



**DIDIER HOLLEAUX (X79),**  
EXECUTIVE VICE PRESIDENT CHEZ ENGIE

## Le rôle essentiel du gaz dans la transition énergétique

*La lutte contre le réchauffement climatique est un enjeu majeur pour l'humanité : le recours aux énergies renouvelables (ENR) et le soutien aux modes de transports les moins émetteurs en CO<sub>2</sub> sont désormais un impératif si nous souhaitons éviter des catastrophes climatiques porteuses d'appauvrissement général pour l'humanité.*

Quel rôle le gaz peut-il jouer dans cette évolution ? On constate qu'il voit sa consommation augmenter d'ici 2030 dans tous les scénarios environnementaux, y compris les plus exigeants. C'est qu'en fait, le gaz est une composante essentielle de la transition énergétique : il peut d'une part être considéré comme le parfait allié des ENR électriques ; il s'agit d'autre part d'une énergie en mouvement, dont l'attractivité et les performances environnementales sont en constante amélioration ; le méthane est enfin un produit en évolution, qui a vocation à inclure une part croissante de gaz renouvelable.

### Gaz et ENR électriques : des énergies complémentaires

L'ambition de recourir prioritairement aux ENR pour produire de l'électricité ne se concrétisera que si une solution acceptable est trouvée au problème posé par l'intermittence de la production renouvelable. Aussi, en cas de modification des conditions météorologiques et tant que le stockage direct de l'électricité reste très coûteux, il est indispensable qu'une autre unité de production puisse prendre le relais pour pallier l'interruption de fourniture. En raison de leur flexibilité et de

leurs faibles émissions de CO<sub>2</sub>, les centrales à cycle combiné au gaz sont les plus à même d'exercer cette fonction.

Au-delà de cette fonction, tout remplacement d'une autre énergie fossile par du gaz naturel se traduit par un gain significatif pour l'environnement. Ainsi, si on remplaçait instantanément aujourd'hui dans le monde les centrales électriques brûlant du charbon ou des produits pétroliers par des centrales à gaz, le montant des émissions totales de CO<sub>2</sub> baisserait de plus de 13 %. De surcroît, une telle substitution du gaz aux produits les plus polluants se traduit par une amélioration sensible de la qualité de l'air (réduction de 70 % des émissions de NOx par rapport au fioul et au charbon).

Le gaz est donc une énergie qui assure sans rupture la sécurité de l'approvisionnement et permet de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre, sans provoquer les bouleversements massifs et coûteux du système énergétique qu'induirait le passage à un système tout électrique : il fait partie, au même titre que les ENR électriques et l'efficacité énergétique, du bouquet de solutions au problème du changement climatique pour les prochaines décennies.

### Les évolutions technologiques : le gaz, vecteur d'efficacité énergétique

Utilisé en tant que produit final, le gaz est affecté par des évolutions technologiques qui vont dans le sens d'une efficacité énergétique accrue :

- les pompes à chaleur au gaz naturel sont en cours d'adaptation pour permettre leur utilisation dans tout type d'habitation ;

---

**Le gaz assure la sécurité et l'approvisionnement et permet de réduire les émissions de gaz à effets de serre**

---

- le secteur du chauffage au gaz va également être transformé par l'apparition des chaudières hybrides, qui combinent une pompe à chaleur de petite puissance, adaptée à des conditions climatiques clémentes, et une chaudière à condensation pour les conditions plus rigoureuses : par un simple signal, la chaudière hybride peut ainsi basculer d'un fonctionnement électrique à un fonctionnement tout gaz. Cette technologie permet d'adapter le fonctionnement du système de chauffage à la météorologie locale, aux conditions d'utilisation des réseaux ainsi qu'à l'équilibre offre-demande ;
- les micro-cogénérations de nouvelle génération, alimentées par une pile à combustible, permettent également de diminuer sensiblement les consommations énergétiques en produisant simultanément la chaleur et l'électricité nécessaires à l'alimentation d'une maison ;
- les compteurs communicants (comme Gazpar, développé par GRDF), permettent de récupérer des informations fines sur la consommation de gaz et de les traiter en association avec d'autres données (habitudes de vie, consommations sur la zone) : il sera ainsi possible d'offrir des services d'alertes, de conseils et de pilotage auto-adaptatif des installations, qui pèseront à la baisse sur les consommations ;
- enfin, les solutions au gaz naturel bénéficient de l'appart de la digitalisation désormais à l'œuvre dans tous les secteurs de l'énergie : les chauffages gaz se dotent de thermostats intégrés intelligents, pilotables à distance via smartphone, tablette ou ordinateur ou s'équipent de thermostats autonomes.

Dans le secteur du transport, l'utilisation du gaz peut également avoir un impact positif sur l'environnement : ainsi, le remplacement progressif, dans les véhicules lourds, du diesel par du GNL permettrait de réduire de 7 % les émissions de CO<sub>2</sub> par les véhicules et contribuerait notamment à améliorer la qualité de l'air.

### Vers un gaz de plus en plus vert

Progressivement, le gaz naturel va être remplacé dans les infrastructures par du gaz vert, dont la production n'implique aucune émission de CO<sub>2</sub> supplémentaire.

