

# UN REGARD SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

À quelques jours de la COP25 qui va se réunir à Madrid, les médias nous rappellent quotidiennement les enjeux planétaires attachés aux évolutions nécessaires de nos systèmes énergétiques.

BERTRAND COCHI (P67), vice-président du Club Mines Énergie – bertrand.cochi@mines-paris.org



Les incendies gigantesques qui dévastent la Californie sur des centaines de kilomètres carrés entraînant morts et désolation, la fonte des glaciers et des banquises polaires qui a un impact écologique majeur sur l'environnement, sont essentiellement dus à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les gaz à effet de serre sont à leur tour principalement dus à la combustion d'énergies fossiles. Malgré tout cela, la Chine, qui possède la moitié du nombre de centrales à charbon dans le monde en puissance installée, donne le mauvais exemple puisqu'elle va augmenter de 30% ses capacités d'ici 2030, alors que le nombre de centrales à charbon en construction recule partout dans le monde et que leur nombre en exploitation se réduit en Europe.

La biomasse, l'hydroélectricité, le solaire, l'éolien, le pétrole, le gaz ou le nucléaire sont des ressources qui peuvent remplacer le charbon.

Dans ce dossier, nous n'allons pas évoquer toutes ces ressources mais deux d'entre elles, le gaz et le solaire.

Thierry Trouvé nous brosse un tableau de l'utilisation actuelle du gaz en France et dans le monde, ses perspectives de développement, ainsi que l'utilisation des réseaux pour transporter des gaz renouvelables. C'est aussi un sujet qu'aborde Emmanuel Mannoorettonil dans son article.

Sylvain Cros nous présente le gigantesque potentiel de valorisation de l'énergie solaire.

Les problèmes de ressources sont-ils cependant les mêmes sur tous les continents? L'article de Stéphane Woerther nous éclaire sur l'état actuel des ressources d'énergie électrique et les difficultés des projets de production de cette énergie en Afrique. Ce continent possède un énorme potentiel qu'il est pourtant difficile de valoriser, cet article en identifie les causes.

Les États jouent un rôle essentiel dans la définition des politiques énergétiques de leurs pays respectifs. Comme le montre Jacques Maire dans son article, la profusion de règles administratives mises en place en France et en Europe est un frein à la mise en place de la Transition Énergétique, au point qu'on en oublierait le sujet lui-même.

Cette Transition Énergétique, indispensable, sera-t-elle heureuse? François Giger et Jean Pierre Capron mettent en perspective les évolutions de l'énergie et du climat face à toutes les questions posées. Ils nous proposent des pistes de réflexion sur l'attitude à adopter (gouvernance, phénomènes sociétaux...) vis-à-vis de ces questions.

Ce dossier présente un regard qui se veut objectif sur les ressources en énergie et la transition énergétique. Ce sujet essentiel sera à coup sûr évoqué de nouveau dans de futurs dossiers de la revue, car il nous accompagne pour longtemps. ▲

Dossier coordonné par  
**BERTRAND COCHI (P67)**  
vice-président du Club Mines Énergie



## BIO

Diplômé des Mines de Paris en 70 il poursuit un PhD en Computer Sciences à l'Université de Stanford USA, diplôme obtenu en 1973. Il a travaillé essentiellement dans l'Industrie: 10 ans chez Michelin et 10 ans comme Directeur General d'une PME de biens d'équipements. Expert du Lean Management et de la conduite du changement il aide les entreprises dans leur transformation. Ses centres d'intérêt sont l'énergie et l'éducation. Il est VP de MINES ParisTech Alumni et du club Mines Energie.

# LE GAZ, UNE ÉNERGIE D'AVENIR



**THIERRY TROUVÉ (P80)**  
CEO de GRTgaz

**BIO**

Directeur général de GRTgaz depuis le 26 avril 2013, Thierry Trouvé était directeur général de la société Elengy entre 2009 et 2013. Il a commencé sa carrière au ministère de la Défense avant d'occuper différentes fonctions à la RATP (1990) puis à la DRIRE Nord-Pas de Calais (1996). En 2000, il intègre la Commission de régulation de l'énergie (CRE), en tant que Directeur du marché et du service public de l'électricité. En 2003, il est nommé Directeur de la prévention des pollutions et des risques – délégué aux risques majeurs – au sein du ministère de l'Écologie et du Développement Durable. En 2006, il devient directeur général adjoint de GRTgaz.

**Les évolutions récentes et les perspectives de développement du gaz sont radicalement différentes selon les zones géographiques. Dans le monde, la demande de gaz naturel croît rapidement, et devrait continuer sur cette lancée même dans le scénario le plus bas (pour le gaz) de l'Agence Internationale de l'Énergie. Mais la France (et l'Europe) anticipe une baisse de sa consommation et une substitution progressive du gaz naturel par des gaz renouvelables, qui, du fait de leurs nombreux avantages, conserveront un rôle clé dans l'économie "zéro carbone".**

THIERRY TROUVÉ (P80), CEO de GRTgaz - thierry.trouve@mines-paris.org

**UTILISATION ACTUELLE DU GAZ, EN FRANCE ET DANS LE MONDE**

Avec près de 3 300 Mtep de consommation primaire dans le monde en 2018, la demande de gaz naturel n'a jamais été aussi élevée, et le gaz représente aujourd'hui près d'un quart de l'approvisionnement primaire en énergie dans le monde (23%), derrière le pétrole (32%) et le charbon (26%). Le gaz est aussi une des principales énergies utilisées en France: en 2018, avec une consommation primaire de 37 Mtep et une consommation finale à 30 Mtep, le gaz a assuré 20% de la demande finale d'énergie derrière le pétrole (42%), juste derrière l'électricité (24%). Pour autant, la place du gaz dans l'approvisionnement primaire n'est que de 15% en France, notamment en raison de l'importance du nucléaire dans notre pays (41% de l'énergie primaire)<sup>1 et 2</sup>.

En France, le gaz est principalement utilisé pour des usages finaux (procédés industriels, chauffage des bâtiments, eau chaude sanitaire et cuisson représentent plus des trois quarts de la consommation), alors qu'en Europe et dans le monde, le gaz tend à être plus fortement utilisé pour produire de l'électricité, comme le montre le graphique "Répartition de la consommation de gaz par secteur" ci-contre.

Même s'il est encore minoritaire, l'usage du gaz pour la mobilité s'est développé rapidement ces dernières années dans le monde, et il atteint 49 Mtep en 2018, un chiffre proche de la consommation primaire de gaz de l'Inde (50 Mtep en 2018), et supérieur à la consommation primaire française. En France, l'usage du gaz pour le transport est concentré sur les véhicules lourds (>3,5t) et le transport public (bus), mais le gaz est aussi largement utilisé pour les véhicules légers dans plusieurs pays, tels que l'Italie, le Brésil ou l'Iran.

Les propriétés physiques du gaz (bien plus simple à stocker que l'électricité) rendent le système gazier particulièrement adapté pour répondre à des variations rapides de la demande, que ce soit à l'échelle annuelle, mensuelle ou journalière. Ainsi, en France, la demande de gaz varie nettement plus entre été et hiver que la demande d'électricité, et la pointe de demande (en puissance) est plus élevée (voir graphique "Puissances journalières moyennes en France" ci-contre).

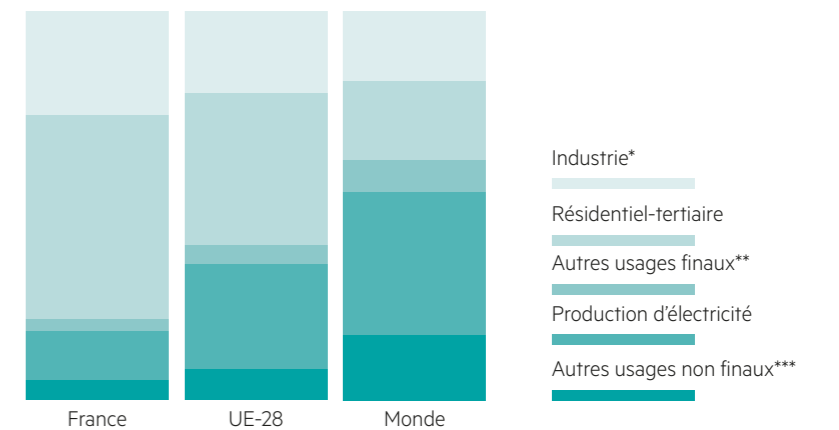
De fait, la demande de gaz varie chaque année en grande partie en fonction des conditions climatiques (forte demande en cas d'hiver rigoureux). Les conditions climatiques ont également un impact sur l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité et donc sur la demande de gaz pour les centrales électriques, car le gaz constitue une indispensable "énergie de bouclage" au sein du système électrique.

Sur le plus long terme, la demande de gaz tend à baisser en France, du fait des efforts d'efficacité énergétique: amélioration des procédés industriels, meilleure isolation thermique des bâtiments (rénovation de l'existant, normes pour les bâtiments neufs), amélioration des systèmes de chauffage (par exemple remplacement des chaudières anciennes par des chaudières à condensation), qui réduisent la demande énergétique de la France, et dont l'effet fait plus que contrebalancer la croissance de la population et de l'activité économique.

Mais ces effets concernent toutes les énergies, et la demande de gaz ne baisse pas plus vite que la demande énergétique totale. De fait, la part du gaz dans la demande primaire est relativement stable en France, oscillant autour de 15% depuis une vingtaine d'années.

**Répartition de la consommation de gaz par secteur, 2018**

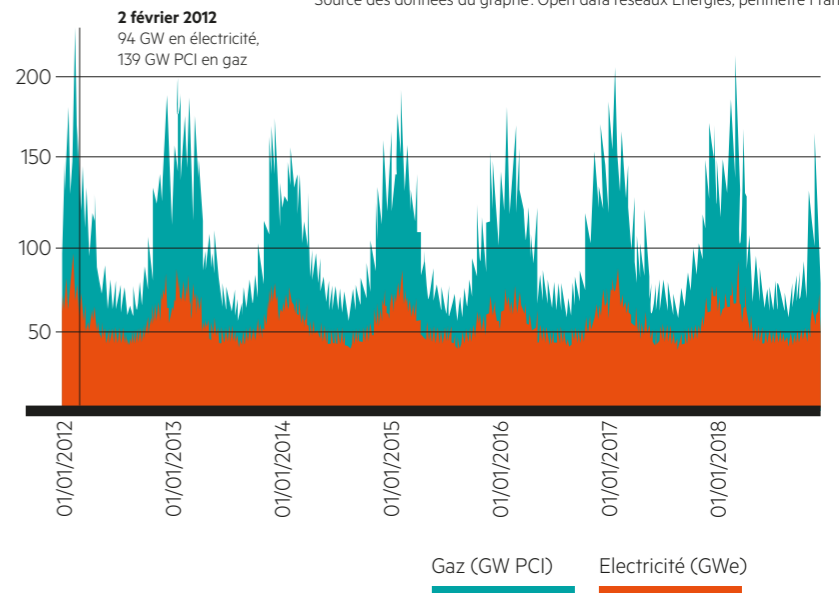
Source des données: Enerdata



\* hors usages non énergétiques  
\*\* agriculture, transport, usages non énergétiques  
\*\*\* chauffage urbain, raffineries et autres usages dans le secteur énergétique

**Puissances journalières moyennes en France, cumulées (GW)** (données non corrigées du climat)

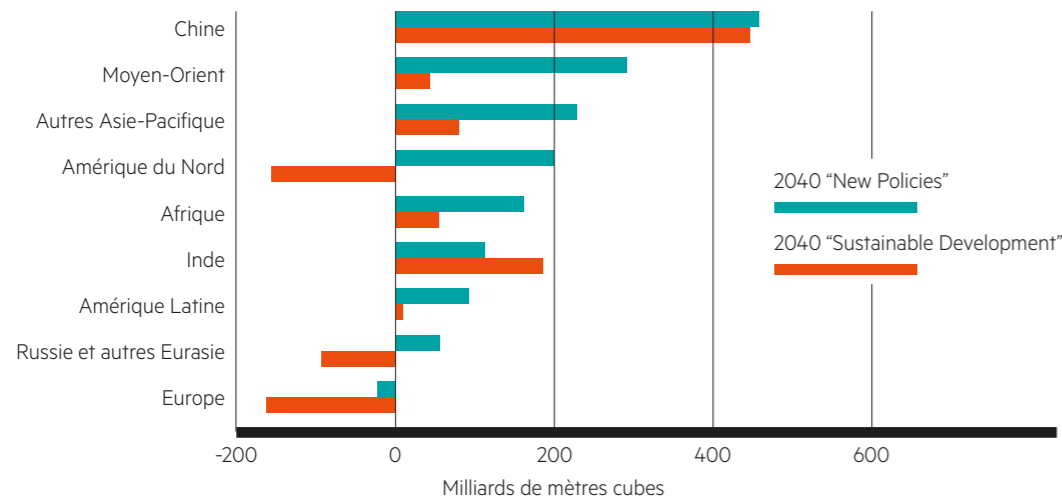
Source des données du graphe: Open data réseaux Énergies, périmètre France



## Variation de la demande de gaz entre 2017 et 2040, par région et par scénario

(World Energy Outlook 2018, Agence internationale de l'énergie)

Source des données: Agence internationale de l'énergie



►► La situation est radicalement différente au niveau mondial: les effets de la croissance de la population et de l'activité économique dépassant les efforts d'efficacité énergétique, la demande d'énergie ne cesse d'augmenter (notamment tirée par la Chine), et la demande de gaz augmente encore plus vite – la part du gaz dans l'approvisionnement primaire mondial est passée de 20 % en 1998 à 23 % en 2018.

### POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT DU GAZ

Les perspectives de croissance de la demande sont également très différentes selon que l'on regarde au niveau français (et européen) ou mondial. À long terme, les projections dépendent aussi en grande partie des hypothèses que l'on retient en matière de volontarisme politique sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, afin de faire face au défi du changement climatique.

### Au niveau mondial, une forte croissance anticipée

Au niveau mondial, l'Agence Internationale de l'Énergie estime que la demande de gaz devrait continuer de croître nettement dans tous les cas: ainsi, dans l'édition 2018 de son *World Energy Outlook*<sup>3</sup>, l'agence prévoit une augmentation de +43 % entre 2017 et 2040 dans son scénario central *New Policies*<sup>4</sup>, et de +23 % dans son scénario *Sustainable Development*, pourtant nettement plus exigeant en matière de diminution des émissions de gaz à effet de

serre, puisqu'il vise une baisse de 45 % des émissions mondiales entre 2017 et 2040. (voir graphique "Variation de la demande de gaz entre 2040 et 2017"). Du reste, dans ce scénario, le gaz naturel est le seul combustible fossile dont la consommation croît.

En effet, le gaz naturel est le plus propre des combustibles fossiles, et son emploi permet des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> substantielles quand il remplace du charbon, notamment dans la production d'électricité: le contenu CO<sub>2</sub> du combustible est plus faible (227 gCO<sub>2</sub>/kWh PCI pour le gaz contre 375 à 390 gCO<sub>2</sub>/kWh PCI pour le charbon et le lignite<sup>5</sup>) et le rendement des cycles combinés à gaz (CCGT) peut atteindre 60 %, alors que le rendement d'une centrale à charbon est typiquement inférieur à 40 %. Ainsi, au total, recourir à une CCGT plutôt qu'à une centrale à charbon permet de réduire de près de 60 % les émissions de CO<sub>2</sub> pour produire la même quantité d'électricité, ce qui fait du gaz une solution particulièrement intéressante pour réduire les émissions dans les pays qui utilisent encore le charbon et qui ont besoin d'une source d'électricité pilotable (à la différence des renouvelables électriques comme le solaire ou l'éolien qui, bien que leurs coûts de production aient baissé, restent soumis aux aléas météorologiques).

Mais les hausses anticipées de demande de gaz devraient se concentrer en Asie (Chine, Moyen Orient, Inde), car en

Europe et en France, selon la façon dont les objectifs climatiques seront fixés et respectés, les projections anticipent au mieux une stabilité de la demande de gaz – plus probablement, une baisse accompagnant celle de la consommation énergétique dans son ensemble – et le gaz consommé devra devenir renouvelable en très grande partie (voire à 100 % à terme) pour permettre d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

### En Europe et en France: sobriété et à terme, remplacement total du gaz naturel par les gaz renouvelables

Ainsi, afin d'atteindre cet objectif de "zéro émissions nettes", la Stratégie Nationale Bas Carbone française (SNBC) publiée fin 2018 vise une baisse de 50 % de la demande toutes énergies confondues à horizon 2050, objectif qui demandera d'importants efforts d'efficacité énergétique (moins d'énergie pour le même service ou confort) et de sobriété (renoncement à certains services, moins de confort) et dont l'atteinte n'est pas garantie.

Dans ce cadre, la consommation de gaz en France suivrait ce mouvement, baissant de 35 % (hypothèse haute) à 55 % entre 2015 et 2050<sup>6</sup> (cf. graphique "Consommation nationale de gaz y compris hydrogène" ci-contre), tout en devenant renouvelable à presque 100 %. De fait, la part du gaz au sein du bouquet énergétique national ne reculerait pas de façon drastique dans ce scénario, illustrant – au moins de façon partielle – le fait que certains usages ne peuvent pas être électrifiés<sup>7</sup>, que le gaz permet de stocker, de transporter et de moduler de forts volumes d'énergie, et plus généralement que les différents types de gaz renouvelables offrent de nombreux avantages (cf. partie 3) qui rendent pertinent le maintien d'une part significative de l'énergie gaz dans le bouquet énergétique national. Cette part pourrait même être supérieure, car l'ADEME, dans son étude de 2018 "un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?"<sup>8</sup>, a établi la présence en France d'un important potentiel de production de gaz renouvelables, proche de la demande actuelle de gaz naturel, et donc supérieur à la demande anticipée en 2050 dans la SNBC – et au-delà, la SNBC ne prend pas en compte la possibilité d'importation (même marginale) de gaz bas carbone.

