rurale. Elle préserve et développe des emplois non-délocalisables, directs ou indirects, et apporte de l'activité aux entreprises locales – principalement des PME – qui contribuent à la construction et à la maintenance dans des domaines très variés (BTP, métallurgie, fonderie, électrotechnique, matériaux et technologies de pointe, biotechnologies...).

■ Un secteur électrique enrichi grâce à l'essor de nouveaux champs industriels



Le mix électrique est désormais très diversifié grâce au dynamisme de la recherche et du développement. La filière électrique et ses différents modes de production sont un fleuron de l'industrie et de la recherche de la France à l'international.

Les énergies renouvelables participent pleinement à l'essor de l'économie. Les filières éoliennes et photovoltaïques ont réussi à se structurer en France (la majeure partie de la valeur ajoutée est désormais en France) et à valoriser leur savoir-faire à l'international. Le parc hydraulique a été rénové et continue à participer pleinement à la manœuvrabilité du parc de production.

Les énergies marines (utilisation des marées et des courants marins) constituent une technologie maîtrisée qui dispose d'un champ d'exportation très prometteur, tant du point de vue des équipements que de leur installation sur site. Là encore, la France est en pointe grâce à son littoral où elle a pu mener des expérimentations et développer son expertise technique.

Les **réseaux de chaleur et la biomasse énergétique** (en particulier dans la chaleur) ont atteint des niveaux de performance élevés, y compris avec l'utilisation des combustibles solides de récupération.

La filière nucléaire a également beaucoup évolué avec le développement de capacités importantes d'intervention dans le domaine du grand carénage de réacteurs, d'une offre de nouveaux réacteurs diversifiée ainsi que d'une expertise de haut niveau consacrée au démantèlement.

■ Développement et diversité des services énergétiques



Les services offerts par la filière électrique se caractérisent par une extrême diversité de prestations et de clients concernés. C'est le cas notamment des diagnostics et audits de la performance énergétique, du pilotage de projets énergétiques, du génie climatique, de la gestion de la mobilité urbaine intelligente, du pilotage des éco-quartiers (...).

Le consommateur est au centre du système électrique où il joue un rôle déterminant en temps réel. Il a les moyens, aidé des équipements digitaux mis à sa disposition, de piloter l'ensemble de ses équipements et de maîtriser ses factures, ce qui est **l'essence même de l'interface transformation numérique / transition énergétique.**



Une filière attractive et créatrice d'emplois

L'adaptation des entreprises du secteur aux révolutions technologiques et managériales

La période 2015-2040 s'est caractérisée par une gestion à un rythme parfois très rapide des évolutions significatives dans le domaine de l'emploi et des compétences :

- le renouvellement des compétences après le départ à la retraite des « baby-boomers » et le recrutement de profils et compétences adaptés,
- les évolutions des compétences et les redéploiements pour accompagner l'essor des EnR, le renouvellement du parc nucléaire et le développement de nouvelles technologies (numérique, stockage, etc...) et leurs conséquences pour la distribution et le transport,
- la capacité à conduire le changement (évolution rapide des activités et des modèles d'organisation).

Filière d'excellence à la pointe des technologies, la filière électrique est au cœur des enjeux socio-économiques et climatiques. Elle est particulièrement **attractive** auprès des nombreuses filières de formation compte tenu de la diversité de ses métiers (technique, commercial, études et recherche, conduite de projets et transformations...). Le recours à **l'alternance** est plébiscité par les professionnels du secteur comme les jeunes pour faciliter leur intégration professionnelle. Elle a été une des voies majeures du renouvellement des compétences.

Une évolution de la nature des métiers

Dans les différents secteurs de la filière électrique, les créations d'emplois ont été réalisées en lien avec l'essor du numérique et les évolutions technologiques. Elles concernent des **métiers à haute technicité et expertise** (ingénieurs, développeurs, designers, data scientists...). L'essor du numérique fait également apparaître d'autres emplois comme ceux **liés à la cybersécurité des systèmes**. **La robotisation** a, comme dans les autres secteurs, conduit à supprimer des activités, essentiellement des emplois à faible qualification. Ces évolutions ont été anticipées dans le cadre des politiques de recrutement et de formation (reconversions). Intégrée aux politiques de prévention sécurité, la robotisation a également permis de réduire la pénibilité de certains emplois.