## Une énergie essentielle pour les prochaines décennies

De nouvelles générations de gaz renouvelable vont par ailleurs apparaître pour compléter le biogaz que nous connaissons aujourd'hui, produit par digestion anaérobie de biomasse humide. Le biométhane de deuxième génération se fonde sur l'utilisation de matière lignocellulosique (de type bois, paille) : cette filière est en phase de développement et devrait pouvoir être industrialisée à partir de 2020. Le biométhane de troisième génération est produit par méthanisation de microalgues en milieu confiné (bassins ou tubes) à partir d'eau, d'effluents et de rayonnement solaire : l'application à l'échelle industrielle de cette technologie est prévue vers 2030.

L'électricité renouvelable produite en surplus de la demande locale peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Cet hydrogène peut être stocké sans limite de durée, ou directement injecté dans le réseau de gaz naturel pour augmenter le pouvoir calorifique du gaz transporté dans les infrastructures, ou encore être combiné avec du CO<sub>2</sub> pour produire du méthane de synthèse. Ces solutions, caractérisées par des évolutions technologiques importantes, sont complémentaires aux technologies de stockage de court terme en matière d'électricité (batteries) en ceci qu'elles permettent de stocker l'énergie excédentaire sans limite de durée ni de quantité.

Fort de ces développements technologiques en cours, le gaz a toute sa place en tant qu'énergie verte dans la lutte contre le réchauffement climatique et sa contribution est encore accrue avec les solutions *smart*, aujourd'hui en voie de développement. Dans un paysage énergétique de plus en plus décentralisé, le gaz possède tous les atouts pour apporter des solutions adaptées aux enjeux environnementaux locaux et constituer une énergie essentielle pour les prochaines décennies.



**ANTOINE HUARD (X07),**  
PRÉSIDENT DU GROUPE X-RENOUVELABLES

## Les énergies renouvelables, ressources compétitives pour le mix énergétique de demain

*Le secteur de l'énergie est en train de vivre une révolution majeure à l'échelle mondiale. Encore marginales il y a 10 ans, les énergies renouvelables constituent aujourd'hui la première source d'électricité nouvellement mise en service chaque année dans le monde avec 58,5 % des nouvelles capacités installées en 2014. Plus de 114 GW de capacités éoliennes et solaires photovoltaïques ont été raccordées au réseau en 2015 (contre 84 GWc en 2014 soit une croissance de près de 36 %), portant la capacité totale de ces deux seules énergies à plus de 640 GW, soit 10 fois la puissance du parc nucléaire français<sup>1</sup>. Éolien, solaire photovoltaïque et hydroélectricité représentent désormais 28 % de la capacité mondiale installée.*

### La compétitivité, facteur clé de cette croissance sans précédent

Cette croissance importante au niveau mondial ne saurait s'expliquer uniquement par une soudaine préoccupation environnementale de la part des énergéticiens, mais reflète essentiellement la prise en compte d'une nouvelle réalité économique : dans **de nombreux pays, les énergies éolienne et photovoltaïque sont désormais compétitives par rapport aux autres sources d'électricité si l'on compare les nouvelles capacités installées**. Cet avantage compétitif des énergies renouvelables va s'accroître dans les années à venir.

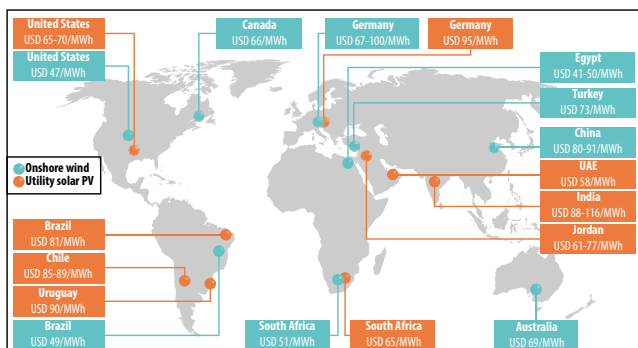
Cette carte n'indique pas les résultats des appels d'offres les plus récents : en 2016 au Chili, des appels d'offres ont révélé un prix de USD 38.10/MWh pour l'éolien et USD 29.10/MWh pour le solaire, ce qui constitue le prix le plus bas jamais proposé à ce jour.

### L'énergie solaire photovoltaïque a vu son coût divisé par 10 en l'espace de 10 ans et cette tendance devrait se poursuivre avec des marges de progression importantes :

l'industrialisation à grande échelle des composants des centrales solaires ne fait que commencer, et la technologie est encore loin d'avoir atteint sa maturité. Des innovations basées sur des matériaux tels que le Pérovskite sont actuellement en cours de développement dans les laboratoires<sup>2</sup>. Les premiers résultats obtenus indiquent qu'une division par cinq du prix des panneaux solaires serait techniquement possible avec le déploiement de cette nouvelle génération de cellules.

### Une tendance similaire, bien que moins abrupte, est observée pour l'éolien dont le coût diminue en moyenne de 12 % à chaque doublement de capacité installée<sup>3</sup>.