À plus court terme, la Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte (LTECV) de 2015 fixe un objectif de 10 % de biométhane dans la consommation de gaz en 2030. Le Comité de prospective de la CRE (2019)<sup>9</sup> a jugé qu'"au regard des ressources disponibles sur le territoire", cet objectif de 10 %, était "réaliste", notant qu'il représente "une production de 39 à 42 TWh de biométhane".

### Un potentiel de croissance dans les transports

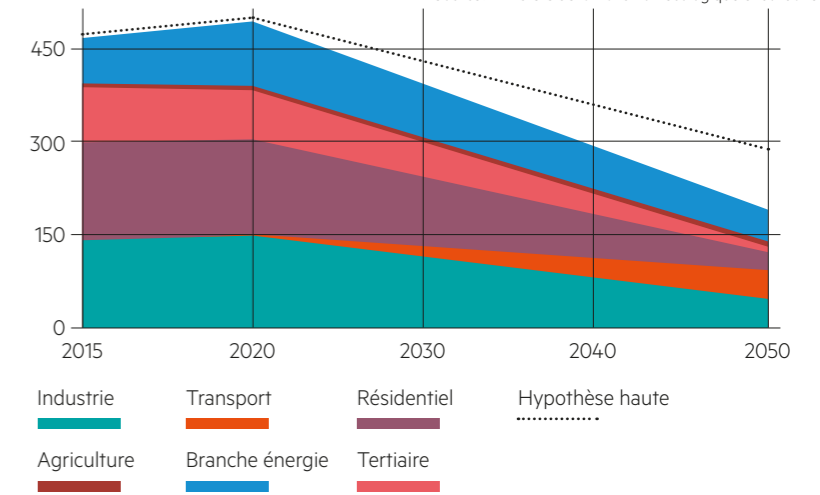
La baisse anticipée de la demande de gaz en France ne concerne pas tous les secteurs, et la demande de gaz pour le transport (notamment poids lourd) devrait augmenter car le gaz présente de nombreux avantages pour permettre une mobilité respectueuse de l'environnement:

- Par rapport aux véhicules classiques, le gaz permet une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pouvant dépasser -80 % grâce aux gaz renouvelables; de plus, les véhicules au gaz (GNV) émettent des quantités de polluants très inférieures aux seuils de la norme Euro 6, en particulier sur les émissions d'oxydes d'azote et les émissions de particules, avec un maintien des performances environnementales sur toute la durée de vie des véhicules; ces avantages sont cruciaux car la pollution de l'air est responsable de 48 000 à 67 000 morts prématurées par an en France<sup>10</sup>; par ailleurs, les véhicules à gaz permettent une réduction du bruit;
- par rapport à l'électricité, les solutions de mobilité au gaz offrent une bien plus grande vitesse de recharge pour les utilisateurs, avec moins de contrainte sur les réseaux existants, une plus grande autonomie, et l'absence de batterie permet de réduire les impacts sur l'environnement (en termes de matériaux nécessaires à la construction et à cause du recyclage);

## Consommation nationale de gaz y compris hydrogène

(TWh PCS)

Source: Ministère de la transition écologique et solidaire



Principal gestionnaire de réseau de transport en France, GRTgaz a signé la campagne "Le Gaz. L'Énergie des Possibles.", conçue avec le souci prioritaire de porter un nouveau regard sur l'énergie gaz et donner confiance dans son potentiel. Illustré ici : le Power To Gas.



►► Pour toutes ces raisons, et comme prévu par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et la SNBC, la place du gaz dans les transports est amenée à se renforcer, en particulier pour le segment des poids lourds, pour lequel le véhicule électrique n'est pas une solution adaptée.

Le GNV est d'ailleurs soutenu en France par une fiscalité avantageuse, bénéficiant d'une taxe à la fois faible et stable jusqu'en 2022 selon la loi de finance actuellement en vigueur. Les véhicules GNV (≥3,5t) ouvrent droit à un suramortissement qui atténue le surcoût à l'achat du véhicule. L'État et en particulier l'ADEME encouragent également le développement des stations d'avitaillement. Le gaz (sous forme de GNL) est aussi une solution adaptée au transport maritime, et permet des réductions massives de polluants par rapport au fuel lourd : -99% d'émissions de soufre et de particules fines, -85% d'émissions d'oxydes d'azote. De plus en plus d'armateurs font ce choix, comme par exemple le Groupe CMA CGM<sup>11</sup>.

#### LES GAZ RENOUVELABLES: R&D ET IMPACTS

Il existe différentes filières de production de gaz renouvelables, qui ont en commun de produire un gaz au contenu CO<sub>2</sub> (en analyse de cycle de vie) très faible, et bien plus faible que le gaz naturel auquel ils peuvent se substituer en tant qu'énergie.

Les différentes filières ne sont pas à ce jour au même niveau de maturité. Ainsi, le développement de la production des gaz renouvelables s'appuiera essentiellement sur la filière méthanisation à court terme – dès aujourd'hui, les producteurs de biométhane peuvent bénéficier d'un tarif d'achat réglementé et garanti sur 15 ans s'ils l'injectent dans les réseaux – mais la recherche est active dans toutes les filières, en particulier dans l'hydrogène.

#### Gaz issus de biomasse : biométhane, pyrogazéification et algues

Différents types de ressources en biomasse permettent de produire des gaz renouvelables essentiellement composés de méthane (après épuration), par 3 procédés distincts :

- Méthanisation : voie biologique fondée sur l'utilisation de micro-organismes pour décomposer de la matière organique humide ; c'est le principal mode de production actuellement ;
- Pyrogazéification : voie thermo-chimique traitant la biomasse sèche ;
- Gazéification hydrothermale : procédé de conversion thermo-chimique en eau supercritique de biomasses liquides organiques ayant un taux de matières sèches inférieur ou égal à 25% (effluents industriels, effluents agricoles, effluents agro-alimentaires, boues de STEP, digestats, algues).

Les recherches actuelles travaillent à améliorer ces procédés et à faire baisser les coûts de ces différentes filières pour les rendre plus compétitives avec les énergies fossiles et les autres énergies renouvelables. Par exemple, comme l'indique le comité de prospective de la CRE sur le biométhane en juillet 2019, "le développement massif de la filière [de méthanisation] permet d'envisager une baisse significative, de l'ordre de 30 à 60 €/MWh, des coûts de production [de cette filière] qui se situent actuellement entre 90 et 120 €/MWh".

Avec un coût à la tonne de CO<sub>2</sub> évitée de 200€/tCO<sub>2</sub> selon le Trésor Public<sup>12</sup>, le biométhane est pertinent pour la réduction des émissions dans la transition énergétique, puisque la valeur de l'action pour le Climat révisée récemment par la Commission Quinet doit atteindre 250 €/tCO<sub>2</sub> en 2030<sup>13</sup> (et par définition, "toutes les actions de décarbonation dont le coût d'abattement est inférieur à la moyenne de la valeur tutélaire du carbone actualisée sur la durée de l'action sont pertinentes pour la collectivité" pour atteindre la neutralité carbone en 2050<sup>13</sup>).

De plus, au-delà des aspects strictement énergétiques et climatiques, la production de biométhane offre une variété de bénéfices économiques, environnementaux et sociaux, décrits notamment dans le rapport du Comité de prospective de la CRE<sup>9</sup> : limitation de la pollution des eaux, réduction des coûts de traitement des déchets, diminution du recours aux engrais minéraux azotés grâce au résidu du procédé de méthanisation, préservation de la biodiversité au travers des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), diminution de la pollution par les nitrates, développement économique local et création d'emplois. Du fait que peu d'équipements sont importés (par rapport au photovoltaïque - PV - et à l'éolien), et que la production de biométhane permet d'éviter l'importation de gaz naturel, le développement du biométhane a un impact favorable sur le développement d'une filière industrielle d'excellence et sur la balance commerciale de la France. Et comme le montrent les chiffres de l'ADEME, la filière biogaz/biométhane est plus intensive en emplois locaux et apporte un chiffre d'affaires complémentaire pour les

agriculteurs plus important à l'€ de subvention publique<sup>14</sup>, par rapport aux filières PV ou éolienne.

#### Power-to-gas, hydrogène et interactions avec le système électrique

Le Power-to-gas désigne la conversion d'électricité d'origine renouvelable en hydrogène, par électrolyse de l'eau. Cet hydrogène peut être utilisé sur site (par exemple pour des procédés industriels), injecté dans un réseau (dédié ou non), ou combiné avec du CO<sub>2</sub> (par exemple issu de la production de biométhane) pour produire du méthane qui peut alors être considéré comme renouvelable et sera injecté dans les réseaux.

Cette technologie tire ainsi parti du système gazier sur deux aspects : elle permet le transport de grandes quantités d'énergie sans développement de nouvelles infrastructures, alors que l'acceptabilité de nouvelles lignes électriques est sujette à débat, et elle permet le stockage de fortes quantités d'énergie sur de longues périodes de temps, utile dans un monde où les ENR électriques intermittentes – éolien, PV – sont appelées à prendre une part importante dans le mix énergétique.

En particulier, se pose la question du stockage inter-saisonnier de l'électricité car l'ensoleillement et donc la production photovoltaïque sont 3 fois plus importants en été qu'en hiver, tandis que la demande d'électricité est 50% plus élevée en hiver qu'en été du fait des besoins de chauffage. Dans l'état des connaissances actuelles, il n'est pas envisagé que ce type de situation puisse être géré par les batteries, qui sont généralement utilisées pour transférer des volumes limités d'énergie sur quelques heures. De même, le stockage d'énergie par air comprimé et le stockage hydroélectrique par pompage fournissent des capacités de stockage trop limitées (en France, le parc hydraulique ne peut stocker que quelques jours de consommation), et sont généralement utilisés sur des horizons plus courts.

Le Power-to-gas est actuellement la seule technologie considérée capable de stocker et transférer des volumes de l'ordre du TWh d'énergie sur plusieurs mois – en profitant des infrastructures de stockage de gaz actuelles, qui permettent dès aujourd'hui de stocker l'équivalent de plusieurs mois de consommation.

Ainsi, alors qu'il est utilisé quasi-exclusivement aujourd'hui comme une matière première, l'hydrogène pourrait devenir dans les prochaines décennies un vecteur énergétique important dans les économies neutres en carbone, et de fait, de nombreux scénarios d'évolution du mix énergétique à long terme en France ou en Europe lui réservent une place non négligeable.

L'intérêt de l'hydrogène renouvelable dans la transition énergétique a été souligné en 2018 par les pouvoirs publics français (Plan Hulo<sup>10</sup>). Aussi, le Ministère de la Transition écologique et solidaire a confié aux opérateurs la mission de définir dans quelles conditions les mélanges d'hydrogène et de biométhane peuvent être accueillis dans les infrastructures françaises. Les travaux actuels de recherche et développement s'intéressent à ces ques-

tions. Les opérateurs travaillent également à identifier et évaluer les évolutions potentiellement nécessaires de leur outil industriel et l'impact sur les infrastructures gazières adjacentes.

L'engagement des opérateurs d'infrastructures gazières s'exprime d'ores et déjà par plusieurs pilotes ou projets dont notamment le projet Jupiter 1000 qui explore les aspects de couplage des énergies renouvelables intermittentes et des réseaux gaz.

#### CONCLUSION

Alors que la consommation de gaz continuera d'augmenter dans le monde, atteindre la neutralité carbone en France et en Europe comporte de nombreuses inconnues. Pour en rendre le coût supportable, il conviendra de tirer le meilleur parti de toutes les énergies bas carbone – et des réseaux de gaz déjà installés – en raisonnant à l'échelle du système énergétique dans son ensemble et en synergie avec les politiques publiques telles que la gestion des déchets ou l'agriculture.

Pendant ce temps, le rôle d'un transporteur de gaz tend à s'élargir : transporter des gaz renouvelables, y compris issus de l'électricité, piloter des productions décentralisées et faire le lien entre les territoires pour assurer la solidarité nationale, permettre la sécurité d'approvisionnement – en gaz mais aussi en électricité – en facilitant le stockage d'énergie via le vecteur gaz, ou encore transporter du CO<sub>2</sub> pour permettre le CCS (capture-stockage du carbone) technologie dont le GIEC a rappelé l'intérêt dans son rapport de 2018<sup>15</sup>.

Ainsi, face à un futur incertain, les vertus du système gazier font de lui un accélérateur de la transition, une assurance pour l'avenir et un choix sans regret. ▲

1- Enerdata et MTES (sur [www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr)) : <http://bit.ly/2NidqXO>

2- On rappelle que par convention, la production primaire d'énergie nucléaire est égale à 3 fois l'énergie électrique produite (autrement dit, 2/3 de la production sont perdus sous forme de chaleur). Cette convention explique l'écart entre la part de l'énergie primaire assurée par le nucléaire et la part de l'électricité dans la demande finale.

3- <https://www.iea.org/weo2018/>

4- Scénario qui anticipe un renforcement modéré des politiques climatiques, mais dans lequel les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie augmentent tout de même de 10% entre 2017 et 2040

5- ADEME, base carbone – chiffres combustion + émissions amont

6- À plus court terme, à horizon 2028, le projet de PPE vise une baisse de la consommation de gaz de 16% par rapport à 2012

7- Par exemple, procédés à haute température dans l'industrie, ou mobilité poids lourd (cf. partie sur le transport)

8- [www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050](http://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050)

9- sur [www.eclairerlavenir.fr](http://www.eclairerlavenir.fr) : <http://bit.ly/2NWicKy>

10- sur [www.santepubliquefrance.fr](http://www.santepubliquefrance.fr) : <http://bit.ly/2MnyUMd>; ainsi que sur [academic.oup.com](http://academic.oup.com) : <http://bit.ly/31Qeir7>

11- sur [www.cma-cgm.fr](http://www.cma-cgm.fr) : <http://bit.ly/2CV8mCS>

12- sur [www.tresor.economie.gouv.fr](http://www.tresor.economie.gouv.fr)

13- France Stratégie, "La valeur de l'action pour le climat", février 2019 : <http://bit.ly/2NXrczS>

14- ADEME : <http://bit.ly/2NYaiRs> et <http://bit.ly/33XGF8n>

15- <http://bit.ly/35dUSOY> - le CCS appliqué aux émissions issues de la biomasse (BECCS) est indispensable dans la plupart des scénarios pour limiter le changement climatique à 1,5°C

# GAZ ET, TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

## Production électrique, usages, renouvelables... quels rôles le gaz peut-il jouer dans la transition énergétique? Revue de détail.

EMMANUEL MANNOORETONIL (P98), Vice-Président Nouvelles Activités et Innovation de Butagaz – emmanuel.mannoorettonil@mines-paris.org

### Dans un contexte de transition énergétique, le gaz a-t-il plus d'avenir que le pétrole?

Ce que l'on désigne communément sous le nom de "transition énergétique" est un ensemble de moyens pour répondre à l'objectif de réduire les émissions et pollutions liées aux besoins en énergie. Derrière cette expression générique, les enjeux et approches sont divers et dépendent parfois des situations locales, ce qui fait que la transition énergétique recouvre des idées assez hétéroclites.

L'électrification des usages figure souvent parmi les premiers leviers des scénarios de transition énergétique. En effet, la consommation finale d'électricité ne génère pas de gaz à effet de serre, donc une avancée consisterait à convertir des usages d'énergies fossiles à l'électricité (par exemple passer de la voiture essence à la voiture électrique) tout en augmentant la production d'électricité à faible bilan carbone.

Comme l'électricité se stocke moins bien que les combustibles fossiles qui composent l'essentiel du mix énergétique traditionnel, le débat sur l'avenir du gaz porte d'abord sur son rôle dans le stockage et la couverture des besoins de "pointe". La deuxième question est la possibilité de remplacer le gaz fossile par du gaz renouvelable.

### Pour quels usages aura-t-on besoin de gaz dans la transition énergétique?

On peut trouver des intérêts à l'utilisation du gaz dans divers usages: remplacer le fioul dans le chauffage résidentiel, remplacer le diesel dans le transport routier ou (dans les pays en développement) remplacer avantageusement le bois et le charbon par du gaz en bouteille pour la cuisson domestique.

Mais le rôle le plus large se trouve dans le secteur électrique. En effet, l'électrification des usages n'aura de sens du point de vue de la réduction des émissions que si la production d'électricité elle-même est "décarbonée". Dans ce contexte, le gaz naturel a souvent été présenté comme une des solutions de transition accessibles dans une perspective mondiale: les centrales électriques au gaz permettraient de répondre aux nouveaux besoins en électricité avec une solution immédiatement disponible, économiquement compétitive et avantageuse d'un point de vue environnemental par rapport au fioul ou au charbon (moins de CO<sub>2</sub>, mais aussi de particules fines ou de NOx).

### La production d'électricité à partir du gaz contribuera-t-elle à la transition énergétique?

Ce discours a perdu de sa force, notamment du fait de la baisse des coûts du renouvelable: la majorité des nouvelles capacités de production d'électricité construites dans le monde aujourd'hui sont des capacités "renouvelables", c'est-à-dire solaire photovoltaïque, éolien, hydraulique.

En particulier dans le contexte français, dominé par l'électricité nucléaire bas carbone et avec une demande stable, les nouvelles capacités de production électriques au gaz intéressent peu. Les centrales gaz existantes ont d'ailleurs été faiblement utilisées ces dernières années. Elles occupent une place réduite dans les plans nationaux. Ainsi, la stratégie nationale bas carbone (SNBC) définit des scénarios d'atteinte de la neutralité carbone à l'échelle de la France à horizon 2050. Le scénario de référence suppose une réduction importante de la consommation totale, et l'électrification en particulier du transport terrestre (notamment le remplacement massif des véhicules

thermiques par des véhicules électriques). La consommation totale de gaz diminue de plus de moitié dans ce scénario entre 2020 et 2050, en particulier dans la production d'électricité et le chauffage des bâtiments.