L'expertise technique reste bien évidemment au cœur des métiers de la production, du transport et de la distribution qui appellent nécessairement à des compétences qualifiées compte tenu de la spécificité de l'électricité, des risques et des contraintes associés.

Les métiers de la vente et de la relation clientèle ont également été fortement modifiés par la transformation numérique et le rôle central joué par le consommateur. Au-delà des fondamentaux de leurs métiers, une connaissance et une compréhension globale et précise des installations électriques et des services énergétiques restent indispensables.



« Ils l'ont dit »

Quelles évolutions ont marqué le secteur énergétique lors des 10 dernières années ?

- 1 L'ouverture des marchés à la concurrence
- 2 L'arrivée du compteur intelligent et du numérique
- 3 Le développement des EnR et la transition énergétique

Quelles sont les enjeux du secteur à court et moyen terme ?

- 1 Le développement des technologies numériques
- 2 La recomposition des territoires (local/national/européen)
- 3 L'arrivée de nouveaux acteurs et de nouveaux métiers

Quel impact sur les métiers ?

- 1 Une augmentation du niveau de qualification
- 2 Une recherche accrue de polyvalence et d'adaptabilité
- 3 L'importance de la formation professionnelle tout au long de la carrière

Résultats issus d'une enquête réalisée en juin 2015 auprès des dirigeants et DRH des entreprises et associations adhérents à l'UFE.

■ Des créations d'emploi initiées par le rôle majeur de l'électricité

La France a vu sa consommation énergétique globale sensiblement diminuer en 25 ans, malgré la progression de son activité économique et industrielle. Mais en parallèle, le poids de l'électricité est devenu prépondérant dans cette consommation. La filière électrique est le vecteur porteur d'emplois du secteur énergétique, aussi bien directement sur ses activités cœur de métier que pour ses conséquences en emplois indirects sur l'ensemble du territoire national.

La technicité et spécificité de l'électricité comme des enjeux liés à la maîtrise de l'environnement font des entreprises de la filière des employeurs de référence, à la pointe de la technologie et de l'innovation.

■ L'enjeu stratégique de la formation aux métiers de l'énergie

En 2040, les jeunes qui entrent sur le marché du travail sont *digital natives*. Ils ont des modes de fonctionnement, de communication, d'apprentissage et de conception de l'entreprise et du monde du travail différents de leurs aînés. **L'enjeu pour les entreprises est de réussir à faire travailler ensemble et d'accompagner ces différentes générations aux repères et attentes très différents** dans un environnement complexe et évolutif.

Compte tenu de **l'importance des mutations socio-économiques générées par la double transition énergétique et numérique**, la problématique des compétences s'est posée à la fois en termes quantitatif et qualitatif.

Une des questions essentielles a été celle de l'employabilité des salariés avec une **responsabilité partagée entre le système éducatif, l'employeur et le salarié**.

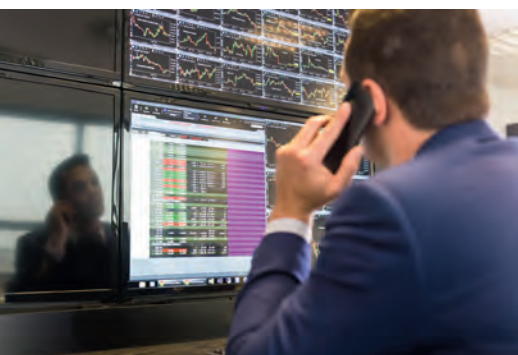
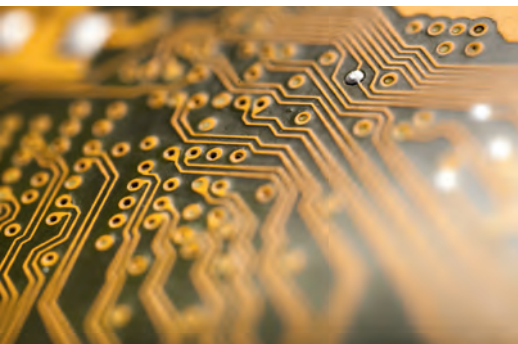
Les entreprises du secteur ont donc été amenées à re-questionner leurs dispositifs de formation pour :

- **accompagner les évolutions des métiers**, dont certains avec des reconversions importantes du fait notamment de l'évolution du mix électrique et du développement de nouvelles technologies (en particulier dans le domaine de la production, de la maintenance industrielle et de la distribution),
- **assurer la parfaite maîtrise d'outils de production et de gestion des réseaux** de plus en plus sophistiqués,
- **tirer profit de la numérisation** en maîtrisant les technologies de traitement des données pour développer des offres commerciales innovantes.