Les gains de compétitivité sont essentiellement le résultat de l'augmentation de la puissance unitaire (multipliée par 10 entre 1997 et 2007) grâce à l'amélioration du profil des pales et l'accroissement de la taille des installations. Les marges de progression résident dans l'*offshore*, qui présente des vents plus forts et plus réguliers et des contraintes d'espace et d'acceptabilité locale moindres, même si les défis techniques posés par la construction et la maintenance



demeurent importants. L'un des axes de développement actuels porte sur les installations flottantes, qui présentent l'avantage de s'affranchir des problématiques d'implantation en profondeur.

Comme tout phénomène disruptif, la croissance des énergies renouvelables ne va pas sans défis à relever. On peut en citer trois principaux :

- **Leur intégration au réseau**, parfois présentée comme soulevant des problèmes insurmontables. Pourtant, d'après RTE une production photovoltaïque jusqu'à 8-10 % de la consommation française d'électricité (soit 5 fois plus importante qu'aujourd'hui) est intégrable sur le réseau actuel sans aucun investissement. Selon l'Agence internationale de l'énergie, un taux de 40 % d'énergies renouvelables intermittentes (solaire et éolien, hors hydro) dans le mix électrique est envisageable en l'état actuel avec quelques investissements mineurs. En 2012, ce taux était déjà de plus de 30 % au Danemark. Des taux plus importants sont accessibles sous réserve de développer des solutions de flexibilité de la demande et d'avoir accès à des capacités de stockage de l'électricité compétitives <sup>4</sup>.
- **Leur intégration au marché**, évolution naturelle après une période de lancement généralement caractérisée par d'importantes subventions. Cette évolution est déjà une réalité en Europe. Elle s'accompagne de l'émergence de nouveaux acteurs, les agrégateurs, qui assurent le lien entre la production décentralisée et les marchés sur lesquels s'effectue chaque jour l'équilibre entre l'offre et la demande <sup>5</sup>.
- **Leur financement**, car les parcs solaires, les fermes éoliennes et les barrages hydroélectriques sont des actifs très capitalistiques. Le coût d'accès aux capitaux (fonds propres ou dette bancaire) représente donc une dimension essentielle du prix final de l'électricité.

Ces trois défis sont parfois invoqués pour remettre en question la compétitivité des énergies renouvelables : leur prix affiché n'intégrerait pas les coûts du réseau, l'équilibrage du système, la gestion de l'intermittence, et ne serait aussi bas que grâce à des mécanismes de soutien qui permettent d'en garantir le niveau au producteur sur des durées de 15 ou 20 ans. Si ces reproches ont pu être fondés lors des premiers balbutiements du milieu des années 2000, ils doivent désormais être fortement nuancés. En France par exemple, les coûts de renforcement du réseau électrique résultant de la croissance des énergies renouvelables,

sont entièrement à la charge des producteurs via les Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables (S3REnR). L'équilibrage du système, naguère à la charge d'EDF dans le cadre du mécanisme d'obligation d'achat, sera désormais assuré par les agrégateurs (en tant que « responsables de périmètre d'équilibre ») lesquels factureront ce service aux producteurs (les montants concernés sont de l'ordre de 1 à 3 €/MWh).

### La France : un potentiel immense encore inexploité

Face à cette révolution mondiale, la France a accumulé un retard important par rapport à ses voisins : le parc solaire français atteint une capacité de 5,8 GWc à la fin 2015, contre plus de 40 GWc en Allemagne, pays ne jouissant pourtant pas d'un ensoleillement particulièrement attractif. Quant au parc éolien, il dépasse à peine les 10 GW en France contre plus de 45 GW en Allemagne, alors même que la France, avec son littoral et ses trois régimes de vent, présente le second potentiel éolien d'Europe après le Royaume-Uni. L'hydraulique représente certes 13,7 % du mix électrique français, mais l'éolien seulement 4,5 % et le solaire 1,6 % de la consommation nationale <sup>6</sup>.

Les causes de ce retard sont connues : instabilité réglementaire et fiscale, complexité des procédures d'urbanisme, calendrier irrégulier des appels d'offres, lenteurs administratives, etc. Les conséquences sont malheureusement déjà visibles : les principaux *leaders* industriels sur ce marché en pleine croissance sont allemands, chinois, américains. Un marché dynamique en France est la condition préalable pour que des entreprises françaises puissent prendre toute leur place dans la compétition mondiale. Signe encourageant, la loi de transition énergétique prévoit, d'ici 2030, de porter la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale brute d'énergie soit 40 % du mix électrique. La poursuite de ces objectifs et le suivi efficace de leur mise en œuvre, seront les enjeux principaux de la décennie à venir si la France veut continuer à jouer un rôle de premier plan face aux enjeux énergétiques mondiaux.