L'Association Française du Gaz (AFG), dans une étude publiée en mars 2019<sup>1</sup>, s'inquiète de la couverture des besoins d'électricité de pointe dans ce scénario. D'après cette étude, dans le scénario SNBC, malgré la baisse globale de la demande, le remplacement des capacités nucléaires et fossiles par de l'électricité renouvelable non pilotable pourrait créer un déficit de capacité de production électrique en pointe. Si les objectifs d'économies d'énergie n'étaient pas atteints, ce déficit serait d'autant moins gérable. L'AFG rappelle qu'on peut compter sur le gaz, stockable en quantité importante pendant toute une saison, pour répondre à ce déficit, notamment en conservant une place pour les centrales gaz dans la production d'électricité.

Il y a là un enjeu critique pour les infrastructures gazières: aujourd'hui établies et entretenues, elles ne resteront pertinentes que si elles sont utilisées largement et longtemps. Dans des scénarios de faible consommation de gaz, avec une planification "forcée", on pourrait imaginer de se passer de portions des réseaux actuels. À l'inverse, on peut considérer les réseaux comme des avantages existants à exploiter, ce qui est la logique défendue par l'industrie gazière.

### Quels gaz et quelles sources de gaz?

Pour que la recommandation de l'AFG n'altère pas l'objectif de neutralité carbone, il faut par ailleurs une stratégie pour remplacer le gaz fossile par des gaz renouvelables. Cet effort est engagé et soutenu par des industriels du gaz, même s'il comporte un certain nombre d'incertitudes. Cette ambition de "verdissement" du gaz est illustrée dans divers scénarios et études comme le scénario de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) intitulé "un mix de gaz 100% renouvelable à horizon 2050?"<sup>2</sup>.

Ce scénario peut être lu comme une évaluation des technologies disponibles pour produire du gaz renouvelable. Le besoin est couvert par trois voies:

- Méthanisation: production de méthane en dégradant de la matière organique par des micro-organismes, filière en fort développement aujourd'hui.
- Pyro-gazéification: production de méthane à partir de matières organiques, principalement du bois, par un processus thermo-chimique. Ce procédé est plutôt au stade des démonstrateurs.
- Power to gas (ou électrolyse + méthanation): production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en utilisant de l'élec-

tricité renouvelable suivie de la méthanation de l'hydrogène produit, en présence de dioxyde de carbone.

La crédibilité de cette trajectoire dépend du succès d'investissements importants en R&D. La méthanisation est en effet bien connue mais doit encore affronter un enjeu d'échelle (comment faire décoller le nombre de projets, les volumes produits, tout en réduisant le soutien financier). La maturité des autres technologies évoquées est encore assez limitée.

### Quelle quantité de gaz, ou à défaut de gaz, quelles autres énergies?

Pour tenir une telle trajectoire, le lecteur aura noté l'autre pré-requis majeur: réduire drastiquement la demande totale en énergie. C'est malheureusement un aspect négligé par la présentation superficielle du problème qui se concentre sur des oppositions emblématiques telle que "voiture électrique contre diesel" ou "solaire contre nucléaire".

Les solutions techniques existent, les freins sont souvent financiers au sens où les investissements dans les économies d'énergie, qui sont rentables, peuvent être repoussés par les consommateurs ou dépasser leur souhait d'endettement. Par exemple, l'analyse des solutions disponibles pour remplacer des chaudières anciennes montre que la consommation d'énergie peut être réduite de 10% à 70% suivant les technologies adoptées (les meilleurs scores étant obtenus par les pompes à chaleur, qu'elles soient électriques ou gaz).

Cet objectif de réduction des consommations, moins visible que la construction de champs d'éoliennes ou de fermes solaires, doit nous mobiliser plus largement. Il demande d'ailleurs de combiner des compétences variées (compréhension des techniques du bâtiment, objets connectés pour piloter la consommation, exploitation des données, interfaces utilisateur, solutions de financement) et constitue un terrain de jeu passionnant pour les ingénieurs.

Si nous n'avancions pas assez vite face à l'urgence climatique, nous risquons de devoir gérer non plus une "transition" énergétique, mais une série de "ruptures", ce qui est risqué dans un domaine stratégique comme l'énergie. En positionnant la réduction des consommations comme priorité, il nous sera plus facile d'arbitrer entre les différentes formes d'énergie et d'améliorer l'acceptabilité économique de la transition énergétique, tout en continuant à assurer le confort de nos foyers. ▲

1- www.afgaz.fr/analyses-autour-de-la-strategie-nationale-bas-carbone-0  
2- www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050



EMMANUEL MANNOORETONIL (P98), Vice-Président Nouvelles Activités et Innovation de Butagaz



## BIO

Après plusieurs années dans les métiers de supply chain management pour Butagaz et Shell, il devient économiste pour l'exploration-production de pétrole et de gaz de Shell. Revenu chez Butagaz en 2015 pour diversifier les activités de l'entreprise, il gère en particulier le lancement de l'activité de fournisseur de gaz naturel et d'électricité. Depuis 2017, il pilote les projets de nouvelles activités (croissance externe et organique), la démarche d'innovation à travers le lab "Zagatub", et l'activité de distribution de granulés de bois.

# L'ÉNERGIE SOLAIRE : UN GIGANTESQUE POTENTIEL À VALORISER



**Seuls quelques cent-millionièmes du gisement renouvelable d'énergie solaire sont consommés chaque année dans le monde. Les avantages reconnus à cette source pour la transition écologique et son coût en baisse attirent aujourd'hui les investissements et les technologies nécessaires à son déploiement massif.**

**SYLVAIN CROS** (DOCT. P04), expert en météorologie pour les énergies – sylvain.cros@mines-paris.org

Hormis la géothermie profonde et l'énergie nucléaire, l'existence des énergies que nous connaissons est le résultat de processus utilisant le rayonnement solaire comme source d'énergie. La photosynthèse est à l'origine de la biomasse et des hydrocarbures. Les masses d'air inégalement chauffées par le soleil produisent le vent et les vagues. L'évaporation des océans induit un cycle de l'eau qui fait tourner les turbines des barrages hydrauliques.

Le rayonnement solaire apporte à la Terre un total énergétique annuel de 1,5

zettawattheure<sup>1</sup>. La quantité d'énergie radiative atteignant le sol sur l'ensemble des surfaces continentales émergées est estimée à 200 millions de terawattheures par an (23 000 terawattans par an), soit 1 200 fois la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015<sup>2</sup>. Cette énergie radiative est celle qui illumine nos paysages et réchauffe notre peau les jours de beau temps : l'énergie solaire sous sa forme primaire. Comme le montre le tableau 1, ce gisement est considérablement élevé comparé à ceux des autres énergies renouvelables et des réserves actuelles d'énergie fossile. Néanmoins, en 2011 "seulement" 720 TWh, soit quelques cent-millionièmes de ce gisement, ont été consommés en tant qu'énergie finale<sup>3</sup>.

Les avantages du solaire sont pourtant multiples. Cette énergie est très peu carbonée (55 g.CO<sub>2</sub>eq./kWh<sup>4</sup> pour le photovoltaïque) et a un coût marginal très faible. L'énergie est produite sur place, sans importation de combustible, ce qui garantit une indépendance énergétique. Enfin, il n'y a ni déchets d'exploitation autres que ceux liés à la fabrication et à la maintenance des installations des parcs de production, ni risque d'accident industriel grave.

Les coûts élevés des systèmes de production solaire ont longtemps favorisé d'autres énergies. De plus, la variabilité de cette ressource implique une gestion complexe de son usage, contrairement aux énergies fossiles. Avec une baisse

récente des coûts de production et l'urgence de la crise climatique, l'énergie solaire connaît actuellement une très forte croissance.

Une valorisation efficace de cet énorme potentiel passe d'abord par une bonne connaissance de la ressource solaire et de sa variabilité en un lieu donné. Cette information permet de mieux dimensionner le parc de production et d'optimiser les techniques actuelles de conversion du rayonnement en électricité et en chaleur. Ensuite, prévoir la variabilité de cette ressource permet d'augmenter sa part, notamment dans le mix électrique, et de définir de nouveaux usages résilients de cette énergie renouvelable "variable", souvent qualifiée à tort "d'intermittente". En effet, la notion d'intermittence est définie par une variation discontinue sous la forme d'arrêts complets brutaux et de reprise de la production. Ce qui n'est pas le cas pour le solaire dont la production est continue durant la journée et s'arrête la nuit de manière prévisible.

## BIEN CONNAÎTRE LA RESSOURCE SOLAIRE EN OBSERVANT LES NUAGES DEPUIS LE SOL ET L'ESPACE

L'ingénierie solaire a besoin de caractériser le rayonnement disponible en un lieu donné : elle doit en déduire la quantité d'énergie productible et utilisable malgré sa variabilité. Le choix et l'exploitation d'un site nécessitent des données historiques sous la forme de séries temporelles du rayonnement solaire inci-



**SYLVAIN CROS**  
(DOCT. P04)  
Expert en météorologie pour les énergies



Diplômé en physique, il poursuit un doctorat à MINES Paris Tech. À l'INRA et à l'École Polytechnique, il développe des techniques de traitement d'images satellite pour faciliter le partage numérique d'observations environnementales. En 2011, il crée une start-up pour servir les activités économiques météo-sensibles. En 2013, il dirige ensuite la R&D de Reuniwatt, start-up spécialisée dans la prévision d'énergie solaire, avant de rejoindre fin 2019 le laboratoire de météorologie dynamique de l'École Polytechnique pour soutenir la mise en place de démonstrateurs smart-grid.

dent au niveau du sol. Ces séries doivent présenter idéalement plusieurs décennies et être disponibles avec un pas de temps horaire.

La mesure *in-situ* de ce rayonnement oblige à installer des pyranomètres (appareil météorologique mesurant l'intensité du rayonnement solaire) plusieurs décennies avant un projet sur tous les lieux envisagés. Cette pratique est coûteuse et peu réaliste. L'usage d'images archivées de satellites météorologiques géostationnaires – tels que Meteosat (figure 1) – a été reconnue comme la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour obtenir des cartes mondiales du gisement solaire, avec un excellent compromis en termes de qualité et de résolution spatio-temporelle (figure 2). L'usage de ces satellites pour la météorologie a permis de collecter des images qui couvrent plus de 80% de la surface terrestre depuis la fin des années 1970. Ces images permettent de

TABLEAU 1

## Estimation des réserves d'énergies disponibles en 2015

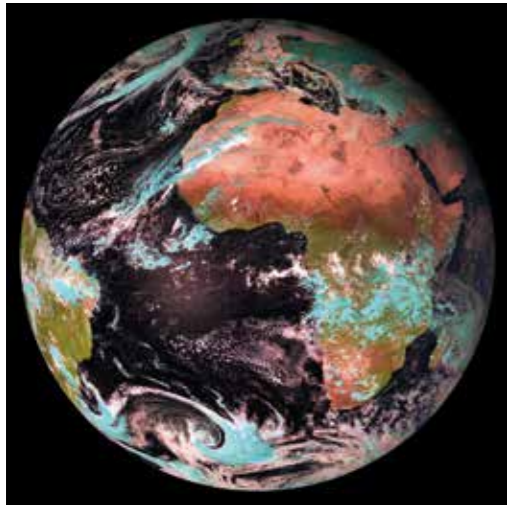
Consommation mondiale en 2015 (TWan/an)	18,5
<b>Énergies renouvelables (TWan/an)</b>	
Solaire	23000
Éolien	75-130
Marine (vagues)	0,2-2
Thermique des mers	3-11
Biomasse	2-6
Hydraulique	3-4
Géothermie	0,2-3
Marémotrice	0,3
<b>Énergies à ressource finie (TWan)</b>	
Gaz naturel	220
Pétrole	335
Uranium	185
Charbon	830

Source : PEREZ, R. et PEREZ, M. A fundamental look at supply side energy reserves for the planet. Int. Energy Agency SHC Program. Sol. Updat, 2015, vol. 62, p. 4-6.

déterminer l'enneigement de la surface terrestre sur des pixels de quelques kilomètres, et ce toutes les demi-heures et jusqu'à toutes les dix minutes pour les satellites les plus récents. Le Centre Observation, Impacts, Énergie (OIE) de MINES ParisTech possède une expertise mondialement reconnue sur ce sujet. Il est le principal contributeur du service CAMS Radiation<sup>5</sup> qui délivre en ligne des séries temporelles du gisement sur l'Europe et l'Afrique. Ce service a été conçu dans le cadre de Copernicus, programme européen d'observation de la Terre initié et financé par l'Union Européenne<sup>6</sup>. L'incertitude de cette information – de l'ordre de 10 à 15% pour la somme carrée de l'énergie reçue sur un mètre carré au sol et environ 5% pour la somme annuelle – peut être réduite par des mesures *in-situ* restreintes aux derniers mois écoulés et par une expertise de traitement de données météorologiques.

Lors de l'exploitation, la prévision à très court terme de ce rayonnement (de quelques minutes à plusieurs jours) permet d'optimiser l'usage de l'énergie solaire. La modélisation météorologique classique est très limitée pour fournir des prévisions suffisamment précises à une échelle de temps inférieure à quelques heures. En effet, la variabilité de l'énergie solaire dépend de la trajectoire déterministe et connue du soleil dans le ciel, mais aussi de la transparence de l'atmosphère, fortement modulée par le comportement stochastique de la couverture nuageuse. Ainsi, l'extrapolation d'observations directes des mouvements nuageux est préférable. La figure 3 présente une vision hémisphérique du ciel par caméra depuis le sol. L'analyse des mouvements de la couverture nuageuse permet de déterminer l'évolution du rayonnement toutes les minutes dans la prochaine demi-heure<sup>7</sup>. Cette méthode est aussi appliquée sur ►►

**FIGURE 1**  
Image du satellite météorologique géostationnaire Meteosat. La réflectance des nuages est très marquée sur ce type d'image. Il est alors possible d'estimer pour chacun des pixels l'atténuation du rayonnement solaire qui arrive à la surface terrestre et de calculer ainsi la puissance solaire atteignant le sol.  
Source : EUMETSAT



des images de satellites géostationnaires afin de prévoir le rayonnement sur de plus grandes échelles spatiales à l'horizon de 4 à 6 heures<sup>8</sup>. Au-delà de 6 heures, et à l'échelle des "prochains jours", de nouvelles approches de la modélisation météorologique classique sont à l'étude pour améliorer ces prévisions, notamment en apportant au modèle des informations plus précises sur les propriétés physiques des nuages<sup>9</sup>.

**PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ, DE LA CHALEUR OU ÉCONOMISER DU CHAUFFAGE**

Entre 2016 et 2022, le parc photovoltaïque (PV) mondial aura plus que doublé, passant d'une capacité de 303 à 740 GW. Cette technique qui consiste à convertir du rayonnement en électricité connaît une forte croissance: elle produit une forme d'énergie finale largement utilisée, et la construction de panneaux PV est un processus industriel maîtrisé qui permet la mise en place de grandes centrales solaires pour faire ainsi des économies d'échelle. Cette technologie est très modulaire et peut-être aussi déployée à très petite échelle.

En 2017, 40% du parc concerne la production distribuée (toitures résidentielles ou commerciales, petits réseaux électriques indépendants), le reste est sous la forme de grandes centrales. La production de l'électricité PV est instantanée et, en zone tropicale, un passage nuageux peut réduire de moitié la production d'une centrale en quelques secondes. Or celle-ci doit être consommée au même instant que sa production. Son transport, et plus encore son stockage, est difficile et coûteux et doit être limité au maximum. Pour ces raisons, la prévision du rayonnement solaire est cruciale car elle permet de piloter son intégration dans le réseau électrique en la déconnectant en cas de surproduction et en mobilisant des réserves en cas de sous-production. Une autre manière de produire de l'électricité solaire est le solaire thermique à concentration, parfois appelé solaire thermodynamique. Des miroirs paraboliques concentrent le rayonnement sur un tube de fluide caloporteur (sels fondus) porté à très haute température (environ 300°C) qui va pouvoir produire de la vapeur d'eau et faire tourner des alternateurs. Ce type de système existe

aussi sous la forme d'une haute tour qui collecte le rayonnement réfléchi par des miroirs placés au sol sur des héliostats (Figure 4).

Par rapport au PV, ce système bénéficie d'un stockage intrinsèque par une inertie thermique permettant de produire de l'électricité en différé par rapport au rayonnement solaire et avec une variabilité beaucoup plus faible. En 2016, la capacité mondiale installée était de 4,8 GW et devrait atteindre 10 GW en 2022. La technologie est plus coûteuse et demande un ensoleillement intense disponible sur de longues périodes. Son déploiement est donc favorisé dans les zones arides peu nuageuses (Californie, Espagne, Maroc...). La prévision de présence nuageuse est cruciale car celle-ci arrête complètement la production de chaleur. De plus, ce système nécessite une prévision des passages de poussières et tempêtes de sables fréquents en milieu désertique.

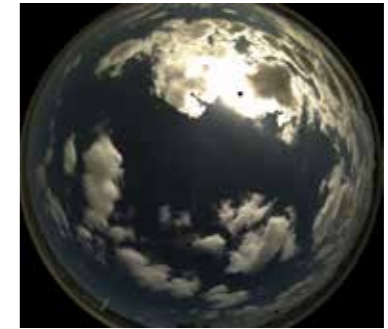
Le solaire thermique proprement dit produit de la chaleur à partir de panneaux sombres qui chauffent comme un corps noir. Cette chaleur produite est destinée à l'eau chaude sanitaire, au chauffage ainsi qu'à divers processus industriels. En 2011, il représentait 70% de l'énergie solaire consommée. La capacité installée en 2017 est estimée à 472 GW thermiques. Le nombre de nouvelles installations a décliné de 9% par an depuis les 4 dernières années, principalement à cause de la contraction du marché chinois qui a été un des premiers à connaître une forte demande dès 2006. Entre 2017 et 2022, la consommation d'énergie thermique augmentera toutefois de 30% notamment grâce au secteur de la construction exigeant des logements à basse consommation. Le solaire thermique est une technologie relativement simple, durable et donc peu coûteuse. Toutefois, un ciel durablement couvert ne produit quasiment pas de chaleur. La connaissance du gisement solaire y est importante pour bien dimensionner les systèmes. Néanmoins, leur inertie thermique leur permet de pallier partiellement les inconvénients d'une forte variabilité du rayonnement<sup>10</sup>.