Les modes de formation ont évolué. **L'utilisation accrue du numérique influe sur les modes d'apprentissage, comme la capacité à gérer des informations multiples en temps réel**. Les approches pédagogiques comme les modalités d'apprentissage ont évolué grâce aux nouvelles technologies (vidéo 3D des environnements, simulation virtuelle ...). **La révolution 4.0 a impacté l'ensemble des composantes de l'entreprise**, y compris les dimensions RH et managériales.

Un travail avec les institutionnels de l'emploi (organismes publics, partenariats écoles...) et l'Education Nationale a été réalisé pour revisiter les cursus scolaires et les systèmes de formation afin de tenir compte de l'évolution des métiers et des exigences requises. En 2040, le pari est réussi. Les entreprises du secteur ont été parties prenantes de cette évolution en sensibilisant aux métiers futurs et à l'évolution des compétences requises, comme en étant associées à la pédagogie nécessaire pour des modes de consommation plus responsables.

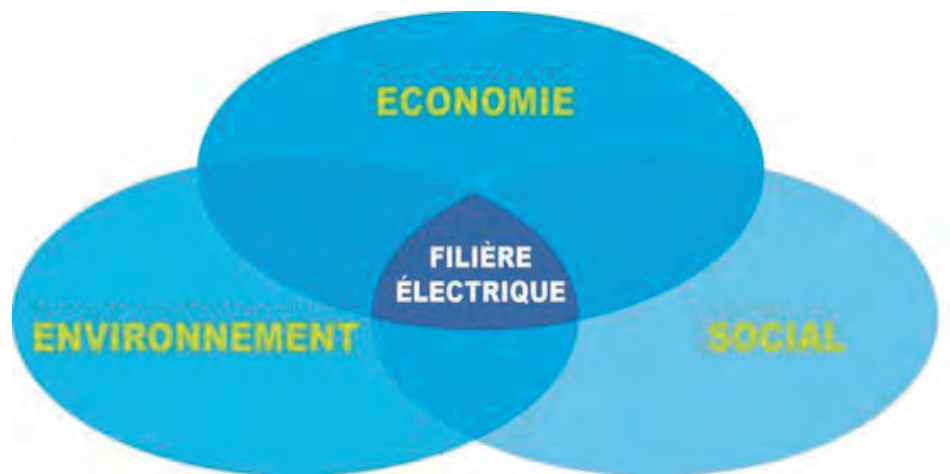
Les entreprises qui ont considéré la **formation comme un investissement stratégique** figurent en tête du palmarès des entreprises innovantes.





Une filière citoyenne : la Responsabilité Sociétale des Entreprises au cœur des transformations

La RSE et la maîtrise de ses enjeux ont été au cœur de ces stratégies. **Seules les entreprises ayant véritablement réinterrogé leur modèle managérial et leur process de décision** en associant les différentes parties prenantes ont **réussi leur adaptation**. Elles incarnent leurs valeurs tant à l'interne qu'à l'externe.



Le dialogue avec les différentes parties prenantes (clients, fournisseurs, prestataires, salariés, pouvoirs publics, ONG...) a en effet été un **facteur-clé du succès** dans les évolutions des entreprises. Elles ont réussi à mettre les clients comme leurs équipes au cœur des évolutions et des projets de transformation pour des produits et des services innovants, adaptés aux différentes attentes (prix, proximité dans le dialogue, protection environnementale).

Ces entreprises ont su accompagner les évolutions de la société, sensibiliser et inciter à des modes de production et de consommation responsables. **Engagées socialement, elles participent également au développement de l'économie circulaire sur les territoires, ainsi qu'à l'équilibre du tissu social.**

Les entreprises du secteur électrique sont attachées depuis des années à la **diversité de leurs équipes**. Femmes, hommes, jeunes et seniors conjuguent ensemble leurs talents.

L'enjeu demeure, dans un secteur, et plus largement dans une société, ultra-connecté, avec des métiers à haute technicité et forte complexité, de **permettre un accès et maintien au monde du travail pour le plus grand nombre.**