1. IRENA – *Renewable Energy Statistics 2016*
2. Voir notamment les travaux du Professeur Michael GRÄTZEL de l'EPFL et du Professeur Prof Henry Snaith de l'Université d'Oxford
3. IRENA – *The Power to Change* – Juin 2016
4. Voir l'article de Yann Laot – *Le stockage d'énergie : une nouvelle ère pour une technologie au cœur de la transition énergétique*.
5. Voir l'article de Nicolas Ott – *La gestion sur les marchés de l'énergie renouvelable intermittente*.
6. RTE, *Bilan électrique annuel 2015*



**YANN LAOT (X02),**  
TECHNOLOGY INTELLIGENCE MANAGER,  
PROSPECTIVE DEPARTMENT CHEZ TOTAL NEW ENERGIES

## Le stockage d'énergie : une nouvelle ère pour une technologie au cœur de la transition énergétique

*« The storage battery is, in my opinion, a catchpenny, a sensation, a mechanism for swindling the public by stock companies. The storage battery is one of those peculiar things which appeals to the imagination, and no more perfect thing could be desired by stock swindlers than that very selfsame thing. [...] Scientifically, storage is all right, but, commercially, as absolute a failure as one can imagine. »*

Ainsi Thomas Edison, pourtant lui-même inventeur des batteries nickel-fer, dédaignait les batteries <sup>1</sup>. Les technologies de l'époque – plomb, nickel-fer – n'avaient tous simplement ni les performances, ni le coût pour s'imposer plus largement face à l'extension des réseaux électriques et l'essor du pompage-turbinage hydraulique en stationnaire, et face au véhicule thermique dans les transports.

**Le paysage en 2016 est sensiblement différent : les batteries sont partout**, couvrant quatre grands marchés que sont l'électronique civil (smartphones, outils portatifs, compteurs intelligents, etc.), la défense et l'espace, l'industrie (oil & gaz, télécoms, etc.) et les transports (allant du véhicule thermique aux bateaux, trains et avions).

**Et avec d'autres formes de stockage de l'énergie électrique ou thermique, les batteries ont désormais un impact grandissant sur le monde de l'énergie.** D'une part dans la mobilité avec une électrification croissante du transport (véhicules hybrides et tout-électrique, bus, etc.) et d'autre part dans le secteur de l'électricité, où le stockage constitue l'une des solutions clef à l'intermittence des renouvelables. Il s'agit donc d'un driver pour leur essor accéléré, aussi bien pour les applications liées aux fermes renouvelables et aux réseaux que pour les ressources distribuées comme le solaire photovoltaïque (résidentiel, commercial & industriel).

**Depuis Edison, les progrès scientifiques ont permis l'avènement de technologies de batteries bien plus performantes. Il n'existe cependant pas de batterie parfaite, ni plus généralement de technologie de stockage d'énergie parfaite : le marché est caractérisé par la coexistence de nombreuses chimies**, allant du

plomb (toujours prédominant), nickel-métal hydrure et nickel-cadmium au lithium-ion. Cette dernière, commercialisée au début des années 1990 et dont la haute densité d'énergie – en constante progression depuis – est la principale caractéristique, constitue un tournant technologique important, qui a soutenu la révolution de l'électronique portable grand public.

**Grâce à l'ouverture de nouveaux segments de marché, le lithium-ion est en croissance rapide**, représentant le tiers des ventes mondiales de batteries en 2015 et potentiellement les deux tiers à horizon 2030 <sup>2</sup>. **Cette importance grandissante se justifie par son adaptabilité** permise par ses nombreuses chimies et leurs avantages spécifiques, du nickel-cobalt-aluminium au fer-phosphate, en passant par le lithium-métal polymère, voir demain le lithium-soufre et le lithium-air, **par sa modularité** (de quelques W et Wh à plusieurs dizaines de MW et MWh), **par l'amélioration continue de ses performances** – densité, durée de vie, efficacité, sécurité – **et par la décroissance soutenue de ses coûts.**

Au-delà du lithium-ion, des technologies émergentes (de batteries : sodium-ion, zinc-air, redox-flow et des technologies de stockage par air comprimé, volants d'inertie, etc.) ouvrent de nouvelles perspectives, en particulier pour les applications stationnaires, où les contraintes portent plus sur le coût, la durée de vie et la modularité que sur la densité en énergie.

**Les opportunités de croissance associées sont importantes, de l'ordre de + 6 %/an (en valeur) pour l'ensemble du marché des batteries, supérieures à la croissance du PIB mondial** : les ventes mondiales pourraient ainsi passer d'environ 64 milliards de dollars en 2015 à 165 G\$ ou plus en 2030 <sup>2</sup>. Cette progression vient à la fois d'une croissance soutenue dans les

segments historiques, en particulier l'industrie et l'électronique civile, et de l'essor des nouveaux segments que sont la mobilité électrique (+ 15 %/an) et les applications stationnaires pour les réseaux et les renouvelables (+20 %/an).

Ce chiffre d'affaires n'inclut pas les éléments environnants – gestion thermique, systèmes de gestion de l'énergie, électronique de puissance, packaging, etc. – qui ajoutent encore en valeur ajoutée pour de nombreux acteurs du composant, de l'intégration système, du développement de solution, de l'installation, du financement, de l'opération et de la maintenance.