Une dernière technologie à présenter est le solaire passif. Il se concrétise par

des économies d'énergie dans le bâtiment grâce au chauffage et à l'éclairage optimisés dans une architecture bioclimatique. Il est difficile d'estimer la quantité d'énergie solaire "produite" par l'habitat passif. La seule définition d'un logement passif est une consommation maximale d'énergie fixée à 15 kWh/m<sup>2</sup>/an. Sachant que la meilleure classe énergétique des logements (classe A) définie par la RT2012 impose une consommation de moins de 50 kWh/m<sup>2</sup>/an<sup>11</sup>, l'usage d'habitats passifs est une technique de valorisation significative de l'énergie solaire.

**MIEUX GÉRER LA VARIABILITÉ NATURELLE DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE POUR EN CONSOMMER PLUS**

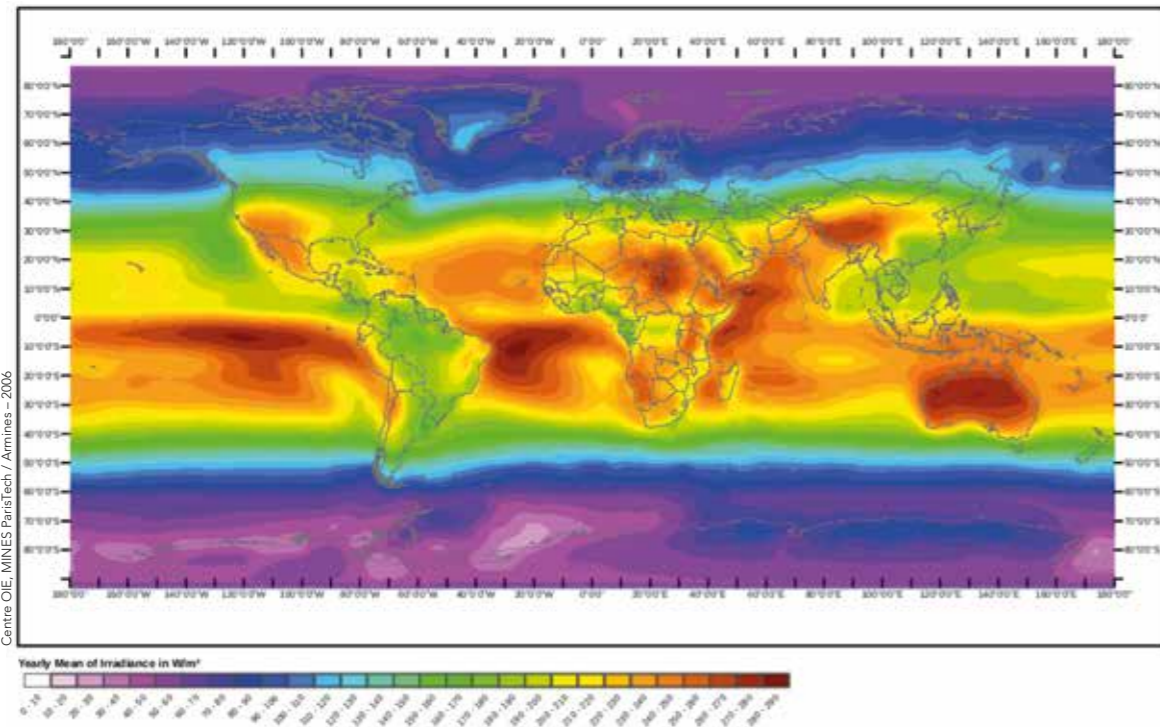
L'électricité photovoltaïque est une énergie "variable" mais aussi "fatale". Cela signifie que la part produite qui n'est pas injectée dans le réseau ou stockée est définitivement perdue. A contrario, si l'énergie n'est pas obtenue en quantité suffisante, la mobilisation d'une réserve a un coût pour l'opérateur de réseau. Ce dernier préférera alors réduire la part d'électricité solaire injectée dans le réseau afin de limiter le recours aux réserves. Mieux exploiter le gisement solaire consiste donc à anticiper ces défauts ou excès de production. La gestion de la variabilité se réalise en amont de la construction d'installations. À partir d'une série temporelle du gisement solaire, des statistiques sont produites afin de déduire la fréquence des risques instantanés de sur- ou sous-production par rapport à la demande modé-



**FIGURE 3**  
Vision hémisphérique du ciel par caméra depuis le sol. L'analyse continue des mouvements nuageux permet d'anticiper les instants où les nuages vont occulter le soleil.  
Source : DLR

lisée du futur réseau. Ces mêmes statistiques sont utilisées par les investisseurs pour estimer les intervalles de confiance de rentabilité d'une centrale à l'échelle de plusieurs années. Une fois le parc opérationnel, le producteur vend une partie de son électricité sur les marchés tout en bénéficiant d'un complément de rémunération. Ce complément est un soutien financier de l'Etat destiné à soutenir le développement des énergies renouvelables. Cette prime variable compense l'écart entre les revenus de cette vente et une rémunération de référence qui permet aux producteurs de couvrir les coûts de leur installation tout en assurant une rentabilité normale de leur projet. En France, ce dispositif est géré par la commission de régulation de l'énergie<sup>12</sup>. Comme la prévisibilité de cette énergie est limitée, elle a plus intérêt à être vendue peu de temps avant sa livraison; ce qui permet en France le marché boursier "au comptant" EPEX SPOT. Les producteurs, ou plutôt leurs négociants, ainsi que les acheteurs (des distributeurs d'électricité aux usagers), doivent annoncer la

**FIGURE 2**  
Moyenne annuel du rayonnement gisement solaire moyen entre 1990 et 2004, issue de traitement d'images satellites.



Centre OIE, MINES ParisTech / Armines - 2006



**FIGURE 4**  
Centrale solaire à concentration Noor III située à Ouarzazate au Maroc.

## PETIT RAPPEL SUR WH, TWAN ET AUTRES...

- 1 zettawattheure =  $10^{21}$  wattheures.
- 1 Tera Watt an (térawattan) = 1 million de kWan. 1 TWan est une unité de mesure d'énergie correspondant à l'énergie délivrée (ou consommée) par un dispositif d'une puissance de 1 tera watt ( $10^{12}$  W) pendant une durée d'un an.
- Un wattheure (symbole : Wh) correspond à l'énergie consommée par un appareil d'une puissance d'un watt (1W) qui a fonctionné pendant une heure.

► quantité et le prix de l'électricité qu'ils souhaitent négocier un jour à l'avance pour le marché *Day-Ahead*, et jusque 30 minutes avant la livraison pour le marché *Intraday*. L'électricité manquante (pour le producteur ou l'acheteur) à moins de 30 minutes de la livraison est compensée par le gestionnaire de réseau de transport d'électricité (GRT) moyennant une pénalité plus coûteuse qu'une transaction de marché. Les écarts entre la production annoncée et effectivement livrée sont donc convertibles en pertes ou en gains et dépendent directement de la qualité de la prévision. Le GRT a pour rôle de transporter cette énergie à haute tension vers les postes dits de "distribution" à partir desquels l'électricité est acheminée à basse tension chez les usagers par le gestionnaire de réseau et de distribution (GRD). En France métropolitaine, RTE (réseau de transport d'électricité) et ENEDIS jouent respectivement ces rôles. Ces acteurs sont responsables du maintien de l'équilibre entre production et consommation. Ils ont le pouvoir de réduire l'injection d'électricité en cas de surproduction imprévue et d'utiliser des réserves en cas de manque soudain par rapport à la demande. Le dimensionnement de ces réserves tient compte des erreurs de prévision de la demande et de la probabilité d'incidents d'approvisionnement (coupures de réseaux, arrêt accidentel de centrales thermiques et nucléaires...). L'utilisation d'énergie variable induit donc une incertitude supplémentaire dans ce dimensionnement que la prévision météorologique doit réduire. La croissance du parc PV et la répartition des centrales dans des zones où les conditions de l'ensoleillement sont fai-

blement corrélées entre elles permettent aussi d'atténuer cette variabilité de production et donc cette incertitude. Sur de plus petites échelles, l'utilisation croissante des technologies de l'information dans ce qu'on appelle un réseau intelligent (*smart grid*) permet de rationaliser l'équilibre production/consommation en réagissant en temps réel à toutes les contraintes d'un réseau. L'ajustement direct des besoins en production et une meilleure utilisation du stockage permettent alors d'insérer et de mieux valoriser des productions locales d'énergie à forte variabilité tout en évitant de reconsidérer l'efficacité d'un réseau historique de transport d'électricité à échelle nationale. L'avènement des *smart grids* induit un besoin supplémentaire de prévision de production solaire à échelle spatiale et temporelle réduite (quelques kilomètres, quelques minutes) pouvant être fournie à très court-terme (quelques dizaines de minutes). Enfin, les réseaux électriques autonomes dits *offgrid* ou *microgrid* destinés à l'électrification de sites isolés (zones rurales, sites miniers ...) peuvent être alimentés avec des groupes électrogènes à carburant complétés par des panneaux PV. Ces systèmes utilisent la prévision d'énergie dans les prochaines minutes afin de démarrer le groupe électrogène uniquement avant un passage nuageux. D'autres études menées actuellement par exemple dans le cadre du projet "Grid power Sustainability" (soutenu par l'Union Européenne et la région Île-de-France) mettent en place un démonstrateur d'un système reliant des parkings de voitures électriques en auto-partage et des résidences alimentées partiellement en autoconsommation PV. En fonction de la prévision, le système de gestion peut décider de charger ou décharger les batteries de certaines voitures réservées qui ne seront pas utilisées dans l'immédiat, afin d'optimiser l'usage de l'électricité.

### L'UTILISATION MASSIVE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EST ENCORE DEVANT NOUS

Les choix énergétiques actuels et l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire augmentent considérablement la consommation finale de

l'énergie solaire. La croissance du parc énergétique solaire fournit encore plus de données de mesures du rayonnement solaire et de production d'énergie. Ces dernières alimentent un ensemble massif de données qui permet d'affiner la connaissance et la prévision de la ressource solaire grâce à des techniques d'apprentissage profond. La mobilisation récente des ingénieurs et des chercheurs sur ce sujet va sans doute accélérer cette croissance en levant des verrous techniques qui faciliteront encore plus son intégration. Ainsi, le coût de l'énergie solaire pourra encore baisser et faire reporter les investissements actuels dans les énergies fossiles vers elle<sup>13</sup>. Cette bascule financière, créatrice de valeur et d'emploi, pourrait être le soutien nécessaire à l'accélération de cette transition énergétique en exploitant une énergie dont le gisement naturel est encore largement sous-exploité. ▲

1. VAUGE, Perrin de Brichambaut. Le gisement solaire-Evaluation de la ressource énergétique. Ciel et Terre, 1983, vol. 99, p. 62
2. PEREZ, R. et PEREZ, M. A fundamental look at supply side energy reserves for the planet. *Int. Energy Agency SHC Program. Sol. Updat*, 2015, vol. 62, p. 4-6.
3. Renewables 2013 global status report – REN 21 – données 2011
4. www.bilans-ges.ademe.fr
5. www.soda-pro.com/fr/web-services/radiation/cams-radiation-service
6. www.copernicus.eu/fr
7. BERTIN, Clément, CROS, Sylvain, SCHMUTZ, Nicolas, et al. *Detection unit and method for identifying and monitoring clouds in an observed area of the sky*. U.S. Patent Application No 15/513,617, 19 oct. 2017.
8. CROS, S., SÉBASTIEN, N., LIANDRAT, O., et al. Cloud pattern prediction from geostationary meteorological satellite images for solar energy forecasting. In: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX; and Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVII*. International Society for Optics and Photonics, 2014, p. 924202.
9. Kurzrock, F., Nguyen, H., Sauer, J., Chane Ming, F., Cros, S., Smith Jr, W. L., ... & Linguet, L. (2019). Evaluation of WRF-DART (ARW v3, 91. 1 and DART Manhattan release) multiphase cloud water path assimilation for short-term solar irradiance forecasting in a tropical environment. *Geoscientific Model Development*, 12(9), 3939-3954.
10. L'ensemble des capacités installées explicitées avant cette note sont issues de Growth, A. REN21 Renewables 2018 Global Status Report.
11. www.cohesion-territoires.gouv.fr/12012
12. www.cre.fr (http://bit.ly/356FtzE)
13. Rifkin, J. "Le New Deal vert mondial.", 2019 - Les Liens qui libèrent, 304 p.

# LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ EN AFRIQUE

**Le continent africain concentre près de la moitié de la population mondiale sans accès à l'électricité (plus de 640 millions sur 1,3 milliard d'Africains). Le développement des infrastructures énergétiques se trouve au cœur des problématiques de développement du continent, en particulier en Afrique subsaharienne, avec de multiples défis à relever.**

STÉPHANE WOERTHER (E98), Managing Partner de Philae Advisory  
stephane.woerther@mines-saint-etienne.org

Avec une démographie dynamique, une main d'œuvre bon marché et l'accès à de nombreuses ressources naturelles (dont énergétiques), le continent africain dispose de nombreux atouts pour développer son économie et son industrie, qui restent jusqu'à présent fortement bridées par un approvisionnement déficitaire en électricité fiable et bon marché. Comment répondre concrètement et urgemment à des besoins immenses en infrastructures énergétiques, alors que le secteur de l'énergie connaît de profondes mutations, accélérées par les contraintes liées aux dérèglements climatiques, en particulier celles portant sur l'accès aux financements des projets carbonés ?

### ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ ET PRODUCTION: UN ÉTAT DES LIEUX

En 2016, seule 42,8 % de la population en Afrique a accès à l'électricité. Ce chiffre masque une disparité importante entre l'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud d'un côté et les Pays d'Afrique subsaharienne de l'autre où le taux d'accès à l'électricité n'est en moyenne que de 32 % (voir Figure 1). Contrairement aux tendances constatées sur les autres continents, l'Afrique subsaharienne est la seule région où le taux d'accès à l'électricité est en diminution : en effet, la croissance démographique (270 millions d'habitants en plus en 2015 par rapport à l'an 2000) est supérieure au rythme auquel les populations accèdent à l'électricité (200 millions d'accès supplémentaires sur la même période). ►►



**STÉPHANE WOERTHER (E98)**  
Managing Partner de Philae Advisory



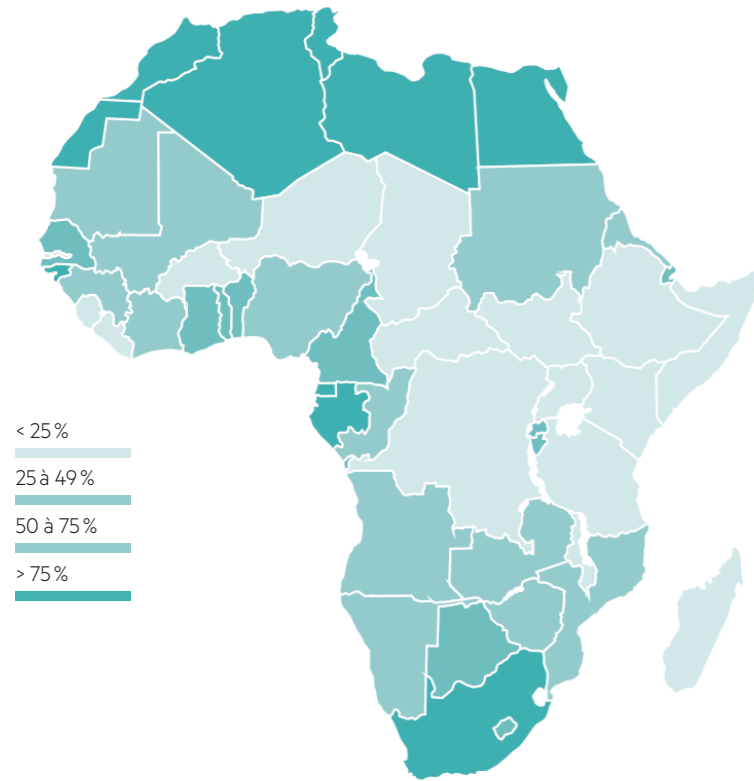
BIO

Dirigeant de la société de conseil financier Philae Advisory, il conseille les gouvernements et les investisseurs privés dans le secteur de l'énergie et sur les marchés africains. Il opère dans le secteur de l'énergie en Afrique depuis 18 ans, en ayant endossé plusieurs casquettes : ingénieur conseil, financement de projet, investisseur et conseil financier.



**FIGURE 1**  
**Taux d'accès à l'électricité en Afrique subsaharienne en 2015**

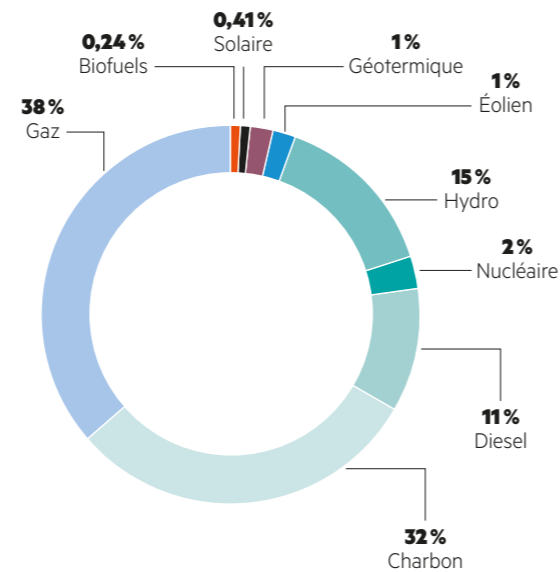
Sources: Agence Internationale de l'Énergie, Banque Africaine de Développement



L'hydroélectricité offre actuellement une solution très compétitive pour la production d'électricité à grande échelle, car cette technologie est mûre et elle permet de répondre à la demande d'électricité "en base" en offrant une alternative bien moins impactante en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> que les centrales charbon par exemple. Toutefois, malgré ce fort potentiel et des coûts de production relativement bas (de l'ordre de 7cUSD/kWh en moyenne), peu de projets hydroélectriques lancés ces quinze dernières années sont arrivés au stade de l'exploitation. Ceci est particulièrement vrai pour les projets privés et de taille significative, car ils sont confrontés à une matrice de risques complexe (construction, hydrologie, impacts environnements et sociaux, etc.) entravant le développement et le financement des projets. Une exception notable est l'Éthiopie qui s'est distinguée en développant des projets hydroélectriques de grande ampleur, comme par exemple le barrage Grande Renaissance d'une puissance de 6,5 GW.

**FIGURE 2**  
**Proportion des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité en Afrique, 2016**

Source: IEA, 2016 / AEEP, 2016



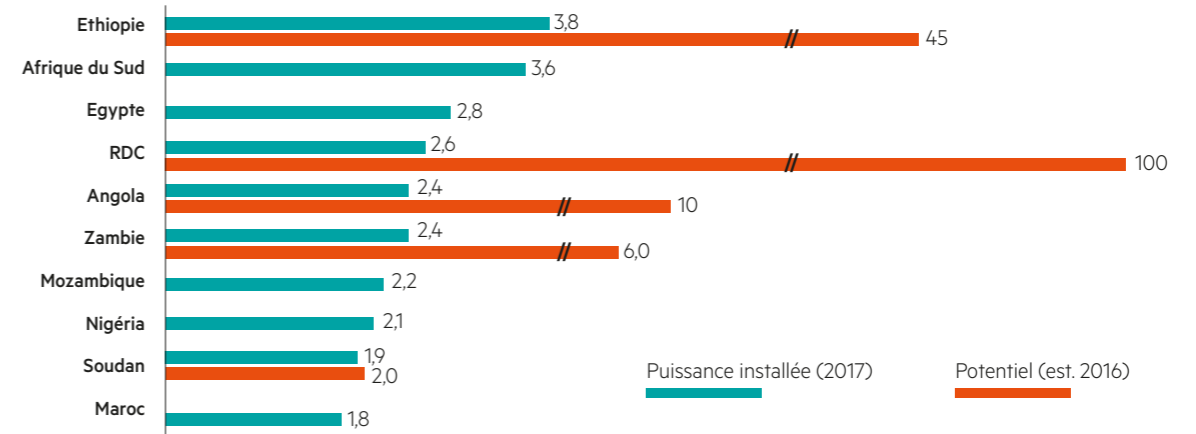
►► La puissance électrique totale installée sur le continent était de 168 GW en 2017, avec seulement 46 GW installés en Afrique subsaharienne, ce qui correspondait à la capacité installée de l'Espagne. La faiblesse de ce chiffre est encore plus criante si l'on tient uniquement compte de la part opérationnelle de cette production.

Alors que la grande majorité de la production d'électricité provient toujours du charbon et du gaz (voir figure 2), on assiste, depuis le milieu des années 2000, à la modification du mix énergétique avec le développement de nouvelles sources d'énergie renouvelables (solaire et éolien principalement) au potentiel encore sous-exploité en Afrique.

**Centrales hydroélectriques:** l'Afrique dispose d'abondantes ressources hydrauliques et on estime que 92% du potentiel techniquement exploitable n'a pas encore été développé (IRENA et IEA-ETSAP, 2015b): voir figure 3.

**FIGURE 3**  
**Puissance hydroélectrique installée et potentiel - GW**

Source: IHA HydroPower Status Report 2018, World Energy Council, Irena



**Centrales solaires:** avec plus de 80% de la surface bénéficiant de plus de 2 000 kWh par mètre carré et par an d'irradiation solaire, le potentiel du solaire en Afrique est estimé à 10 TW avec une prévision, d'ici 2030, d'une puissance installée totale utilisant la technologie photovoltaïque, comprise entre 15 GW et 62 GW (Source: APP, 2015).

En partant pratiquement de zéro, la production d'électricité d'origine solaire a crû très fortement depuis le début des années 2010, mais de manière inégale sur le continent: la capacité cumulée atteignait déjà 6 GW en 2018 (principalement PV) à comparer à uniquement 100 MW installés en 2009. Au-delà du fort ensoleillement, cette croissance importante s'explique aussi par la forte chute des coûts des panneaux photovoltaïques et la modularité d'installation. Des efforts sont à présent menés pour absorber l'intermittence de la production solaire, notamment via l'introduction d'infrastructures de stockage électrique dans le réseau.

De nouveaux acteurs privés proposent des kits solaires à des populations non connectées aux réseaux dans les zones rurales (Off-Grid). Ces sociétés comme Bboxx, Mobisol (en cours d'acquisition par Engie) ou M-Kopa, ne se définissent plus uniquement comme producteurs d'électricité mais plus généralement comme fournisseurs de services et de biens associés (téléviseur, frigo, ventilateurs, etc.). À plus grande échelle, des projets de réseaux indépendants voient le jour dans les zones non connectées,

de quelques kW autour d'un kiosque solaire jusqu'à plusieurs MW pour alimenter des zones urbaines.

**Centrales éoliennes:** la capacité installée en 2018 atteignait 6 GW et se concentre principalement sur trois pays: l'Afrique du Sud (2 GW), le Maroc (1,2 GW) et l'Égypte (1,1 GW), l'Éthiopie disposant également de ressources éoliennes importantes.

**Centrales géothermiques:** l'énergie géothermique est une ressource importante en Afrique de l'Est et en Afrique Australe, avec un potentiel de 15GW, dont l'essentiel se situe autour de la vallée du Rift.

**DES INVESTISSEMENTS NÉCESSAIRES CONSIDÉRABLES**

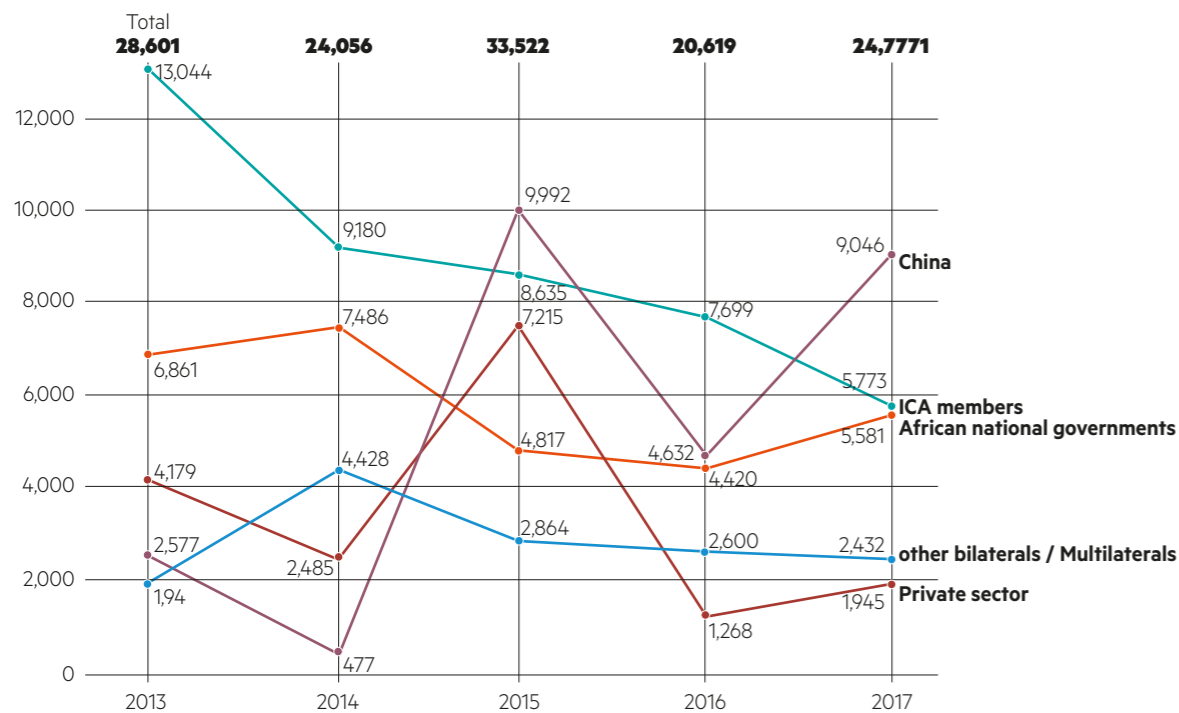
En tenant compte du déficit actuel et des prévisions de croissance démographique et économique, on estime à 490 milliards de dollars le montant des investissements nécessaires pour résorber ce déficit de production d'ici 2040. 300 milliards supplémentaires seraient nécessaires pour le réseau de transmission et de distribution<sup>1</sup>. Les compagnies nationales d'électricité centralisées bénéficient encore souvent d'un monopole ou un quasi-monopole sur la production, le transport et la distribution d'électricité. Cependant, ces entreprises sont pour la plupart dans une situation financière et opérationnelle délicate. En particulier, les prix de vente pratiqués étant ►►

►► artificiellement bas, essentiellement dûs aux contraintes politiques et réglementaires ne permettant pas au tarif appliqué de refléter la réalité du coût de l'électricité, ces entreprises ont vu leur situation financière se dégrader au cours du temps. Elles ne sont alors pas en mesure de fournir une électricité de qualité car elles n'ont pas les moyens d'entretenir correctement leurs infrastructures et d'investir dans de nouvelles capacités de production et de transport, entraînant de fréquentes pannes et coupures de courant. Une autre conséquence de cette précarité financière est l'incapacité de ces sociétés à étendre le réseau de distribution, notamment dans les zones rurales. Une tendance de fond de remise en cause de ces monopoles émerge à partir du milieu des années 2000. De nombreux pays ont ainsi engagé des réformes structurelles du secteur, notamment en ce qui concerne sa régulation. L'objectif est d'ouvrir le secteur aux investisseurs

privés en permettant, par exemple, la production d'électricité par des producteurs d'électricité indépendants (Independent Power Producers ou IPPs). Cependant, peu importe la forme de privatisation/libéralisation du secteur qui est adoptée, en Afrique comme ailleurs se pose essentiellement la question des conditions dans lesquelles de nouvelles infrastructures peuvent être mises en concession auprès du secteur privé (sous différentes formes) en préservant l'intérêt commun, sachant que les capacités de régulation et les conditions d'octroi de marchés publics présentent encore des lacunes dans de nombreux Etats africains.

**FIGURE 4**  
**Financement du secteur de l'électricité en Afrique par source (2013-2017) en millions de \$**

Source: ICA, Infrastructure Investment Trends 2017 (Membres ICA: G8, Banque Mondiale, Banque Africaine de Développement)



**ÉTAT DES FINANCEMENTS DES PROJETS D'ÉLECTRICITÉ**

En moyenne, 26 milliards de dollars de financement ont été apportés annuellement entre 2013 et 2017 au secteur de l'électricité en Afrique (figure 4). Depuis 2013, la Chine est devenue une des principales sources de financement du secteur, avec plus de 9 milliards de dollars investis en 2017, souvent par à-coups pour financer de grands projets hydroélectriques ou de centrales à charbon. Les Institutions Financières de Développement (IFDs) ont également financé en moyenne 11,5 milliards par an de projets sur la même période. Cependant, tout cela reste bien en deçà des besoins permettant une fourniture d'énergie au plus grand nombre et dans des conditions satisfaisantes.

Une tendance de fond est également une réorientation progressive des financements vers des projets climato-compatibles, favorisée par l'émergence d'un nombre croissant d'instruments financiers dédiés à "l'atténuation et l'adaptation" des pays aux dérèglements climatiques, dont le continent africain est une des principales victimes? (avec une contribution à ces dérèglements pourtant extrêmement marginale...). On peut citer plusieurs structures *ad hoc* comme le Fonds Vert du Climat (en cours de recapitalisation) ElectriFi ou REPP/Camco, soutenus par les IFDs, d'autres organisations multilatérales (ex: ONU) et parfois des fondations privées (ex: la Fondation Rockefeller).

La capacité des IFDs à proposer des outils de financement et de garantie adéquats pour financer les projets d'infrastructure énergétique (prêts à taux modérés sur des maturités longues, assurances sur des risques spécifiques notamment politiques, co-investissement notamment en période de développement, outils de rehaussement de crédits, etc.) fait que les IFDs restent des acteurs incontournables du financement des projets d'infrastructure et d'électricité en Afrique.

En particulier, des produits de garanties sont proposés par les IFDs pour couvrir les développeurs et éventuellement les prêteurs sur les risques associés au projet. C'est notamment le cas lorsque la situation financière de la société publique d'électricité, qui constitue une des principales contreparties d'un projet d'électricité, est fragile. Cependant, ces outils, s'ils ont le mérite d'exister, sont encore longs et complexes à mettre en place.

En parallèle, un nombre croissant de fonds de capital-investissement dédiés à l'investissement dans le secteur des infrastructures, dont l'électricité, en Afrique se sont développés ces dernières années, cherchant à profiter d'opportunités d'investissements pouvant offrir une rentabilité attrayante, certains étant soutenus par les IFDs

(ex: Actis, AP Moller, Denham Capital, AIIIM, STOA, Africa 50, etc.).

Ainsi, les sources de financement ne manquent pas pour permettre de développer de nouveaux projets, notamment ceux développés par le secteur privé.

**UN MANQUE DE PROJETS DITS "BANCABLES"**

Bien que de nombreux Etats doivent actuellement faire face à des contraintes budgétaires importantes et que les sociétés nationales d'électricité soient souvent exsangues, les investissements dans le secteur de l'électricité reposent encore principalement sur le secteur public, contraint par le manque de financement public disponible. En effet, le relais attendu du secteur privé pour porter de nouveaux projets reste encore trop faible. L'afflux de capitaux privés et de nouveaux acteurs se heurte à la longueur, à la complexité et finalement au faible taux de transformation entre le développement de nouveaux projets et leurs mises en service effectives. Plusieurs facteurs peuvent être avancés pour expliquer ces difficultés.

**Des cadres juridiques encore incertains:** en dépit des réformes, les cadres juridiques et de régulation de nombreux pays africains souffrent de plusieurs insuffisances quant aux droits et obligations des différentes parties prenantes – producteurs indépendants, Etat, sociétés nationales d'électricité. Le mouvement de libéralisation des marchés de l'électricité observé dans de nombreux pays africains se traduit en effet souvent par une modification par à-coups du corpus juridique et de la politique énergétique, ne s'avérant pas nécessairement efficace. Un exemple typique est le Nigeria où, en dépit de très nombreuses réformes (nouvelles lois, nouvelles régulations, unbundling (séparation des activités de production, transport et de distribution d'électricité), privatisation, recapitalisation, etc.), le pays n'a pas réussi à changer la situation calamiteuse du secteur de l'électricité.

**Des coûts de développement et de transaction élevés:** ce qui caractérise trop souvent le développement des projets d'électricité par le secteur privé est le temps extrêmement long pour arriver au bouclage commercial et financier. Le développeur est en effet souvent mis à rude épreuve dans les méandres administratifs, logistiques et parfois politiques, permettant d'arriver au Graal d'un projet prêt à construire. En cours de route, de nombreux projets sont abandonnés et ceux qui y arrivent sont en général des développeurs aguerris et/ou accompagnés de solides conseils à leurs côtés.

**42,8%**  
seulement de la population en Afrique a accès à l'électricité (avec de fortes disparités).

Illustration d'un projet réussi : le projet hydroélectrique Nachtigal au Cameroun, d'un coût total de 1,2 Md€ et développé par EDF avec le soutien de la SFI.



DFE

►► **Une allocation déséquilibrée des risques :** la capacité des projets d'électricité privés à être financés (leur "bancabilité"), qui découle d'une allocation équilibrée des risques entre les parties au projet (promoteurs du projet, acheteur (ou "offtaker") de l'électricité, l'État, financeurs, etc.), pêche bien souvent par une structuration inadéquate.

**Une inadéquation du financement :** en ce qui concerne le financement de ces projets, les banques locales n'ayant pas les bilans adéquats qui permettent de financer et/ou refinancer ces projets sur le long terme, et les banques commerciales internationales étant souvent réticentes sur les risques inhérents à ces projets, ils restent encore majoritairement financés par les IFDs. La présence de crédits importants disponibles par le biais des IFDs ne rend pas le financement de ces projets faciles pour autant. Les processus de comités de crédit de ces institutions peuvent s'avérer lourds et longs. Les standards de ces institutions sont également exigeants (transparence, engagements de l'État, aspects environnementaux et sociaux, etc.) et, parfois, le manque de préparation et de réactivité des parties publiques impliquées, peuvent alourdir encore le processus de développement conduisant au bouclage financier du projet.

**L'intention louable de fluidifier le marché au travers d'appels d'offres et d'enchères :** avec notamment le développement massif du solaire ces dernières années – qui, du fait d'un profil de risques spécifique, permet une certaine standardisation et "réplicabilité" des structures commerciales, juridiques et financières –, des appels d'offres conduits par les pouvoirs publics sont régulièrement lancés auprès du secteur privé pour la mise en concession (sous différentes formes) de nouveaux projets d'électricité. Avec la volonté de créer davantage d'opportunités "bancables" d'investissements, regroupés dans un seul appel d'offres. Cependant, certains appels d'offres ont pu pêcher par leur manque de préparation et de structuration adéquate impactant négativement leur crédibilité (longueur du processus, manque de communication auprès des candidats, opacité dans la sélection du candidat retenu, etc.). Néanmoins, lorsqu'ils sont suffisamment bien structurés, ces appels d'offres et enchères constituent sans doute la manière la plus efficace de créer de la liquidité dans le marché, en baissant significativement les barrières à l'entrée et en offrant des opportunités d'investissements "bancables" au secteur privé, à l'échelle et au rythme requis pour le continent africain.