**Le marché des batteries est fragmenté, tant par la diversité des applications que par la différence de forte valeur ajoutée selon le type d'application et les segments de marchés adressés. La mobilité électrique de masse (automobile, bus) et le stationnaire pour les renouvelables et les réseaux, comme pour d'autres industries en très forte croissance par exemple le photovoltaïque, connaissent aujourd'hui une intense compétition caractérisée par une guerre des prix et des volumes.** Si l'Occident et l'Europe en particulier ont été le berceau des inventions successives de batteries et de leur industrialisation de 1870 à 1970 – 60 % de la production mondiale de batteries plomb est encore le fait d'industriels occidentaux – et si l'invention du lithium-ion est d'origine américano-française<sup>3</sup>, le barycentre du monde des batteries se situe aujourd'hui en Asie : 90 % des emplois industriels<sup>4</sup>, 90 % de la chaîne d'approvisionnement<sup>5</sup> et plus de 95 % de la production de cellules lithium-ion<sup>2</sup> sont localisés au Japon, en Corée et en Chine.

Pour autant le curseur commence à bouger, comme le montrent les investissements en cours dans de nouvelles usines de fabrication au Nevada et en Europe de l'Est.

**En effet avec une industrie du lithium-ion en croissance moyenne supérieure à +10 %/an (en valeur), connaissant une diminution moyenne des prix de -7 %/an<sup>6</sup> et une possible reconfiguration avec l'avènement des usines 4.0, une nouvelle course est engagée, à même de rebattre les cartes tout le long de la chaîne de valeur :** de nouveaux acteurs se lancent dans la fabrication de cellules lithium-ion, comme l'américain Tesla allié au japonais Panasonic, alors que dans le même temps le pionnier historique, le japonais Sony, est en passe de revendre ses activités de fabrication de cellules à son compatriote Murata. Et les frontières entre certaines chaînes de valeur se font plus floues, ainsi certains fabricants automobiles

comme Daimler ou Tesla se rapprochent d'un positionnement « plateforme », où la batterie est vue comme une compétence centrale dont la maîtrise permet d'adresser aussi bien leur marché cœur de la mobilité, que les marchés de l'énergie.

**Dans ce paysage en pleine évolution soutenu par une croissance porteuse, la France et l'Europe ont de nombreux atouts à faire valoir :** un R & D académique mondialement reconnue (RS2E, CEA, Alstom, etc.), des industriels nombreux couvrant toute la chaîne de valeur du stockage, des matériaux et de la fabrication à l'intégration système et l'opération, incluant aussi bien de grands groupes que des PME ou des *start-ups* (Total, EDF, ENGIE, Schneider, Bolloré, Umicore, Solvay, EasyLi, Forsee, PSA, Renault-Nissan, etc.).

**La France possède aussi un fleuron industriel de dimension internationale, SAFT** – désormais membre du groupe Total – leader mondial des batteries haute technologie et l'un des quelques fabricants occidentaux ayant pris – à l'échelle industrielle – le virage technologique du lithium-ion.

Le stockage d'énergie est une belle opportunité de croissance pour l'industrie européenne, qui demandera une stratégie à la hauteur des efforts déployés par les leaders asiatiques. Dans ce jeu de long terme entre les acteurs, Henri Kissinger<sup>7</sup> s'appuyait sur la différence entre les échecs et le jeu de go pour illustrer les différences de pensées entre Occident et Orient :

*« Chess has only two outcomes : draw and checkmate. The objective of the game is total victory or defeat. The aim of go is relative advantage ; the game is played all over the board, and the objective is to increase one's options and reduce those of the adversary. The goal is less victory than persistent strategic progress. »*

1. *The Electrician* (London) Feb. 17, 1883, p. 329
2. Avicennes 2016, *The Rechargeable Battery Market and Main Trends* Batteries toutes chimies confondues, mais sans les piles ni les stockages hydraulique et mécanique.
3. Rachid Yazami (FR-MA), Yoshio Nishi (JP), John Goodenough (USA) et Akira Yoshino (JP) <https://www.nae.edu/Projects/Awards/DraperPrize/DraperWinners/105792.aspx>
4. Duke University 2010, *Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles : The U.S. value chain*
5. HSBC Avril 2016, *Asia EV and Battery*
6. *Nature Climate Change* Mars 2015, *Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles*
7. *Newsweek* November 2004, Dr. Henry Kissinger





**NICOLAS OTT (X01),**  
MANAGING DIRECTOR AT E6 SA

## La gestion sur les marchés de l'énergie renouvelable intermittente

*Les énergies renouvelables électriques ont connu un fort développement en Europe depuis maintenant une vingtaine d'années. La situation est variable d'un pays à l'autre, mais globalement les énergies renouvelables sont devenues un élément important dans le développement du secteur électrique.*

Ce développement a été rendu possible grâce à la mise en place de systèmes de soutiens incitatifs avec comme schéma principal le système de tarif de rachat : un producteur renouvelable voit son électricité rachetée par un acheteur désigné par l'État pour une durée longue (typiquement entre 15 et 20 ans) à un prix fixé réglementairement. Cette visibilité a donné un cadre adéquat pour faire émerger des filières renouvelables et les faire monter en maturité par l'engouement d'investisseurs.