**COMMENT FAVORISER L'ÉMERGENCE DE NOUVEAUX PROJETS ?**

Des programmes structurés apparaissent pour tenter de surmonter ces obstacles. Des pays comme le Maroc ou l'Afrique du Sud ont réussi à organiser ces dernières années des appels d'offres et enchères sur des projets renouvelables, qui ont suscité un vif intérêt du marché et conduit à des investissements massifs dans ces projets par le secteur privé.

En Afrique subsaharienne, des programmes, comme Scaling Solar et GetFIT, sont apparus pour créer des conditions de marché plus optimales pour lancer des appels d'offres et enchères dans le marché des IPPs. Ces programmes concernent généralement des projets d'énergies renouvelables et ont été structurés et financés par des IFD (comme par exemple la Banque Mondiale, via son guichet privé, la Société Financière Internationale – SFI, ou la KfW, pour les programmes Scaling Solar et GetFIT, respectivement), avec le souci d'établir un cadre standard répliquable sur plusieurs projets (et pays).

On voit également émerger de nouveaux programmes de mise en appel d'offres sur des segments plus complexes que les projets renouvelables de type IPPs solaires, notamment dans l'hydroélectricité ou pour des projets couplant production et distribution (ex : mini-réseaux). On peut ainsi citer le programme Essor, financé par la coopération britannique (DFID) et structuré par les cabinets Philae Advisory et Linklaters pour le compte de la RDC, qui consiste à mettre en appel d'offres des projets pré-structurés de concessions de production et de distribution d'électricité de villes à travers le pays, l'objectif d'une interconnexion de tout le pays avec un système de production centralisé ayant laissé la place à celui d'un système plus décentralisé avec des réseaux indépendants.

**Produits de financement et garanties adéquats :** un effort particulier est mené par les IFDs pour développer des produits innovants répondant aux problèmes spécifiques des projets, afin d'assurer leur "bancabilité" et de mobiliser des sources de financement n'ayant pour le moment pas la capacité d'intervenir sur ces projets (ex : financement long terme par les institutions financières locales en devise locale).

L'émergence des projets "Off-Grid" requiert également des modes de financement alternatifs, davantage proches de ceux associés au leasing ou à la titrisation de créances, auprès d'un portefeuille clients, sur lesquels les banques commerciales sont de plus en plus actives. Par ailleurs, comme mentionné plus haut, des instruments de garantie (ou de rehaussement de crédits) innovants

voient le jour sous l'initiative des IFDs, permettant de répondre à des risques ou points de blocage entravant la bancabilité des projets. C'est le cas par exemple avec la Regional Liquidity Support Facility, un instrument développé par l'agence de développement allemande KfW et l'Agence pour le Commerce en Afrique (ATI), qui consiste à sécuriser les paiements d'électricité à un producteur privé indépendant pendant plusieurs mois, en cas de défaut de l'acheteur public d'électricité.

**Illustration d'un projet réussi :** le projet hydroélectrique Nachtigal au Cameroun, d'un coût total de 1,2 Md€ et développé par EDF avec le soutien de la SFI, a pu être financé dans un temps raisonnable, avec notamment la mise en place d'une structure financière et de garantie innovante.

Un financement en devise locale a notamment pu être mobilisé via un mécanisme de garantie étatique sécurisant son refinancement tous les 7 ans, elle-même contre-garantie par la Banque Mondiale (via son guichet public BIRD). La Banque Mondiale a également octroyé des garanties, via la MIGA, couvrant une partie de l'investissement des actionnaires du projet sur les risques politiques.

**CONCLUSION**

Le secteur de l'électricité en Afrique connaît des mutations profondes, qui peuvent être une chance pour enfin répondre aux besoins immenses du continent en électricité. Le développement massif de projets d'électrification, notamment à partir de l'énergie solaire, doit pour cela être accéléré en répondant aux exigences de "bancabilité" des investisseurs et financeurs.

Ainsi, deux grands axes doivent être poursuivis pour répondre à cet objectif : (1) accentuer le soutien aux États africains afin d'établir ou renforcer un cadre attractif et offrir de la visibilité et de la liquidité sur les opportunités d'investissements, ainsi que (2) développer des produits de garanties et de financement répondant aux besoins spécifiques de ces marchés, et plus particulièrement aux spécificités des projets de petites tailles.

Enfin, les développeurs et investisseurs privés intéressés par les opportunités offertes sur le continent ont tout intérêt à se faire accompagner par des conseils professionnels de qualité, leur permettant ainsi de maximiser les chances de réussite de leurs projets et d'aboutir à leurs réalisations effective. ▲

1- Brighter Africa - The growth potential of the sub-Saharan electricity sector – McKinsey 2015  
2- <https://ourworld.unu.edu/en/africa-and-climate-change>

**490**  
milliards de dollars,  
c'est le montant des investissements nécessaires pour résorber le déficit de production d'ici 2040.

# ÉNERGIE ET LOI DE PARKINSON



JACQUES MAIRE  
(P58 CM)

BIO

Jacques Maire est ancien élève de l'École Polytechnique et ingénieur au corps des mines. Il a été notamment directeur général de Gaz de France et a occupé plusieurs postes dans la haute fonction publique. Jusqu'en janvier 2013 il était président du conseil scientifique du Conseil Français de l'Énergie, dont il est administrateur.

**Prix, règle de la sécurité de l'approvisionnement, implications politiques, objectif lié au climat... l'énergie a des caractéristiques qui engendrent une grande complexité, avec comme corollaire une inflation juridique. Explications.**

JACQUES MAIRE (P58 CM), ancien DG de Gaz de France, administrateur du Conseil Français de l'Énergie - jacques.maire@mines.org

Lorsque j'ai pris mes fonctions à Gaz de France (GDF), les bases juridiques que j'avais à connaître étaient simples et tenaient dans une dizaine de pages qui définissaient les droits et les devoirs de deux sociétés en monopole, EDF et GDF. La gestion publique se résumait à quelques idées simples tenant à la sécurité d'approvisionnement, à la dérive des tarifs, à la maîtrise des salaires et des effectifs. Une grande partie n'était pas à base de textes mais constituée de pratiques.

**UNE PROLIFÉRATION GÉNÉRALE**

Maintenant, les textes représentent des centaines de pages et surtout leur croissance est continue. À l'époque, personne n'avait jugé utile de créer un code de l'énergie. Il a été décidé en 2005 mais sa publication n'a eu lieu qu'en 2011. Le code Dalloz 2017 comprend 1 184 pages. La loi de transition énergétique comprend 215 articles, a entraîné 19 ordonnances et 162 décisions à caractère réglementaire. Autre exemple, la déclaration de revenus comprend 27 lignes relatives à l'énergie !

Cette prolifération est un phénomène général : le code du travail fait 2 900 pages, celui de l'environnement 2 000, le code de la consommation 2 640, etc. Et il ne faut pas oublier que tout n'est pas dans les codes.

L'origine de cette inflation vient en premier lieu de la complexité des organisations, des produits et des services offerts. La vie autrefois n'était pas plus facile mais elle était plus simple. Les individus veulent être libres de leur décision mais veulent que les pouvoirs publics les protègent des risques

liés aux décisions des autres (et éventuellement les indemnisent). La réponse officielle est dans les normes et les règlements. La tendance naturelle est d'ajouter de nouvelles mesures. À toute personne protestant sur telle ou telle disposition, il est facile de faire dire les mesures nouvelles qu'elle estime indispensables.

Enfin les services responsables ont pris de l'ampleur et leur tendance naturelle est de développer leur domaine. C'est particulièrement vrai de la commission de Bruxelles qui, dans ces domaines, a de larges pouvoirs propres et développe son fonds de commerce. Les États américains sont pour ces questions plus libres vis-à-vis du pouvoir fédéral que les États européens vis-à-vis de Bruxelles.

Pour les biens et services courants, les règles sont faites pour protéger les citoyens mais les pouvoirs publics n'essaient pas le plus souvent d'y introduire des aspects politiques. Par exemple, personne ne se préoccupe de la sécurité d'approvisionnement dans le textile ou de l'habillement des défavorisés.

L'énergie est bien sûr prise dans le mouvement général mais elle a des caractéristiques qui engendrent une complexité plus grande :

- une partie de l'activité relève du monopole naturel et il faut faire cohabiter au long de la chaîne des activités monopolistiques et concurrentielles et définir leurs frontières ;
- comme bien essentiel, les pouvoirs publics se préoccupent de la sécurité d'approvisionnement ;

La loi de Parkinson pose que tout travail au sein d'une administration augmente jusqu'à occuper entièrement le temps qui lui est affecté.



- les pouvoirs publics se préoccupent de l'égalité des citoyens et de la situation des plus défavorisés ;
- pour lutter contre le changement climatique, les pouvoirs publics veulent orienter les choix des acteurs vers des énergies bas carbone ;
- les entreprises appliquent la réglementation en recherchant comme pour toute action la voie la moins coûteuse pour elles.

La priorité des pouvoirs publics est l'égalité de traitement et le non abus du monopole ; ceci est assez facile théoriquement en imposant la publication de tarifs contrôlés par la régulation mais il a fallu créer un nouvel organe administratif indépendant, la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), avec un effectif au-delà de la centaine de personnes.

**UN TARIF COMPLEXE**

Mais les pouvoirs publics veulent aussi (pas toujours avec succès) que les tarifs favorisent l'efficacité de toute la chaîne et soient donc calculés sur des bases économiques.

Le monopole intégré (production, transport, distribution, vente de l'électricité ou du gaz) fixait essentiellement les tarifs finaux, la répartition des dépenses ne relevait que de la comptabilité interne. Le problème est maintenant que chacun doit supporter les coûts dont il est responsable mais pas plus ; ils doivent être précis et justifiés.

C'est d'autant plus compliqué compte tenu des caractéristiques de l'électricité et du gaz qui soit ne sont pas stockables, soit le sont de façon coûteuse.

Un kWh ne se caractérise pas seulement par ses données physiques mais aussi par le lieu et le moment de la transaction. Les conditions de fourniture, telles que la puissance ou le débit, différencient les consommateurs. Un contrat devra comprendre également les probabilités des situations. Le nombre de cas possibles est infini. Le problème est très complexe et la séparation transport/vente n'a été possible que grâce à l'informatique.

Pour la petite histoire, les premiers programmes pour le gaz ont été écrits par British Gas, ce qui a permis ensuite de démanteler l'entreprise plus facilement ! Mais surtout cette complexité ne peut qu'augmenter car les tarifs à un instant donné correspondent à des arbitrages entre différents aspects ; ils ne sont pas parfaits : des cas particuliers apparaîtront nécessairement et on essaiera de les corriger par de nouvelles catégories de tarification.

Mais nous sommes encore dans le domaine du rationnel ; il y a même de quoi ravir les fanatiques de calcul économique et, en particulier, les amoureux des coûts marginaux.

►► **QUAND LE POLITIQUE S'EN MÊLE**

Malheureusement la réalité est différente car les calculs prennent déjà en compte des considérations politiques. La principale est la péréquation, option de service public: il faut des tarifs de transport indépendants de la géographie! Le réseau n'est pas non plus idéal aux yeux du politique pour les équilibres régionaux.

Par exemple, il faut unifier les zones tarifaires gaz françaises mais, pour cela, des liaisons sont nécessaires et il faut convaincre le responsable du réseau d'investir: cela n'est possible qu'en lui garantissant la rentabilité. Le consommateur paiera!

De même, l'Europe voudrait améliorer l'unité du marché en renforçant des moyens d'interconnexion mais pour cela il faut assurer une rentabilité au moins égale aux autres réalisations. Là encore, le consommateur paiera!

C'est ainsi qu'on voit apparaître des taux d'intérêt différenciés pour leur prise en compte dans les calculs de la CRE et un coût, donc un prix, croissant du service rendu par les infrastructures. Le gestionnaire de réseau, avec l'accord de la CRE peut aussi vouloir favoriser telle ou telle forme de contrat et donc moduler ses marges.

Mais qu'est-ce qui relève du régulé et du non régulé? Pour le gaz, l'acheminement jusqu'au consommateur ne fait pas intervenir que des tuyaux mais aussi des terminaux méthaniers et des stockages. Les terminaux ont été prévus avec des tarifs régulés mais pour favoriser leur construction on a inventé les exceptions par lesquelles l'investisseur peut se réserver tout ou partie de la capacité. Pour les stockages, ils n'ont pas été inclus dans la régulation mais l'expérience des dernières années a mené à remettre maintenant en cause cette situation.

**LE CAS DES ÉNERGIES RENOUVELABLES**

Mais dans l'énergie les pouvoirs publics ont d'autres objectifs que la concurrence et l'évolution spontanée du marché ne permettent pas d'atteindre. Le premier objectif lié au climat est de favoriser les énergies non carbonées. Pour cela, il faut pénaliser les uns ou aider les autres.

En dehors de certaines normes, la taxation, ou le marché du carbone vanté par les économistes, n'a pas été bâtie de façon acceptable et efficace. La principale mesure a été de subventionner les énergies renouvelables. Pour une fois, on est allé à la simplicité en offrant un débouché sûr à un prix garanti. Cela a plutôt réussi avec un développement rapide des énergies renouvelables mais la dérive budgétaire a été telle que l'on commence à aller vers des plafonnements et des appels

d'offres, donc vers plus de complexité. On oublie trop souvent l'exemple des prix agricoles plus ou moins administrés: ils conduisent à la surproduction ou à la pénurie mais rarement à une situation stable.

Les énergies renouvelables rencontrent des difficultés pour s'implanter car les règles d'environnements s'appliquent et ont été conçues pour protéger et pas pour promouvoir. On commence à parler de procédures spécifiques pour ces investissements. On retrouve d'ailleurs les mêmes acteurs qui demandent des précautions de plus en plus sévères pour les équipements publics mais aussi des simplifications pour les équipements qui correspondent à leurs idées!!

“  
Dès qu'on prend une mesure, il faut penser à son application et les opérations simples en grand nombre deviennent des opérations compliquées.  
”

Mais les pouvoirs publics veulent aussi agir sur la demande pour la restreindre ou l'orienter vers des énergies décarbonées. C'est beaucoup plus difficile car il faut toucher des millions de citoyens et des milliers d'entreprises pour qui l'énergie n'est qu'une utilité et n'est donc pas une préoccupation première. Les pouvoirs publics ont développé des quantités de mesures à caractère fiscal ou financier.

Toutes partent d'une bonne idée mais l'ensemble est difficilement lisible et la tentation est toujours de perfectionner. Ils ne traitent pas deux problèmes majeurs: • ils touchent des actions intéressantes mais le plus difficile est sans doute d'amener les particuliers à se poser la question, car on ne prend conscience de l'énergie que le jour où elle ne marche pas ou que la note paraît sévère; • l'autre difficulté est d'avoir un réseau d'entreprises, souvent artisanales, suffisamment compétentes et motivées. C'est sans doute un grand obstacle à la réalisation des objectifs ambitieux figurant dans diverses déclarations.

Dès qu'on prend une mesure, il faut penser à son application et les opérations simples en grand nombre deviennent des opérations compliquées. Comme on veut éviter la fraude, on multiplie les pièces justificatives.

Les certificats d'énergie, bonne idée, ont obligé à prévoir leur distribution par les services, à définir des imprimés de déclaration, à tenir une comptabilité centralisée et à prévoir des actions de contrôle.

À chaque fin de période, on veut les perfectionner. On a créé deux catégories au dernier programme pour prendre en compte l'aspect social des bas revenus, c'est-à-dire la lutte contre la précarité énergétique.

**LA SÉCURITÉ DES APPROVISIONNEMENTS**

Mais le problème le plus vital est la sécurité des approvisionnements car on n'imagine pas la société s'arrêter faute d'électricité, de gaz ou d'essence. Dans les secteurs concurrentiels, ce n'est pas une préoccupation explicite. Chaque entreprise se préoccupe de ses clients mais pas de l'équilibre global, tout au plus rêve-t-elle à un marché tendu où elle serait, elle, capable de livrer. Quant aux pouvoirs publics, ce n'est généralement pas une préoccupation (sauf situation de guerre).

Pour le pétrole, les pouvoirs publics ont mis en place des stocks stratégiques. Pour le gaz et l'électricité, la question était simple (sinon facile): le premier devoir de l'entreprise en monopole était la continuité de fourniture; une interruption aurait été un péché mortel (pour le président!).

Mais avec la libéralisation du marché, la sécurité d'approvisionnement est devenue orpheline: les pouvoirs publics deviennent les seuls vrais responsables. Ils doivent édicter des règles à appliquer par les acteurs en espérant que le résultat global sera satisfaisant.

Ils ont mis en place des autorisations et des obligations pour leurs titulaires. Mais comme toute obligation, elles sont respectées au minimum et l'expérience montre que l'on peut avoir des surprises.

Pour le gaz, ce qui est visé c'est l'interruption de la principale source, les obligations faites aux distributeurs sont à base de diversification des sources, de clients interruptibles et de stockage. Mais l'expérience montre que, lorsque les difficultés arrivent, les surprises peuvent arriver aussi: l'interruptible ne l'est pas tout à fait, le stockage souscrit n'est pas rempli, les achats possibles de GNL n'arrivent qu'avec délai... Il en découle de nouvelles complexités dans les obligations et donc de nouvelles procédures de suivi. Par exemple, ajouter à des obligations de souscription de stockage des obligations de remplissage à des dates déterminées.

Pour l'électricité, le problème est d'avoir à tout moment la puissance disponible; sinon le réseau s'effondre. Avec le développement des énergies renouvelables, qui ont une priorité d'appel sur le réseau, l'équilibre financier des centrales thermiques n'a plus été assuré et beaucoup ont été fermées (les pouvoirs publics n'ont pas de moyens d'empêcher la fermeture). Or, on peut avoir un temps très froid, un ciel couvert et pas de vent, le dernier hiver a montré la vulnérabilité du système.

On est en train d'inventer les marchés de capacité, c'est-à-dire de financer des centrales en stand-by. En théorie économique, c'est un joli problème qui a de quoi passionner les théoriciens.

“  
Avec la libéralisation du marché, la sécurité d'approvisionnement est devenue orpheline: les pouvoirs publics deviennent les seuls vrais responsables.  
”

Mais, vu du consommateur, cela s'assimile à une double peine: il a subventionné des installations qui ont créé le déséquilibre et maintenant il doit payer pour corriger les tares du système.

Personne n'a fait le bilan des coûts de transaction mais en voulant séparer monopole naturel et activités concurrentielles, en voulant tordre le marché pour qu'il aille là où on veut le voir aller, on aboutit à un monument juridique dont on imagine difficilement qu'il se stabilise. Il faudrait un examen critique en essayant d'établir une hiérarchie dans les objectifs et se souvenir de quelques règles:

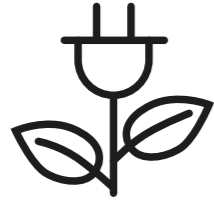
- ne pas essayer de tout faire en même temps et établir des priorités;
- regarder, avant de fixer des règles, si les compétences existent pour les mettre en œuvre (experts pour les diagnostics thermiques?);
- se rappeler que le mieux est l'ennemi du bien et que l'enfer est pavé de bonnes intentions;
- se rappeler aussi qu'une décision inapplicable n'est pas appliquée et dévalue toutes les décisions pertinentes.

L'Europe voudrait voir baisser la consommation d'énergie. Une activité qui baisse, une réglementation et une administration qui croissent, n'est-ce pas une illustration de la loi de Parkinson? ▲

**À PROPOS DE LA LOI DE PARKINSON**

Il s'agit de l'une des lois fondamentales de l'organisation du travail: développée par Cyril Northcote Parkinson et fondée sur l'étude du travail dans les administrations britanniques (notamment dans deux ministères), cette loi affirme que:

- Tout travail finit par occuper le temps qui lui est imparti: comme le gaz, le travail occuperait tout l'espace disponible et n'aurait pas de volume propre!
- Le nombre de bureaucrates augmente de manière inéluctable d'environ 6% chaque année.



# TRANSITION HEUREUSE : ESPOIR OU ILLUSION ?

**Énergie, environnement, climat: saurons-nous mettre leurs évolutions en perspective afin d'identifier les leviers d'action pertinents? Évitions invectives et dénis de réalité!**

**FRANÇOIS GIGER** (P72/CM75), Consultant associé ARCLÉS  
francois.giger@mines-paris.org  
**JEAN-PIERRE CAPRON** (X62/CM 65) – jean-pierre.capron@mines.org

Avec la publication récente de trois nouveaux rapports du GIEC<sup>1</sup>, le rôle de l'activité humaine dans le réchauffement climatique est revenu sur le devant de la scène. À l'opposé, des informations relatives à la France comme à des zones géographiques plus étendues montrent que les trajectoires suivies par les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et les températures s'écartent de celles qui seraient compatibles avec les termes de l'accord de Paris. Le constat de ce hiatus est anxiogène. Il incite à mener des actions correctrices sans tarder mais ne facilite pas la prise de recul nécessaire pour en analyser la pertinence. Or quelques questions méritent d'être abordées; l'apparition des contraintes sur l'aval, les zones d'ombre de la pensée économique, les mailles géographiques pertinentes et les effets d'inertie, les aspects démographiques, l'écueil des évaluations des flux, les incohérences de la loi pour la transition énergétique, l'illusion du marginalisme, la complexité systémique pour en citer quelques-unes.

## L'APPARITION DES CONTRAINTES SUR L'AVAL

Dans l'histoire de l'humanité, dès l'émergence d'organisations sociales sédentaires, la répartition entre les individus de l'accès aux ressources fournies par la nature induit un mode d'organisation dédié. Le détenteur du pouvoir local prend sous son autorité chaque ressource naturelle, sans omettre la mise en place d'un mécanisme de partage lui assurant une part du produit de l'exploitation. Ainsi, dans l'Égypte antique, l'évaluation de la surface mise à la disposition de chaque agriculteur après la crue annuelle du Nil relevait des prérogatives des scribes tendeurs de corde, lointains ancêtres de nos modernes arpenteurs et géomètres, ainsi que de nos notaires.

Avec le changement d'échelle dans l'exploitation des forêts et l'extraction des ressources minérales qui ont nourri le développement industriel, les économistes ont établi un cadre conceptuel pour rendre compte du coût d'accès aux ressources, de leur éloignement des lieux d'utilisation et de leur rareté. La notion économique de rente minière en est issue par la comparaison de structures de coûts d'exploitations concurrentes. La formation d'un prix de marché, calé sur le coût de la ressource la plus chère nécessaire à la satisfaction de l'ensemble des besoins, a aussi été conceptualisée (coût de l'offre marginale). La notion selon laquelle cet effet de rareté entraîne une poussée des prix à la hausse est communément perçue. Cela n'empêche pas son rejet par ceux dont il ampute les ressources modestes, comme nous le rappelle l'actualité lors des soubresauts des marchés du pétrole et d'autres matières premières ou denrées alimentaires de base. Les gouvernements, alors tenus pour responsables des difficultés en résultant, se trouvent assez démunis et recourent parfois à des mécanismes de prix administrés

et subventionnés; c'est ainsi que, dans le monde, les usages de l'énergie à base de pétrole et de charbon reçoivent des montants de subvention largement supérieurs aux budgets consacrés à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Jusqu'à la moitié du XX<sup>e</sup> siècle, le seul effet de rareté pris en compte ne s'appliquait qu'à l'amont des processus de production. L'aggravation de la pression sur le milieu naturel, induite par les vagues de développements industriels, urbains et de consommation d'après-guerre, a rendu nécessaire de gérer l'impact sur l'environnement. Un nouvel effet de rareté est apparu, au travers de la limitation appliquée aux émissions de polluants et à l'abandon de déchets. Des réglementations plus contraignantes ont été élaborées, avec des interdictions, le recours à des quotas d'émission et à des taxes nouvelles, afin d'inciter à la réduction des impacts. Le slogan "pollueur payeur" illustre cette approche. Les processus de production et d'usage, déjà contraints par la rareté naturelle à l'amont, se trouvent progressivement contraints par un effet supplémentaire de rareté imposée à l'aval.

## LES ZONES D'OMBRE DE LA PENSÉE ÉCONOMIQUE

Comme le montre l'actualité, la sauvegarde du milieu naturel, avec son impact sur la santé, est source récurrente de discordes entre les partisans du trop et ceux du trop peu. Sur les réseaux sociaux, rumeurs et théories complotistes le disputent aux informations plus factuelles. Les mécanismes ou décisions motivés par la sauvegarde du milieu naturel sont souvent perçus comme exogènes, régulièrement contestés à ce titre et parfois sources de controverses. Ils ne sont donc pas suffisamment intégrés dans le mode de pensée présidant aux prises de décisions opérationnelles.

Des travaux académiques tout à fait novateurs, comme ceux de Jean Tirole et d'Ivar Ekeland<sup>2</sup> sur la notion économique de bien commun, remettent en cause des notions communément admises dans la pratique actuelle du capitalisme libéral; ce champ conceptuel nécessite encore largement d'être défriché et enseigné.

Dans cette attente, à côté des prises de conscience individuelles, seules des approches réglementaires contraignantes, nécessairement tributaires de l'étendue géographique de chaque juridiction, peuvent être mises en place pour tenter de réguler la rareté à l'aval. Notons que pour les unes comme pour les autres se pose la question de l'exactitude du socle de connaissances sous-jacent. Ainsi apparaît la question de la maille géographique pertinente pour aborder la question.

## LES MAILLES GÉOGRAPHIQUES ET TEMPORELLES PERTINENTES

Deux sujets de pollution à grande distance, les pluies acides et le trou de la couche d'ozone, peuvent apporter quelques éléments à la réflexion. Identifié dans un passé relativement récent, le dépérissement de forêts européennes résultant des pluies acides est en passe de trouver une résolution satisfaisante à la maille régionale; la corrélation entre les sources d'émission, principalement pour le dioxyde de soufre, et les zones impactées qui se trouvent sous leur vent est établie. Des actions volontaristes ont été engagées, en Europe notamment, et le début d'effet favorable sur les forêts y est perceptible, alors qu'une évolution équivalente ne se constate pas en Asie, moins active à traiter le problème.

Le trou apparu dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique a conduit à la création du GIEC puis, en 1989, à la prise de mesures de réduction de l'usage des gaz réfrigérants CFC (ChloroFluoroCarbures) selon le calendrier précis du protocole de Montréal; responsables de l'essentiel des émissions, les pays riches ont dû appliquer le rythme de réduction de production le plus rapide. Un début de réduction de l'étendue du trou aurait récemment été constaté et l'espoir d'une confirmation est attendue pour les années à venir mais l'atteinte d'une situation totalement satisfaisante n'est espérée qu'à l'horizon 2060. Ces deux exemples illustrent les inerties des systèmes couplant industrie et climat. Ils apportent aussi une note d'espoir en montrant la possibilité effective de traiter les problèmes, en commençant dans les pays dont le niveau de vie est comparable et suffisamment élevé pour supporter les coûts afférents.

L'aggravation de la pression sur le milieu naturel a rendu nécessaire de gérer l'impact sur l'environnement: réglementations contraignantes, les interdictions, quotas d'émission, taxes nouvelles... : les processus de production et d'usage se trouvent progressivement contraints par un effet supplémentaire de rareté imposée à l'aval.



**JEAN-PIERRE CAPRON**  
(X62/CM 65)



## BIO

Ancien collaborateur de Jean-Pierre Fourcade en 1974, il a été, de 1978 à 1984, à la tête de la direction des hydrocarbures au ministère de l'Industrie. Directeur général de la société d'ingénierie Technip de 1985 à 1986, il fut ensuite, de 1986 à 1989, administrateur général du CEA. Il a ensuite pris la présidence de Renault Véhicules Industriels de 1989 à 1994, puis de Fives-Lille jusqu'en 2002, avant de terminer sa carrière professionnelle dans l'offshore profond chez Subsea 7. En 1987, il avait été nommé président du conseil d'administration de l'École nationale supérieure des mines de Paris.





**FRANÇOIS GIGER**  
(P72/CM75),  
Consultant associé ARCELES

**BIO**

Depuis le développement du forage horizontal pour la récupération des hydrocarbures à l'IFP, jusqu'à la construction de centrales thermiques chez EDF, en passant par le contrôle des installations classées et du transport des matières dangereuses, il a consacré sa carrière à l'énergie et à la protection de l'environnement. Il a notamment piloté pendant 10 ans le programme de R&D du groupe EDF pour le captage et le stockage du CO<sub>2</sub>. Il préside le club Mines-Énergie, depuis sa fondation en 1999, ainsi que l'association ABC Mines.



À l'inverse, la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est un sujet qui touche toute la planète. Chaque émission locale a un impact infime mais qui touche la totalité du volume atmosphérique. Il y n'a donc aucune corrélation entre l'emplacement de la source où est fait un effort de limitation des émissions et la zone qui en bénéficie. En d'autres termes, les actions sont à réaliser au niveau local et les mesures à prendre au niveau régional, pour un impact global. Comme toute la planète pâtit ou profite des actions locales, la détection des "passagers clandestins" est une condition nécessaire de succès. Cette préoccupation sous-tend toutes les négociations internationales, que ce soit sur les collectes de données d'émission, la responsabilité partagée et la répartition des efforts (*burden sharing*). Un climat international de coopération et de confiance mutuelle est également un prérequis, dont l'établissement n'est guère facilité par l'évolution récente du contexte politique mondial.

En outre, nous sommes, ici encore, en présence de systèmes dotés de forte inertie. Aussi nécessaire soit-elle, une action vertueuse à réaliser maintenant ne participera pas à une amélioration avant la prochaine génération.

**LES ASPECTS DÉMOGRAPHIQUES**

Les tendances démographiques comptent aussi parmi celles les plus caractérisées par une inertie lourde. À une exception notable près, il est malheureux de constater que seuls les épidémies ou l'usage des armes sont en mesure de les infléchir en peu d'années. L'exception est le succès de la réduction du taux de natalité obtenu par Mao Tsé Tong avec sa politique de l'enfant unique; inutile de rap-

pelez ici que les méthodes coercitives mises en œuvre s'écartent notablement des aspirations de la plupart de nos contemporains.

La population mondiale a triplé ces cinquante dernières années pour atteindre 7,5 milliards d'individus. Sa croissance se ralentit sous l'effet de deux facteurs; l'élévation du niveau de vie et l'accroissement du taux de scolarisation des jeunes filles auquel est fortement corrélé la baisse du taux de fécondité. Les prévisions pour 2050 sont de 10 milliards à 10% près. Selon la Banque Mondiale, en 2018, près de la moitié de la population mondiale vivait sous le seuil de pauvreté de 5,5 dollars par personne et par jour<sup>3</sup>. L'aspiration à une élévation du niveau de vie vient se surajouter à l'accroissement de la population et constitue aussi une condition de sa stabilisation. Avec les technologies actuellement disponibles, ces deux facteurs conduisent mécaniquement à un accroissement de la demande en énergie de ces populations pauvres. On voit mal comment les convaincre de continuer à se serrer la ceinture.

Un facteur aggravant résulte du fait que les populations les plus pauvres habitent dans les zones intertropicales. Les effets climatiques y induisent les effets de stress hydrique les plus forts, sur les cultures et la désertification.

**L'ÉCUEIL DES ÉVALUATIONS DES FLUX**

Dans notre monde industrialisé, tout objet manufacturé, en particulier s'il est utilisé dans un processus de conversion d'énergie, induit deux catégories d'émission de CO<sub>2</sub>; celles liées à l'usage viennent spontanément à l'esprit, par consommation de carburant ou d'une énergie incorporant une composante carbonée. Il ne faut néanmoins pas oublier celles liées à la fabrication puis à l'élimination de l'objet.

Au total, l'établissement d'une analyse de cycle de vie (ACV) focalisée sur le CO<sub>2</sub> est nécessaire pour obtenir un indicateur pertinent. Il s'agit d'un travail considérable de collecte et d'analyse de données, à l'image de l'enchevêtrement des processus de production industriels. L'usage d'intrants importés en accroît la complexité mais ne peut être ignoré; il importe de savoir si les batteries d'un véhicule électrique sont produites en Chine, voire en Allemagne, avec une énergie électrique très carbonée ou en Suède et en France, avec une énergie qui ne l'est pas; cela a un impact déterminant sur l'évaluation de la quantité moyenne de CO<sub>2</sub> émis au kilomètre parcouru, qui s'ajoute au mode de production de l'électricité de charge. Suivant le cas, l'intérêt même de l'option de motorisation électrique pour préserver le climat peut être remis en question.

**L'ILLUSION DU MARGINALISME**

Dans un pays à haut niveau de vie comme la France, les attentes des clients et la pression de l'opinion publique conduisent néanmoins les directions d'un nombre croissant d'entreprises à intégrer la question climatique dans les choix de leurs grandes orientations comme dans les décisions quotidiennes. Toutefois, dans l'arbitrage face aux préoccupations de court terme, dont la survie face à la compétition internationale, des situations de dilemme apparaissent trop souvent. L'impact infime et différé de chaque émission peut conduire les acteurs à sous-estimer l'importance des actions de leur ressort; tel producteur automobile continuera-t-il à fournir le segment dit des SUVs (Sport Utility Vehicle), le plus rémunérateur, sans lequel il n'aurait pas les ressources nécessaires aux développements coûteux dans le véhicule électrique? Qu'en penser? Faudrait-il le lui interdire et l'affaiblir par rapport à ses concurrents?

Alors qu'un début de réchauffement est constaté, à un rythme éventuellement supérieur aux prévisions, et que les rejets de GES (gaz à effet de serre) continuent d'augmenter<sup>4</sup>, des organisations privées ou publiques prennent des dispositions pour en anticiper les effets sur leur propre activité et y faire face. La tâche est ardue; dans les modes de fonctionnement actuels de nos économies, comment prendre la véritable mesure des interdépendances dans les ramifications des chaînes de production et de leur vulnérabilité aux aléas?

Qui avait anticipé que le grand tremblement de terre et le tsunami qui ont touché le nord du Japon le 11 mars 2011 pouvaient créer une pénurie mondiale de composants? Des usines de production d'automobiles ont été contraintes à l'arrêt quelques jours ou semaines dans le monde entier. Nos économies complexes sont en effet particulièrement vulnérables à de tels "cygnes noirs", événements dont la probabilité d'occurrence est infinitésimale à l'échelle d'une vie humaine mais dont les conséquences potentielles sont considérables... Ainsi une explosion volcanique majeure ou la chute d'une très grosse météorite perturberaient profondément nos modes de vie comme le climat de la planète.

Le particulier, qui équipe son logement d'un climatiseur pour mieux supporter les épisodes caniculaires, est convaincu d'anticiper son adaptation au réchauffement climatique. Outre qu'il est antagoniste d'un objectif d'économie d'énergie, ce mode de raisonnement "à la marge" ignore l'agrégation des comportements individuels. Leur conséquence est le ripage prochain des pointes de consommation électrique, typiquement constatées en France le deuxième mardi de février, vers le début août; à cette période, le système de production et de transport, déjà sous stress, est limité en puissance du fait de la



istockphoto

Le nucléaire est le moyen de production qui émet en France le moins de CO<sub>2</sub> par MWh en cycle de vie complet: tout nouveau moyen de production d'électricité renouvelable installé émet plus de CO<sub>2</sub>.

période caniculaire. Le particulier est-il conscient d'avoir fait l'hypothèse implicite que le système électrique supportera sans difficulté le modeste appel de puissance supplémentaire... et celui de tous ceux qui ont le même comportement?