Cependant, ce système a ses limites car il n'est pas dynamique. Il ne tient pas compte des évolutions de prix dans une journée ou sur une plus longue période. Il ne tient pas compte directement de l'évolution de la consommation, etc. Or l'enjeu d'un système électrique est de pouvoir être dynamique, réactif pour mieux connecter une production de plus en plus variable avec une consommation de plus en plus pilotable.

On parle souvent de réseaux intelligents pour désigner la capacité du réseau à s'adapter à une flexibilité accrue. Mais pour permettre cela, encore faut-il que l'information sur cette flexibilité ou sur le besoin de flexibilité circule entre l'ensemble des acteurs. On le voit au niveau des questions d'effacement de consommation : c'est la transmission d'informations entre les consommateurs et les opérateurs d'effacement couplé au signal prix et aux données sur les contraintes du réseau qui permet d'apporter de nouvelles possibilités de flexibilité au système électrique.

Les mêmes problématiques se posent pour les énergies renouvelables et notamment les énergies renouvelables non pilotables comme l'éolien et le photovoltaïque. Leur intégration au marché permet d'intégrer plus facilement leur production à travers le signal prix.

C'est tout l'enjeu du mouvement qui est en cours en France et qui est déjà réalisé en Allemagne avec la mise en place d'un système

de soutien imposant de vendre l'électricité sur les marchés pour pouvoir ensuite bénéficier d'une prime *ex post*. Cette prime doit compenser les éventuels surcoûts des technologies renouvelables. Cette évolution nécessite néanmoins de nouvelles compétences pour valoriser une production renouvelable non pilotable et pour gérer l'information nécessaire à une bonne valorisation :

- Il faut prévoir précisément une production qui dépend de nombreux paramètres (vent, humidité, ensoleillement, température, etc.)
- Il faut mettre en place des stratégies de valorisation dynamique et adaptée à ces énergies qui dépendent des prévisions réalisées, des anticipations de prix, etc.

Ces compétences sont notamment apportées par un nouvel acteur : l'agrégateur. Il doit en particulier assurer le lien entre les producteurs et le marché. Ce n'est pas simplement un simple rôle d'intermédiaire. L'agrégateur doit pouvoir gérer de très importants flux d'informations permettant une gestion dynamique de l'électricité d'origine renouvelable. Ainsi, de nombreuses données météorologiques impactent le productible pour un champ photovoltaïque, une ferme éolienne ou une centrale hydraulique. Les données liées aux machines elles-mêmes mesurées en temps réel, les données de marché sur les bourses de l'électricité, les données d'équilibre globales du système électrique entre offre et demande impactent les prix.

Cette convergence entre électricité et gestion massive d'information (*Big Data*) est essentielle pour assurer la transition vers un système électrique intégrant massivement de la production non pilotable, de la consommation pilotable et des réseaux dynamiques. La maîtrise de l'information en temps réel, la capacité à prévoir dans un environnement très variable grâce à de nouveaux algorithmes va ainsi permettre d'accélérer la transition énergétique.



## Le véhicule électrique, projet de société

***La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la pollution rend inéluctable l'électrification des véhicules. La réponse à ces défis fera appel à une large gamme de solutions en fonction de la diversité des situations et des besoins. Mais le succès dépendra avant tout de la coopération entre toutes les parties prenantes : constructeurs automobiles, pouvoirs publics et consommateurs.***

Lors de la COP 21 à Paris, les États ont présenté de très nombreux plans d'action en vue de réduire leur empreinte carbone. Sans surprise, nombre de ces plans d'action concernent le transport routier, et parmi ceux-ci plus de la moitié contiennent des mesures visant à promouvoir la mobilité électrique.

### L'électrification, enjeu environnemental

Pour le véhicule particulier, cela signifie une réduction des émissions des véhicules vendus en 2050 de 50 % par rapport à aujourd'hui (soit - 5,3 % par an). L'amélioration des moteurs conventionnels ne permettant a priori qu'une réduction de 2 % à 3 % par an, l'écart ne saurait être comblé que par l'électrification des véhicules, sous toutes ses formes. Seule

L'électrification peut être réalisée avec une recharge des batteries sans apport externe : c'est le cas des voitures *mild hybrid* qui récupèrent l'énergie au freinage (gain de consommation de 4 % à 8 %) et des voitures *full hybrid*, rechargées par le moteur thermique comme les Toyota Prius I et II (gain de 10 % à 15 %). La vraie rupture vis-à-vis des énergies fossiles n'est toutefois actée que lorsque la recharge est assurée par le réseau électrique soit de façon exclusive comme pour la ZOE (réduction de 20 % à 90 % selon le mix énergétique), soit en association avec un moteur thermique qui peut entraîner les roues (Prius III par exemple) ou recharger les batteries, comme pour l'Opel Ampera (gain de 10 % à 80 %).

l'électrification des véhicules, associée à une amélioration du mix nécessaire à la production de l'électricité, peut permettre d'atteindre de tels taux de réduction d'émissions : une ZOE n'émet en effet que 16 g de CO<sub>2</sub> aux 100 km, à comparer aux 110 g d'une Clio Diesel. Dans ce contexte, tous les constructeurs ont développé un quasi-continuum de concepts de véhicules électrifiés (en se limitant aux véhicules légers).