L'atteinte de la neutralité carbone en France en 2050 nécessite une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> induites de 4% par an. À première vue, cela semble facile pour l'année prochaine mais cela sera un peu plus difficile la suivante... Qui a conscience que ce taux de décroissance est voisin de celui qui a touché la production des charbonnages pendant leur récession jusqu'à leur fermeture?

**LES INCOHÉRENCES DE LA LOI POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE**

La loi pour la transition énergétique (LTE n°2015-992 du 17/8/2015) affiche un objectif de réduction des émissions de GES et pose les bases d'une stratégie nationale bas carbone (SNBC) déclinée dans le code de l'environnement (Art. L100-4).

Pour compter les émissions de GES, comme vu précédemment, il faut faire l'exercice délicat d'analyse en cycle de vie focalisée sur le CO<sub>2</sub>. Selon l'annexe à l'étude du GIEC de 2014<sup>5</sup>, les valeurs mondiales moyennes des émissions du cycle complet sont évaluées à:

- 11g CO<sub>2</sub>/kWh pour l'éolien,
- 41 à 48g CO<sub>2</sub>/kWh pour le solaire et
- 12g CO<sub>2</sub>/kWh pour le nucléaire.

Toutefois, pour la France qui tire avantage d'une électricité fortement décarbonée, notamment pour le cycle d'enrichissement de l'uranium, le cycle du nucléaire exhibe une



istockphoto

La population mondiale a triplé ces cinquante dernières années pour atteindre 7,5 milliards d'individus, avec près de la moitié vivant sous le seuil de pauvreté... et aspirant à une élévation du niveau de vie: deux facteurs qui conduisent mécaniquement à un accroissement de la demande en énergie.



valeur inférieure à la moitié, de 4 à 5,45g CO<sub>2</sub>/kWh selon les sources<sup>6</sup>. Une telle réduction ne s'applique pas pour le solaire et l'éolien dont une majorité des composants sont importés. En outre, du fait de l'intermittence, la valorisation économique de la contribution de ces derniers au système électrique est plus faible et décroîtrait significativement au-delà d'un seuil de 11% au plus de la puissance installée<sup>7</sup>. À part certaines installations hydrauliques, le nucléaire est le moyen de production qui émet en France le moins de CO<sub>2</sub> par MWh en cycle de vie complet. Incidemment, c'est la forme d'énergie qui a l'empreinte foncière la plus modeste en termes de surface rapportée à la puissance. L'essentiel des sites hydrauliques susceptibles d'y être équipés le sont. Donc tout nouveau moyen de production d'électricité renouvelable installé émet plus de CO<sub>2</sub> par MWh en cycle de vie complet. Les objectifs d'accroissement de la part du renouvelable apparaissent donc en contradiction avec l'objectif de réduction des émissions de GES et les subventions dépensées en soutien de ce programme ont un effet contre-productif sur le réchauffement climatique. Ce ne serait pas le cas si les mêmes sommes étaient allouées pour offrir les équipements d'énergie renouvelable à des pays pauvres dont le mix est très carboné. Au surplus, certains de ces pays jouissent d'un ensoleillement et de régimes de vents plus propices que les nôtres qui en permettraient un usage plus efficient.

Les incohérences de la LTE résultent pour une bonne part d'une contradiction interne que nombre d'écologistes ne parviennent pas à surmonter : d'une part, ils entendent infléchir les évolutions actuelles du climat terrestre en éliminant les émissions de CO<sub>2</sub> et, d'autre part, ils sont opposés au nucléaire pour des raisons qui leur sont propres. Sur ce dernier point, ils n'hésitent pas à afficher sur leurs sites que la production des centrales nucléaires est plus émettrice de CO<sub>2</sub> que le renouvelable ; non sans succès d'ailleurs car, selon des sondages d'opinion, la moitié de la population française serait prête à l'entendre. Dès lors, un seul compromis dialectique est possible entre ces aspirations contradictoires : la décroissance énergétique, dont celle de la production d'électricité. Mais une réduction de la consommation d'électricité est incompatible avec la pénétration des véhicules électriques, promue par ailleurs pour réduire la consommation de carburant ; en moyenne, un ménage double sa consommation d'électricité lorsqu'il acquiert un véhicule électrique.

La réduction de la consommation d'énergie des logements existants au moyen de travaux d'isolation est présentée comme le deuxième gisement de décarbonation des usages en France après celui des transports ; sa mise en œuvre prend du retard. Elle se heurte à des contraintes

financières difficilement surmontables, à savoir des temps de retour des investissements supérieurs au demi-siècle dans la plupart des cas, qui questionnent également sur le bon usage de l'affectation de subventions publiques. À titre d'illustration, comme l'expliquent Gaël Blaise et Matthieu Glachant sur la base de données officielles de l'ADEME de 2000 à 2013, une évaluation ex post sur un panel de rénovations énergétiques de logements identifie un effet très modeste des travaux ; "1000 € supplémentaires dépensés induisent une diminution moyenne de la facture énergétique annuelle de 8,29 €"<sup>8</sup>.

### LA COMPLEXITÉ SYSTÉMIQUE

L'évocation de l'écueil des évaluations des flux ne fait qu'effleurer une complexité bien supérieure ; les mécanismes d'interaction à toutes échelles sur lesquels le GIEC a déjà collecté une masse impressionnante d'informations. Il est hors de propos de chercher à tous les synthétiser ici, d'autant que nombre de sujets scientifiques restent encore à investiguer. Une nouvelle alerte a été reprise dans *Le Monde* le 10 novembre<sup>9</sup> ; la biomasse d'arthropodes subit un effondrement en Europe Occidentale. Elle aurait été divisée par trois entre 2008 et 2017 et la diversité réduite d'un tiers<sup>10 11</sup>.

Les interactions entre évolutions des températures et de l'hygrométrie, cycles biologiques du CO<sub>2</sub> et biodiversité commencent tout juste à faire l'objet d'études depuis quelques années ; la fragilisation de mécanismes contribuant à la stabilité climatique au niveau local a déjà été identifiée. Outre le sujet médiatisé de la protection des surfaces forestières, la biodiversité rétroagit avec la capacité des sols, cultivés ou non, à stocker du CO<sub>2</sub>. Elle est fortement influencée par les mauvaises pratiques culturelles dont l'effet sur la désertification n'est malheureusement plus à établir. Il en existe heureusement d'autres, ancestrales ou récemment développées, qui ont l'effet inverse. Si de grandes surfaces céréalières connues des Romains et des Carthaginois dans le Sahara ont laissé la place au désert, des pratiques de plantations de haies protègent des cultures du Bassin méditerranéen de la déshydratation par le vent.

Des centres de recherche agronomique promeuvent une modification des pratiques<sup>12</sup> ; il y a probablement là des facteurs de risques majeurs mais aussi des motifs d'espoir. Les opportunités à saisir sont à identifier et à mettre en œuvre tout en veillant à ne pas déstabiliser d'autres équilibres fragiles...

### QUELLE POSTURE ADOPTER FACE À CES QUESTIONS ?

Guettés par le vertige face à toutes les questions ouvertes, pouvons-nous temporiser, le temps de les avoir éluci-

dées ? Certainement pas. Comme Jacques Chirac l'a énoncé devant l'assemblée plénière du IV<sup>e</sup> Sommet de la Terre le 2 septembre 2002 à Johannesburg : "Notre maison brûle et nous regardons ailleurs". Depuis cette date, nous pouvons nous réjouir de la prise de conscience de l'enjeu climatique, en particulier chez les générations les plus jeunes en Europe. En tant qu'ingénieurs, nous devons les aider, par le dialogue, à discerner les positions idéologiques infondées des faits scientifiquement établis. Cette prise de conscience n'est malheureusement pas partagée par leurs contemporains aux Etats-Unis ni au Japon pour n'évoquer que les pays les plus riches. Sans accès à ce niveau d'information, des populations plus pauvres subissent un accroissement du stress hydrique qui fragilise encore plus leur système de cultures, en Afrique subsaharienne notamment, sans que nous en percevions l'ampleur.

Depuis le niveau individuel, dans la vie quotidienne, jusqu'aux centres de décisions, le questionnement sur les conséquences de nos choix entre dans les mœurs ; c'est un facteur d'espoir. Encore faut-il rechercher et avoir accès à des informations pertinentes, non biaisées par des intérêts mercantiles ou des dogmes idéologiques. Un énorme travail de recherche, à la mesure de la complexité et des enjeux, doit être engagé pour mieux comprendre.

Réduire le gaspillage dès maintenant va assurément dans la bonne direction. Économiser l'énergie également, pourvu que ce ne soit pas au prix d'investissements conduisant au final à un impact défavorable. Confrontés à un rationnement de l'électricité en 2011, les Japonais ont montré une capacité admirable à réduire significativement leurs consommations énergétiques, en quelques mois, mais au prix d'une réduction de leur confort ; pour réduire l'usage des climatiseurs en été, des horaires de bureau ont été déplacés la nuit. Accepterions-nous des sacrifices similaires ?

L'innovation est également convoquée mais le rythme de maturation incrémentale des technologies est souvent mal estimé ; une perception trop souvent naïve ne doit pas servir d'alibi au discours des politiques. N'oublions pas que la physique, dont en particulier la thermodynamique, fixe des limites théoriques infranchissables. Pour gagner en temps et en performances, l'introduction d'innovation de rupture est nécessaire, ce qui nécessite d'y affecter dès maintenant plus de compétences, à former spécifiquement, et des moyens.

Un effort considérable d'explication et de dialogue social est nécessaire auprès de l'ensemble de la population au risque d'un rejet de mesures impopulaires. Le message à porter sur le réchauffement est difficile à faire admettre : d'une part, l'inertie des mécanismes physiques et institutionnels au niveau mondial entraînera le dépassement du

seuil dit de 2°C et, d'autre part, la limitation de la tendance au-delà exige d'y consacrer de gros efforts ; adaptation à des effets certains et actions de prévention pour limiter leur aggravation sont inévitables. Détenteurs du pouvoir et du savoir seront tenus responsables de n'avoir pas prévenu et agi à temps.

Dans ce contexte, il est donc regrettable que des discours trompeurs proposent des "recettes" de transition facile ou même s'attardent sur un débat illusoire entre les scénarios de 1,5° C et 2° C. Que nous le voulions ou non, l'évolution du climat est engagée avec une inertie considérable et impactera le mode d'existence de nos enfants plus que le nôtre avec son cortège de conséquences économiques et sociales. Formons le vœu que la prise de conscience en cours en Europe puisse impulser la déclinaison et la mise en œuvre de mesures pertinentes chez nous et partout sur notre planète sans fragiliser les règles de la démocratie libérale auxquelles nous tenons. ▲

1- "Climat ; faire face à l'urgence", in *Dossier spécial Climat*, La Recherche, n° 553, p. 30, novembre 2019.

2- EKELAND Ivar, "Comment ne pas penser les communs : la théorie économique néo-classique", in *Les communs environnementaux*, Les Annales des Mines n° 92, p. 26-29, octobre 2018.

3- World Bank, "Poverty and Shared Prosperity 2018: Piecing together Poverty Puzzle." (<http://bit.ly/37jiHGD>).

4- PAJOT Philippe, "Les rejets de gaz à effet de serre continuent d'augmenter". Encart in *Dossier spécial Climat*, La Recherche, n° 553, p. 35, novembre 2019.

5- IPCC, "Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report", 2014. (<http://bit.ly/2NYvwwg>).

6- POINSSOT Ch. et al., "Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles.", *Elsevier Energy* 69 (2014), p. 199-211. (<http://bit.ly/348CmYd>).

7- FINON Dominique, "Les incohérences de la transition électrique au regard de la politique de transition énergétique.", in *L'économie du nouveau mix électrique*, Les Annales des Mines n° 93, p. 41-47, janvier 2019.

8- BLAISE Gaël, GLACHANT Matthieu, "Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation ex post sur données de panel.", *La Revue de l'Énergie* n° 646, p. 46-50, septembre-octobre 2019.

9- FOUCCART Stéphane, "Requiem pour les arthropodes" in *Chronique Planète*, p. 26, Le Monde dimanche 10 novembre 2019.

10- KUNIN, William E., "Robust evidence of insect declines", *Nature*, p. 641, 31 octobre 2019. (<https://go.nature.com/33Yvts7>).

11- SEIBOLD Sebastien et al., "Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers.", *Nature*, p. 671-674, 31 octobre 2019. (<https://go.nature.com/2qvZVLF>).

12- IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse. ([www.ipcc.ch/report/srcccl](http://www.ipcc.ch/report/srcccl)).







## LE REGARD DÉCALÉ DE JEAN-PAUL LAVERGNE (N66) SUR LES SOURCES D'ÉNERGIE

### RARETÉ ET FORTUNE

Les sources d'énergie sont des enjeux si sensibles pour la vie et le pouvoir des hommes qu'elles nourrissent depuis longtemps les mythes et l'esprit des créateurs. Voir le Prométhée d'Arcésilas de Paros au VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Mais les œuvres sur le thème sont si nombreuses que nous laissons au lecteur le soin de trouver ses propres références.

Le vent et l'eau font tourner les moulins des peintres et des conteurs; les animaux tirent les chars et les charrues depuis les pétroglyphes suédois il y a trois mille ans. Tout



ce qui se brûle et dont le contrôle peut devenir source de richesses donc de conflits stimule l'imagination des conteurs d'histoire (J-H. Rosny aîné avec La guerre du feu). Enfin, l'homme comme source d'énergie a inspiré bien des artistes, des bas-reliefs gallo-romains au groupe électrogène de Viva Maria (Louis Malle, 1965) en passant par les galères. Et n'oublions pas les cyclistes, rickshaws et triporteurs ni Les triplettes de Belleville (Sylvain Chomet, 2003). ▲

### UN CENTENAIRE EN PLEINE FORME



Eaux glacées: au nord de la baie d'Hudson, pays de neige et de vent, les ressources sont rares: saumons, renards, ours blancs ou morses pour se nourrir et dont la graisse sert de combustible en complément des lichens. Leurs peaux isolent du froid. L'économie de l'énergie y est exigeante et complexe, soutenue par des traditions auxquelles il serait difficile de déroger sans mettre sa survie en

péril. Le voyageur y découvre l'étrangeté souriante et chaleureuse d'un monde glacé.

En 1913, un jeune mineur américain du nom de Robert Joseph Flaherty prospecte ces régions quand le directeur de sa compagnie l'incite à s'équiper d'une caméra pour filmer l'environnement et les populations locales. Trois ans plus tard, les négatifs en acétate de ses premières expéditions brûlent. Qu'à cela ne tienne, Flaherty veut graver sur pellicule les impressions profondes de son contact fusionnel avec les Inuits et entreprendre le tournage de *Nanook l'Esquimau*, financé par le fourreur parisien Révillon qui possède à Port Harrison l'un de ses 47 postes de traite. Le film sort en 1922 et l'entreprise est un grand succès public qui lance la carrière cinématographique de Flaherty malgré des critiques sur sa reconstitution lyrique de la réalité. C'est que la caméra de Flaherty n'est pas un instrument de mesure mais plutôt le stylo d'un auteur qui témoigne de ce qu'il a vu, compris et ressenti en le composant pour nous conduire à partager ses perceptions. Flaherty est un poète doué d'une maîtrise exceptionnelle de l'art cinématographique: cent ans plus tard, son film captive toujours autant le spectateur par la beauté des images, le sens du rythme et de l'intensité dramatique, des évidences inattendues, l'expressivité délicate des acteurs et une forme d'humour qui évoque parfois Méliès.

**Robert Flaherty:** *Nanook l'Esquimau* - 1h18' - 1922  
<https://archive.org/details/nanookOfTheNorth1922>

### LE CHOC DE DEUX MONDES



Eaux profondes: Hammerfest, pointe boréale du continent européen entre troupeaux de rennes sur les terres et hydrocarbures sous la mer de Barents. La mer déchire la terre dans les fjords, la terre colonise la mer dans les îles. Comme un affrontement qui ne se limite pas à celui des éléments mais gagne les hommes et les cultures: conflit de territoires entre éleveurs dont les rennes doivent

se déplacer librement sur les terres ancestrales et pétroliers en quête de bases sûres, conflit entre traditions autochtones et modernité sous pression des ressources à trouver et des profits à récolter. Chacun cherche sa place dans ces mondes qui se heurtent et souhaiteraient tant reléguer l'autre au diable.

Dans ce décor volontiers dramatique, Olivier Truc nous raconte avec brio et finesse une enquête de Klemet et Nina, chargés de la "police des rennes" et placés face à un enchaînement de morts mystérieuses dont ils trouveront l'origine dans l'histoire trouble de la plongée industrielle, les exigences de l'off-shore ayant fait bon marché de la vie des plongeurs. Personnages campés vigoureusement, rythme soutenu, intrigues complexes mais claires et cohérentes, relations profondes et subtiles entre protagonistes, situations solidement documentées, écriture à la fois fluide et ardente donnent du charme à ce roman dont une qualité essentielle est la mise en évidence des dislocations entre groupes humains qui n'ont pas la même vision du monde et sont néanmoins condamnés à coexister.

**Olivier Truc:** *Le détroit du loup* - 522 p. - 2014 - Métailié  
 Points - 8,30 €



Montabert innove, développe et fabrique des brise-roches et perforateurs hydrauliques d'une fiabilité et d'une performance exceptionnelles, grâce à l'utilisation de technologies de pointe.

Depuis 1921, Montabert s'engage à développer des méthodes et des solutions axées sur la productivité, la fiabilité et la sécurité. Montabert investit en permanence dans la recherche et le développement afin de fabriquer des produits à la pointe de la technologie.

Avec ces 3 à 5 brevets déposés par an, Montabert ne cesse de révolutionner le monde du brise-roche et du perforateur hydraulique depuis près d'un siècle.