### Des solutions mais pas de panacée

Il est difficile d'établir un classement dans l'absolu de ces différentes technologies, et leur diversité illustre le fait qu'il n'existe pas à ce jour de solution qui l'emporte haut la main sur toutes les autres. Tout dépend des usages et des attentes des utilisateurs, notamment en termes d'arbitrage entre autonomie, coûts et prestations dynamiques. Chaque degré d'électrification présente ses avantages et inconvénients.

L'hybridation légère (*mild hybrid*) consiste à intégrer une petite batterie Li-Ion en plus de la batterie classique au plomb, qui récupère de l'énergie au freinage. Cette énergie gratuite est réutilisée pour alimenter les auxiliaires de la voiture (chauffage, phares, *start & stop* s'il existe) ou apporter un complément de couple au moteur thermique au démarrage ou dans les phases d'accélération (cas des batteries de 48 V). Ces batteries ne sont pas assez puissantes pour permettre un roulage en mode 100 % électrique, mais la récupération d'énergie se traduit par des gains significatifs de consommation à un moindre coût.

Les *full hybrids*, dont le représentant historique est la Toyota Prius, disposent d'une batterie plus importante et sont capables de rouler en mode 100 % électrique sur quelques kilomètres (de 1 à 5 km en général). Les gains en consommation sont de même nature que pour la catégorie *mild hybrid*, même s'ils peuvent être plus significatifs du fait de la taille de la



batterie. Dans les deux cas, la seule source externe d'énergie pour le véhicule reste le carburant fossile. Même si cette technologie a été précurseur, elle est maintenant plutôt en perte de vitesse, le gain de CO<sub>2</sub> par rapport au surcoût se révélant moins compétitif que pour les alternatives (*mild hybrid* ou même diesel modernes), et la réduction du coût des batteries pousse les constructeurs comme Toyota à proposer des *plugged-in hybrids* en complément ou en lieu et place.

### Voitures branchées

On change alors de catégorie : les *plug-in hybrids*, comme les véhicules 100 % électriques, disposent d'un moteur électrique, d'une batterie plus importante, et surtout d'une prise leur permettant d'être alimentés directement par le réseau et donc de réellement rouler à l'électricité provenant d'une autre source que leur moteur à combustion. Dans cette catégorie, les offres varient en fonction de la taille de la batterie, qui détermine l'autonomie électrique disponible, et de la présence ou non d'un moteur thermique en complément de ladite autonomie. Dans certains cas, le moteur thermique peut faire rouler la voiture ; dans d'autres il ne sert qu'à recharger la batterie, la propulsion étant exclusivement électrique. À l'extrémité du spectre, on supprime le moteur thermique et on a le véhicule 100 % électrique, seul véhicule « zéro émission » (en roulage).

### Des gains dépendant des usages

Les gains en termes de consommation et de CO<sub>2</sub>, potentiellement beaucoup plus importants, dépendent en fait des usages (part de conduite 100 % électrique) ainsi que du contenu CO<sub>2</sub> de l'électricité utilisée. Les surcoûts de ces technologies sont également plus importants, en fonction notamment de la taille de la batterie et de l'existence ou non d'une double motorisation. Les prévisions sur le succès respectif de ces différentes technologies restent très incertaines et varient fortement selon les zones géographiques, notamment compte tenu de l'importance des politiques publiques en la matière et des réglementations.

### Le grand flou de l'évolution du marché

Aux États-Unis, les motorisations hybrides se sont développées plus rapidement qu'en Europe, en partie comme alternative

## On assiste à un rééquilibrage des stratégies des différents constructeurs

aux moteurs diesel pour améliorer l'efficacité des moteurs thermiques et respecter les règles CAFE de plus en plus contraignantes. Les véhicules hybrides ont représenté 86 % de ventes de véhicules électrifiés en 2014. Toutefois, on assiste actuellement à un basculement net vers les technologies *plug-in* qui concentrent les aides financières, et sont même devenues obligatoires dans quinze États dont la Californie.

### Une situation contrastée

En Europe, la situation est comme toujours plus fragmentée et contrastée par pays, mais on observe la même tendance : les *full hybrids*, significatifs depuis 2010, semblent atteindre une asymptote autour de 1,5 % des ventes totales. On assiste depuis 2012 à un décollage des modèles *plugged-in*, selon des rythmes et des mix très différents selon les pays.

À court terme, le marché des véhicules électrifiés reste très dépendant de facteurs non directement liés à la technologie elle-même, à savoir essentiellement la qualité des offres de produits mises en avant, associée aux politiques publiques et au niveau de maturité de l'écosystème (présence de bornes de recharges). Ce n'est qu'à plus long terme, lorsque les technologies seront plus banalisées et les politiques publiques moins déterminantes dans l'équation économique, que les différentes technologies seront discriminées par leur compétitivité intrinsèque.

### Des stratégies au départ divergentes

Dans ce contexte, les stratégies d'électrification des constructeurs dépendent à leur tour de deux facteurs : à court et moyen terme, le besoin de répondre aux réglementations (CAFE un peu partout, réglementation ZEV aux États-Unis, NEV en Chine, etc.) en lien avec leurs priorités géographiques et les segments de marché sur lesquels ils sont présents, et à long terme celui de se positionner sur les technologies les plus prometteuses d'un point de vue à la fois d'image de marque et de portefeuille technologique.

## Des choix clivants

On a ainsi assisté à des choix initiaux clivants. Renault et Nissan ont choisi de se positionner comme les *leaders* du véhicule zéro émission, en introduisant entre 2010 et 2012 cinq modèles de grande série 100 % électriques, dont trois sur des plateformes dédiées, et en visant des prix comparables aux véhicules thermiques équivalents. De fait, sur les 232 000 véhicules 100 % électriques vendus dans le monde en 2015, 36 % étaient de marque Renault ou Nissan. La Renault ZOE est le premier véhicule électrique vendu en Europe, et la Nissan Leaf le premier au niveau mondial.

Toyota a axé sa stratégie sur le *full hybrid* dès les années 2000 : la Prius, après des débuts laborieux, a connu un véritable succès commercial qui a forgé une image forte de Toyota dans ce domaine. Elle a contribué à populariser la technologie sur tous les marchés.

Daimler ou BMW ont pu se permettre de développer en parallèle les technologies hybrides rechargeables pour leurs modèles haut de gamme et des solutions 100 % électriques pour les plus petites voitures (Smart électrique, BMW i3).

D'autres groupes, comme Volkswagen ou le groupe Hyundai-Kia, ont eu des approches plus attentistes, focalisées dans un premier temps sur les véhicules hybrides pour concurrencer Toyota aux États-Unis, et ont fait des tests en électrifiant des modèles thermiques. Enfin, Tesla a bâti son succès sur une approche en rupture, attaquant le marché par le très haut de gamme tout électrique et évoluant vers des véhicules plus abordables.

## Une évolution vers des portefeuilles technologiques larges

Compte tenu des évolutions technologiques rapides et surtout de l'émergence d'un consensus sur le fait que la réponse au défi des réductions de CO<sub>2</sub> ne passera pas par une technologie unique, mais bien par un portefeuille de solutions d'électrification qui devront être appliquées de manière optimisée selon les segments de marché et les zones géographiques, on assiste actuellement à un rééquilibrage des stratégies des différents constructeurs, avec en définitive le développement par tous d'un portefeuille de technologies assez large.

Ainsi, l'Alliance Renault-Nissan dispose d'une offre *full hybrid* aux États-Unis et au Japon, et prépare des produits *plugged-in*, notamment pour les marchés nord-américain et chinois. Hyundai a développé une plateforme dédiée à l'électrique sur

le segment C avec trois solutions rechargeables sur le même véhicule, pouvant ainsi couvrir tous les marchés et tous les mix de motorisation. Volkswagen semble miser fortement sur l'hybride rechargeable mais prévoit également de proposer des versions 100 % électriques sur la plupart de ses modèles. Toyota propose maintenant des hybrides rechargeables (Prius III) et des véhicules purement électriques au Japon et aux États-Unis, même si ces derniers ne représentent pour l'instant que 5 % de ses ventes de véhicules électrifiés.

Par ailleurs, à l'horizon 2021, date d'entrée en vigueur du prochain palier de normes CO<sub>2</sub> en Europe, la plupart des modèles thermiques de tous les constructeurs seront équipés de technologies *mild-hybrid*.

## Un mouvement qui s'accélère

On comprend donc qu'il faut observer ces stratégies en mode dynamique, et que les différentes technologies d'électrification ne sont pas tant concurrentes que complémentaires.

Les prévisions s'appuient essentiellement sur des études de coût total d'utilisation, qui elles-mêmes dépendent énormément à court terme de l'évolution des politiques publiques, et à moyen terme de l'évolution du coût des technologies (notamment le coût des batteries par kWh). Il s'agit là de facteurs importants, nécessaires, mais pas suffisants, comme le montre très bien la diversité des performances selon les pays européens : la vitesse d'adoption des technologies *plugged-in* – du fait notamment de la disruption en termes d'usage qu'elles imposent (besoin de recharge au domicile ou sur l'espace public) – dépend avant tout de l'engagement coordonné de tous les acteurs de l'écosystème. C'est ce qui a fait leur succès en Norvège, et qui explique pourquoi la France est le premier pays européen en matière de véhicule électrique à ce jour : le véhicule électrique n'est pas l'affaire des constructeurs, mais c'est bien un projet de société. De ce point de vue, l'urgence environnementale, la multiplication des offres de véhicules électrifiés et des services associés (fort lien avec l'autopartage et le véhicule connecté et autonome à terme), le développement des infrastructures de recharge et les progrès significatifs des technologies de batteries pointent vers une accélération de cette adoption dans de nombreux pays dans les trois à cinq ans qui viennent. Les constructeurs s'y préparent activement.